

АНАЛИЗ ВНУТРЕННИХ УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

¹Винницкий национальный технический университет

В статье рассмотрены результаты решения задачи обеспечения требуемой надёжности изготовления элементов конструкции башенного сооружения. На примере башни кругового обзора показаны способы расчета внутренних усилий в элементах стержневых систем методами механики деформированного твердого тела. Представленный расчетный аппарат позволяет оценивать влияние ветровой нагрузки на прочность и устойчивость сооружения.

ВВЕДЕНИЕ

Бесфундаментные башни-аттракционы по-прежнему остаются интересными и прибыльными элементами индустрии развлечений. Эти сооружения должны быть максимально легкими, жесткими и надежными [1, 2]. Одновременно для выживания в условиях кризиса производители аттракционов должны уменьшать себестоимость, основной составляющей которой является материалоемкость. Это определило актуальность исследования внутренних усилий в элементах стержневой системы аттракциона «Башня кругового обзора» методами механики деформированного твердого тела. При этом, важным и актуальным остается поиск причин потери прочности, жесткости и стойкости таких сооружений, поиск рациональных конструктивных решений опорных платформ после определения силовых нагрузок в опасном сечении таких сооружений, исследование их поведения в условиях экстремальных ветровых и силовых нагрузок, разработка и исследование новых высокоточных узлов для обеспечения сборки-разборки конструкции. Из-за того, что вдоль корпуса башни перемещается технологическое оборудование, элементы направляющей башни должны быть прочными, иметь высокую точность сварных соединений и обеспечивать стойкость. Хотя конструктивно наиболее близкими к подобным башням являются башенные краны, однако на территории Украины подобные конструкции по-прежнему остаются не достаточно изученными.

Объектом исследования является металлическая башня кругового обзора с высокоточным корпусом и её составные части – жёсткая опорная платформа, подвижная капсула и технологическое оборудование.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Каждый инженерный расчет в области технических наук включает, согласно [3], три этапа:

- 1) идеализация объекта;
- 2) анализ расчетной схемы;
- 3) обратный переход от расчетной схемы к реальной конструкции и формулировка

практических выводов, ради которых было предпринято исследование.

Содержание задачи данного исследования отвечает этим этапам.

Для количественной оценки устойчивости сооружения «БКО» это явления необходимо перевести на язык математического анализа теории устойчивости. Прежде всего, возникает вопрос, как выбрать расчетную схему: что при анализе устойчивости можно не принимать во внимание и что необходимо учитывать. Согласно Эйлеру–Лагранжу решение задачи сводится к определению возможных форм равновесия при следующих предпосылках:

– геометрическая и силовая схемы должны быть доведены до такой степени идеализации, чтобы условия равновесия описывались системой однородных уравнений. Если рассматривается сжатый стержень, то предполагается, что он имеет совершенно прямолинейную форму, материал однороден, и сжимающая сила приложена строго центрально. В целом принимается, что влияние первоначальных отклонений от номинала несущественно;

– возмущения, которые налагаются на систему, являются сколь угодно малыми, и по отношению к этим возмущениям, рассматривается поведение системы. Перемещения предполагаются настолько медленными, что инерционные эффекты, связанные с наличием масс, являются несущественными.

Потеря устойчивости отождествляется с выполнением условия существования новых форм равновесия сколь угодно близких к исходной. Нагрузки, при которых эти условия выполняются,

называются критическими. При расчете инженерных конструкций критическая нагрузка принимается в качестве предельной, по которой и назначается запас устойчивости.

Классическая схема расчета на стойкость не является универсальной. Тем не менее, в подавляющем числе случаев, согласно [4], классическая расчетная схема достаточно полно отражает существо явления, а практическая значимость и четкость математического подхода обеспечивают ей доминирующее положение в анализе устойчивости деформируемых систем.

