

І.М.Ольховий, канд. техн. наук, доцент, Л.Ф.Дзюба, канд. техн. наук, доцент, О.В.Меньшикова канд. фіз.-мат. наук, доцент, О.М.Гузаревич (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

ОЦІНКА МІЦНОСТІ ОПОР РЯТУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ПРИ ЇХ РОЗМІЩЕННІ НА РІЗНИХ РІВНЯХ

Досліджено міцність опор рятувального пристрою у разі його встановлення не в горизонтальній площині. Визначено поздовжні стискальні зусилля в опорах пристрою для трьох випадків його розміщення. При цьому найбільш навантажена опора, на якій закріплена лебідка, змодельована шарнірно-опертою балкою, що працює в умовах поздовжньо-поперечного згину. Обчислено напруження та проведено оцінку міцності опор для трьох випадків розміщення пристрою та двох значень зовнішнього навантаження.

Ключові слова: міцність, балка, поздовжньо-поперечний згин

Вступ. Для надання своєчасної допомоги під час надзвичайних подій, пов'язаних з потраплянням у вузькі глибокі отвори людей чи тварин, доцільно застосовувати спеціальні рятувальні пристрої. Такими пристроями є стержневі конструкції [1 – 6], які під час надання допомоги можна вертикально розмістити над отвором. Основними конструктивними елементами таких рятувальних пристроїв є опори – три стержні-ноги, які з'єднані шарнірно за верхні кінці одним кріпильним вузлом. Нижні кінці стержнів-ніг розміщують на опорній поверхні. Зазвичай стержневі рятувальні пристрої обладнані лебідками для піднімання вантажу. Лебідки розміщують переважно на одному зі стержнів (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд рятувальних пристроїв: а – штатив-тринога «Трипод»; б – штатив-тринога МН-10; в – рятувальний пристрій "Триніг"

Відрізняються стержневі рятувальні пристрої вантажністю, матеріалом несучих елементів конструкції, видами з'єднання елементів конструкції, модифікаціями лебідок. Статична міцність конструктивних елементів стержневого рятувального пристрою оцінена у роботі [7]. Однак у цій роботі не досліджено міцність стержнів конструкції рятувального пристрою у разі, якщо нижні кінці опор розміщені не на одній горизонтальній площині. Таке розміщення може бути тоді, коли поверхня над отвором