При решении задач устойчивости нагрузку следует принимать со степенью детализации более существенной, чем при решении обычных задач сопротивления материалов. Недостаточно показать величину и направление действующих сил. Необходимо также указать их поведение в процессе отклонения системы от исходного положения равновесия. Характер взаимодействия может быть различным в зависимости от особенностей наложения связей. В результате различного поведения сил получаются и различные значения критических нагрузок.

Расчет на стойкость был выполнен с учетом влияния условий закрепления стержневой системы на величину критической силы. Стрела аттракциона обнаружила гибкость $\lambda = 67$, характерную для стержней малой гибкости. Это подтвердило необходимость определения критических напряжений по условиям прочности в пределах пропорциональности материала. Использование теории стойкости бесфундаментных сооружений на упругом грунте доказало, что в первом приближении можно считать, что башня опрокидывается около своего габарита. Этот принцип основан на допущении, что сооружение не опрокидывается вокруг своей оси опрокидывания, если полезный (стабилизирующий) момент вокруг этой оси, образованный собственным весом сооружения с платформой и весом навесного оборудования будет больше, чем максимальный момент опрокидывания.

$$M_p = \sum_{i=1}^n F_{xi} \cdot h_i,$$

где F_{xi} – горизонтальная составляющая i -ой нагрузки; h_i – высота приложения горизонтальной составляющей F_{xi} ; n – количество всех нагрузок на стержневое сооружение.

Расчет внутренних усилий в стояках нижней, наиболее нагруженной секции аттракциона выполнен для нижнего положения капсулы при максимальной ветровой нагрузке q_6 при скорости ветра 30 м/с. На рис. 1 показано положение опасного сечения.

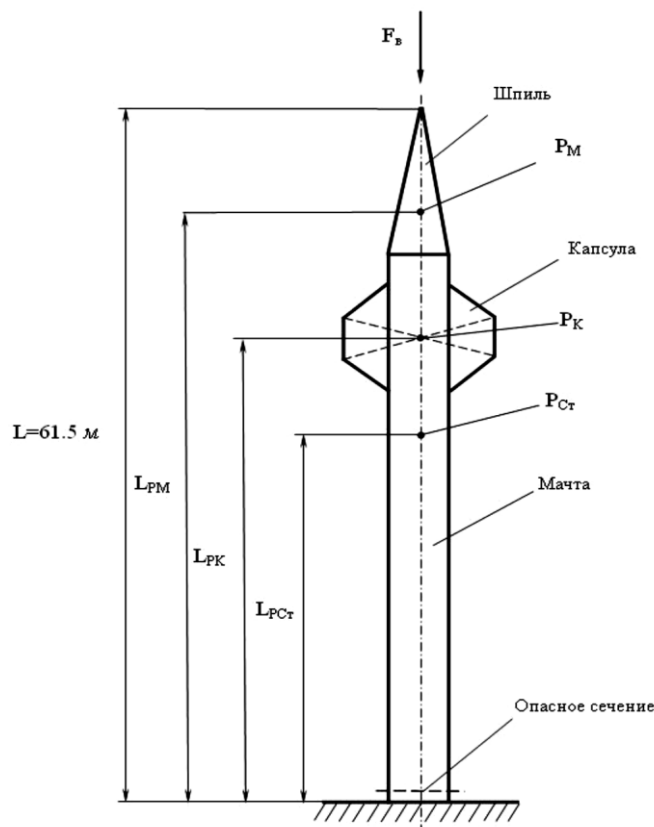


Рисунок 1 – Общий вид аттракциона

Расчетная схема показана на рис. 2. Анализ внутренних усилий в опасном сечении выполнен для двух вариантов ветровой нагрузки.

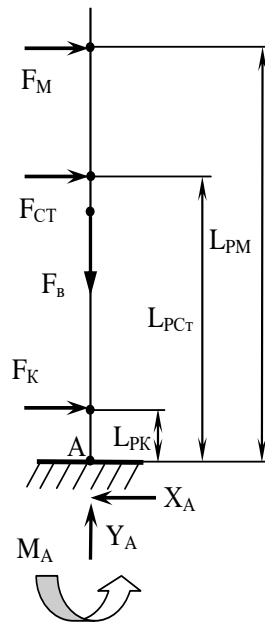


Рисунок 2 – Расчетная схема

Условие прочности конструкции:

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}} \geq n_{adm},$$

где $\sigma_y = 245$ МПа – предел текучести для стали 245; σ_{\max} – максимальное рабочее напряжение в стояке.

Минимальный запас прочности

$$n_{adm} = 1,5.$$

Максимальное напряжение составило 161 МПа, следовательно, минимальный коэффициент запаса (в максимально нагруженной стойке) отвечает условию:

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}} = \frac{245}{161} = 1,52 \geq n_{adm},$$

что достаточно для обеспечения прочности конструкции.

Расчеты на прочность выполнены по двум вариантам нагрузок и выявили более опасный вариант ветровой нагрузки. Условия прочности для всех точек наиболее нагруженного сечения соблюдены. Результаты расчетов для двух вариантов нагрузок представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Расчет нагрузок на элементы аттракциона при эксплуатационных ветровых воздействиях (скорость ветра 15 м/с). Капсула находится в верхнем рабочем положении

Величина	Обозначение, формула	Размерность	Мачта	Шпиль	Капсула
1	2	3	4	5	6
Скорость ветра	V	м/с	15	15	15
Динамическое давление воздуха	$W_0 = \rho v^2 / 2 = 1,225 v^2 / 2$	Па	138	138	138
Коэффициент аэродинамичности	C_{aer}	–	1,12	1,12	0,9
Нижняя отметка элемента	Z_1	М	0	49,5	44
Верхняя отметка элемента	Z_2	М	44	61,5	49,5

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Усредненный коэффициент высоты	$\bar{C}_h = \frac{1}{Z_2 - Z_1} \int_{Z_1}^{Z_2} C_h(Z) dZ$	–	1,93	2,4	2,35
Коэффициент динамичности	C_d	–	1,1	1,1	1,1
Расчетный коэффициент	$\bar{C} = C_{aer} \bar{C}_h C_d$	–	2,37776	2,9568	2,3265
Коэффициент надежности	γ_{fe}	–	0,8	0,8	0,8
Величина средней ветровой нагрузки	$\bar{W}_e = \gamma_{fe} W_0 \bar{C}$	Pa	262	326	256
Теневая площадь элемента	A	М ²	123,8	15	46,2
Расстояние от нижней опоры до центра давления	$L_p = \frac{\int_{Z_1}^{Z_2} Z \cdot C_h(Z) \cdot dZ}{\int_{Z_1}^{Z_2} C_h(Z) \cdot dZ}$	М	29,2	53,2	47,6
Величина ветровой нагрузки на элемент	$F = \bar{W}_e \cdot A$	Н	32441	4890	11850
Момент, создаваемый относительно нижней опоры	$M_A = L_p \cdot F$	Н·м	947272	260138	564067

Суммарный момент относительно нижней опоры $M_A = 1,77 \cdot 10^6$ Н·м.

Суммарная горизонтальная сила $F = 49 \cdot 10^3$ Н.

Таблица 2 – Расчет нагрузок на элементы аттракциона при эксплуатационных ветровых воздействиях (скорость ветра 15 м/с). Капсула находится в верхнем рабочем положении (для сравнения с табл. 1)

Величина	Обозначение, формула	Размерность	Мачта	Шпиль	Капсула
1	2	3	4	5	6
Скорость ветра	V	м/с	15	15	15
Динамическое давление воздуха	$W_0 = \rho v^2 / 2 = 1,225 v^2 / 2$	Pa	138	138	138
Коэффициент аэродинамичности	C_{aer}	–	1,6	1,6	1,2
Нижняя отметка элемента	Z_1	М	0	49,5	44
Верхняя отметка элемента	Z_2	М	44	61,5	49,5
Усредненный коэффициент высоты	$\bar{C}_h = \frac{1}{Z_2 - Z_1} \int_{Z_1}^{Z_2} C_h(Z) dZ$	–	1,93	2,4	2,35
Коэффициент динамичности	C_d	–	1,1	1,1	1,1
Расчетный коэффициент	$\bar{C} = C_{aer} \bar{C}_h C_d$	–	3,3968	4,224	3,102
Коэффициент надежности	γ_{fe}	–	0,8	0,8	0,8
Величина средней ветровой нагрузки	$\bar{W}_e = \gamma_{fe} W_0 \bar{C}$	Pa	374	466	342
Теневая площадь элемента	A	м ²	123,8	15	46,2

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
Расстояние от нижней опоры до центра давления	$L_p = \frac{\int_{z_1}^{z_2} Z \cdot C_h(Z) \cdot dZ}{\int_{z_1}^{z_2} C_h(Z) \cdot dZ}$	М	29,2	53,2	47,6
Величина ветровой нагрузки на элемент	$F = \bar{W}_e \cdot A$	Н	46344	6985	15800
Момент, создаваемый относительно нижней опоры	$M_A = L_p \cdot F$	Н·м	1353246	371625	752089

Суммарный момент относительно нижней опоры $M_A = 2,48 \cdot 10^6$ Н·м.

Суммарная горизонтальная сила $F = 69 \cdot 10^3$ Н.

Поскольку суммарный момент M_A , суммарная горизонтальная сила F при экстремальных нагрузках существенно превышают эксплуатационные, то дальнейшие расчеты внутренних усилий и опасного сечения на прочность выполнены для экстремальных нагрузок при скорости ветра 30 м/с.

Расчет реакций и усилий в местах болтовых соединений для нижнего положения капсулы при максимальной ветровой нагрузке q_b (скорость ветра 30 м/с) выполнен для следующих исходных данных:

- вертикальная сила $F_b = 639 \cdot 10^3$ Н;
- горизонтальная сила $F_{гор} = 197 \cdot 10^3$ Н;
- момент изгиба $M_{опоры} = 4,97 \cdot 10^6$ Н·м.

При выполнении расчета внутренних усилий в стояках нижней, наиболее нагруженной секции (опасное сечение) расчетная схема показана на рис. 3.

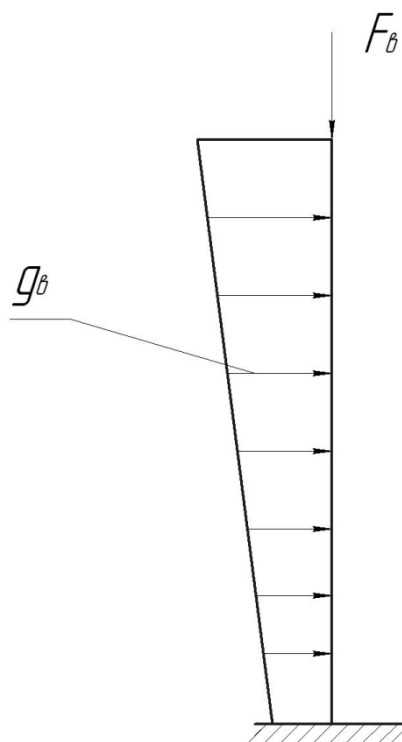


Рисунок 3 – Расчетная схема при наличии ветровой нагрузки q_b

На рис. 4 а, б показаны варианты расположения аттракциона по отношению к направлению ветровой нагрузки.

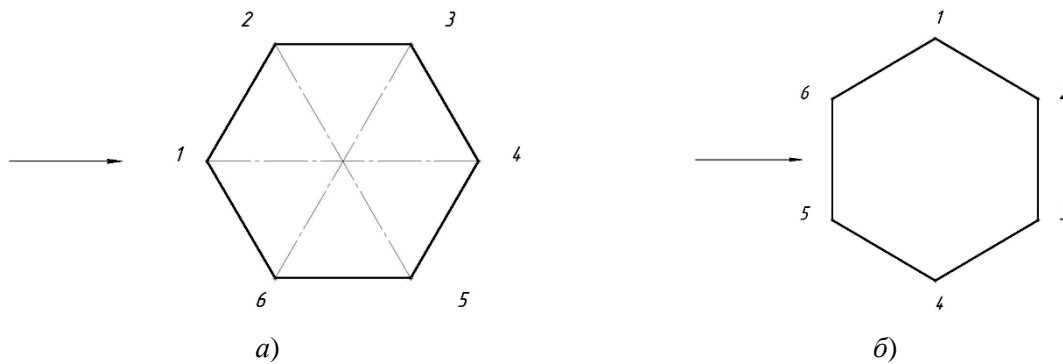


Рисунок 4 – Направления ветровой нагрузки: а – вариант 1; б – вариант 2

Опорные реакции определены из уравнений равновесия:

$$\Sigma F_x = F_{\text{гор}} - X_A = 0;$$

$$\Sigma F_y = F_B - Y_A = 0;$$

$$\Sigma M_A = F_{\text{гор}} L_p - M_A = 0.$$

$$\text{Откуда } X_A = F_{\text{гор}} = 197 \cdot 10^3 \text{ N};$$

$$Y_A = F_B = 639 \cdot 10^3 \text{ N};$$

$$M_A = F_{\text{гор}} L_p = 4,97 \cdot 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}.$$

При расчете геометрических характеристик опасного сечения (рис. 5) перемычками пренебрегли, отнеся их к дополнительному запасу прочности.

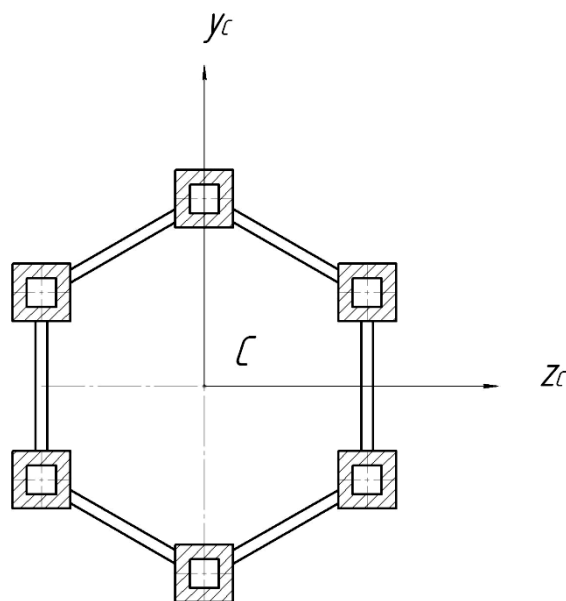


Рисунок 5 – Горизонтальное сечение стояка

Момент инерции поперечного сечения трубы и площадь (рис. 6) считаем равными соответственно:

$$I_z = I_y = \frac{b^4}{12} - \frac{b^4}{12} = \frac{1}{12} (b^4 - (b - 2s)^4) = \frac{1}{12} (0,25^4 - (0,25 - 2 \times 0,01)^4) = 9,232 \cdot 10^{-5} (m^4);$$

$$A_1 = b^2 - b_1^2 = b^2 - (b - 2s)^2 = 0,25^2 - (0,25 - 2 \cdot 0,01)^2 = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^2\text{)}.$$

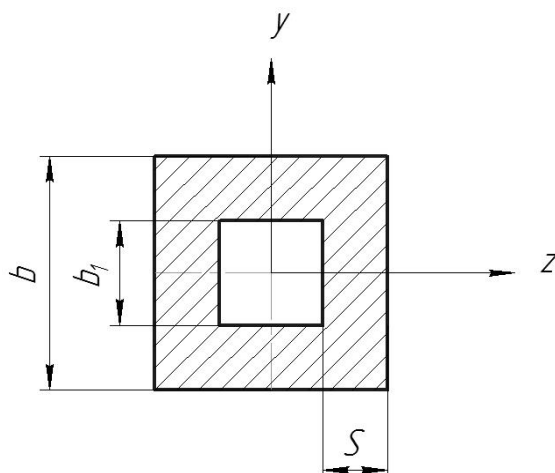


Рисунок 6 – Поперечное сечение трубы стояка: s – толщина стенки трубы

Если принять габаритные размеры стояка (рис. 7) равными: $a = 1,25$ м, $2a = 2,5$ м, то осевые моменты инерции составили соответственно значения:

$$I_{zc} = 4(I_{z1} + A_1 \left(\frac{a}{2}\right)^2) + 2(I_{z1} + A_1 a^2) = 4 \left[9,232 \cdot 10^{-5} + 9,6 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1,25}{2}\right)^2 \right] + 2 \cdot (9,232 \cdot 10^{-5} + 9,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,25^2) = 4,555 \cdot 10^{-2} \text{ (м}^4\text{)};$$

$$I_{yc} = 4(I_{y1} + A_1 (0,87a)^2) + 2I_{y1} = 4(9,232 \cdot 10^{-5} + 9,6 \cdot 10^{-3} (0,87 \cdot 1,25)^2) + 2 \cdot 9,232 \cdot 10^{-5} = 4,555 \cdot 10^{-2} \text{ (м}^4\text{)}.$$

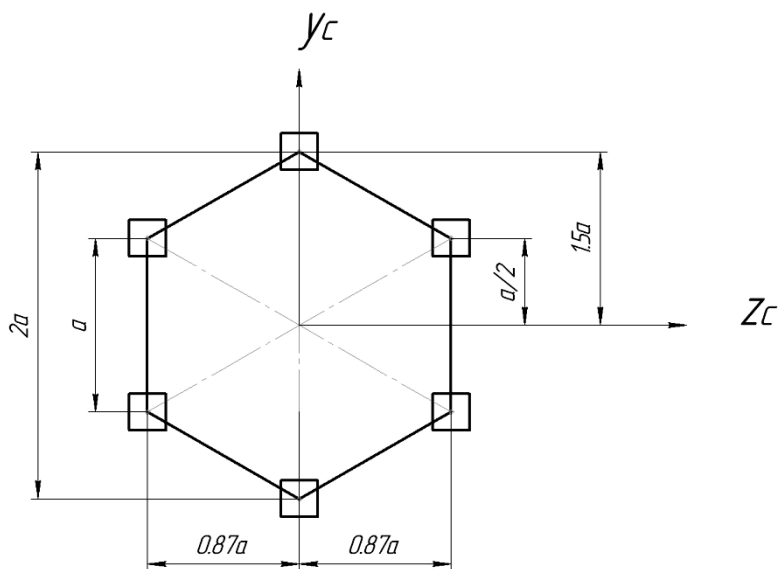


Рисунок 7 – Схема поперечного сечения стояка

Таким образом,

$$I_{zc} = I_{yc}.$$

Площадь сечения

$$A_{\Sigma} = 6 \cdot A = 6 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3} = 5,76 \cdot 10^{-2} \text{ (м}^2\text{)}.$$

Нормальные напряжения от сжимающей силы (от веса аттракциона) составили:

$$\sigma_N = \frac{F}{A_{\Sigma}} = \frac{6,39 \cdot 10^5}{6 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3}} = \frac{6,39 \cdot 10^5}{5,76 \cdot 10^{-2}} = 11,09 \text{ МПа}.$$

Нормальные напряжения от изгибающего момента были определены из соотношения:

$$\sigma_M = \frac{M_z}{I_{zc}} y.$$

Данные для построения эпюр нормальных напряжений от изгибающего момента для значений $M_Z = 4,97 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $I_{zc} = 4,555 \cdot 10^{-2} \text{ м}^4$ и текущих координат y_c сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов для построения эпюр нормальных напряжений

№ точки	Координата	Напряжение	Суммарное напряжение
	$Y_c, \text{ м}$	σ_{Mz}	$\Sigma\sigma = (\sigma_N + \sigma_M)$
1	1,375	150,1	138,98
2	1,125	122,8	111,69
3	0,75	81,9	70,76
4	0,5	54,6	43,48
5	-0,5	-54,6	-65,66
6	-0,75	-81,9	-92,95
7	-1,125	-122,8	-133,88
8	-1,375	-150,1	-161,16

При этом суммарное напряжение определено из уравнения:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_N + \sigma_M.$$

ВЫВОДЫ

1. Выполнено исследование конструктивной схемы башни-аттракциона и влияние ее геометрических параметров на несущую способность при воздействии внешних нагрузок.
2. Выполнена оценка прочности элементов конструкции и устойчивости металлической башни кругового обзора с учетом ветровой нагрузки и эксплуатационных параметров. Коэффициент запаса $n = 1,52$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТУ У 13326217.004-2001. Аттракцион-башня с прямолинейным подъёмом до 50 м. Технические условия. – Зарегистрировано 19.06.2001 в Держстандарт Украины; введ. 20.06.2001 – 65 с.
2. ГОСТ Р 52170-2003. Безопасность аттракционов механизированных. Основные положения по проектированию стальных конструкций. – Введ. 01.01.2005 – Госстандарт России, 2005. – 78 с.
3. Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов. / В. И. Феодосьев. – М. : Высшая школа, 1997. – 456 с.
4. Пановко Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем. Современные концепции, парадоксы и ошибки / Я. Г. Пановко, И. И. Губанова. – 4-е изд. перераб. – М. : Наука, 1987. – 352 с.
5. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 744 с.

REFERENCES

1. TU U 13326217.004-2001. Attraktsion-bashnya s pryamolineynum pod'yomom do 50 m. TU. – zaregistrirovano 19.06.2001 v Derzhstanart Ukrainu; vved. 20.06.2001 – 65 p.
2. GOST P 52170-2003. Bezopasnost' attraktsionov mekhanizirivannykh. Osnovnyye polozheniya po proektirovaniyu stal'nukh konstruksii. Vved. 01.01.2005 – Gosstandart Rossii, 2005. – 78 p.
3. Pheodos'ev V. I. Soprotivleniye Materialov / V. I. Pheodos'ev. – Moskva: Vusshaya Shkola, 1997. – 456 p.
4. Panovko Ya.G. Ustoychivost' i kolebaniya uprugikh system. Sovremennue kontseptsii, paradokcu i oshibki / Ya. G. Panovko. – Moskva: Nauka, 1987. – 352 p.
5. Rabotnov Yu. N. Mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela / Yu. N. Rabotnov. – Moskva: Nauka, 1979. – 744 p.

Т. Ф. Архіпова¹, Н. Г. Вигонюк¹, М. В. Куца¹

АНАЛІЗ ВНУТРІШНІХ ЗУСИЛЬ В ЕЛЕМЕНТАХ СТРИЖНЕВИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ МЕХАНІКИ ДЕФОРМІВНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА

¹Вінницький національний технічний університет

У статті розглянуті результати розв'язку задачі забезпечення необхідної надійності виготовлення елементів конструкції баштової споруди.

Об'єкт дослідження – металева конструкція башти кругового огляду з високоточним корпусом та її складові частини – жорстка опорна платформа, рухома капсула з технологічним обладнанням.

Мета роботи – виконати дослідження конструктивної схеми башти-атракціону та вплив геометричних параметрів на несучу здатність під дією зовнішніх навантажень; оцінити міцність елементів конструкції та стійкість башти з урахуванням вітрового навантаження та експлуатаційних параметрів.

Проведене дослідження демонструє способи розрахунку внутрішніх зусиль в елементах стрижневих систем методами механіки деформівного твердого тіла. Представлений розрахунковий апарат дозволяє оцінити вплив вітрового навантаження на міцність та стійкість споруди. Встановлено, що конструктивна схема башти забезпечує необхідний запас стійкості розрахункової моделі. Запропонована методика розрахунку дозволила визначити внутрішні зусилля при закріпленні в опорах башти.

Ключові слова: міцність; стійкість; деформація; стрижнева конструкція; механіка деформівного твердого тіла; границя міцності; запас стійкості; опорні реакції; внутрішні зусилля.

Архіпова Тетяна Федорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри опору матеріалів та прикладної механіки, Вінницький національний технічний університет, e-mail: tfarhipova@gmail.com

Вигонюк Н. Г., студентка факультету машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: vugonyuk@mail.ru

Куца М. В., студентка факультету машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: misakitian@gmail.com

T. Arkhipova¹, N. Vugonyuk¹, M. Kootsa¹

ANALYSIS OF INTERNAL EFFORTS IN ELEMENTS OF THE CORED SYSTEMS METHODS OF MECHANICS OF THE DEFORMED SOLID

¹Vinnytsya National Technical University

The article deals with results of the research the actual problem – ensuring the required reliability of manufacturing structural members of the tower structure.

A research object is a metallic tower of spin-scan with a high-fidelity corps and its component parts is a hard supporting platform, mobile capsule and technological equipment.

A purpose of work is study and submitted payment to ensure the strength and stability of the tower housing technological equipment which moves along.

There are methods of the research internal forces in elements of core systems using the mechanics of deformable solids. It was found the structural scheme of the tower provides the necessary stability margin calculation model. The proposed method of calculation is also possible to determine the internal forces in the supports for fixing the tower.

Key words: strength; stability; stress; strain; rod construction; mechanics of deformable solids; strength limit; internal forces; support reactions.

Arkhipova T., Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of Strength of Materials and Applied Mechanics Department, Vinnytsya National Technical University, e-mail: tfarhipova@gmail.com

Vugonyuk N., student of Engineering and Transport Faculty, Vinnytsya National Technical University, e-mail: vugonyuk@mail.ru

Kootsa M., student of Engineering and Transport Faculty, Vinnytsya National Technical University, e-mail: misakitian@gmail.com

Т. Ф. Архипова¹, Н. Г. Выгонюк¹, М. В. Куца¹

АНАЛИЗ ВНУТРЕННИХ УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

¹Винницкий национальный технический университет

В статье рассмотрены результаты решения задачи обеспечения требуемой надёжности изготовления элементов конструкции башенного сооружения.

Объект исследования – металлическая башня кругового обзора с высокоточным корпусом и её составные части – жёсткая опорная платформа, подвижная капсула и технологическое оборудование.

Цель работы – выполнить исследование конструктивной схемы башни-аттракциона и влияние ее геометрических параметров на несущую способность при воздействии внешних нагрузок; оценить прочность элементов конструкции и устойчивость металлической башни кругового обзора с учетом ветровой нагрузки и эксплуатационных параметров.

Выполненное исследование демонстрирует способы расчета внутренних усилий в элементах стержневых систем методами механики деформируемого твердого тела. Представленный расчетный аппарат позволяет оценить влияние ветровой нагрузки на прочность и устойчивость сооружения. Установлено, что конструктивная схема башни обеспечивает необходимый запас устойчивости расчетной модели. Предложенная методика расчета позволила определить внутренние усилия при закреплении в опорах башни.

Ключевые слова: прочность; устойчивость; деформация; стержневая конструкция; механика деформируемого твердого тела; предел прочности; запас стойкости; опорные реакции; внутренние усилия.

Архипова Татьяна Федоровна, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, Винницкий национальный технический университет, e-mail: tfarhipova@gmail.com.

Выгонюк Н. Г., студентка факультета машиностроения и транспорта, Винницкий национальный технический университет, e-mail: vugonyuk@mail.ru

Куца М. В., студентка факультета машиностроения и транспорта, Винницкий национальный технический университет, e-mail: misakitian@gmail.com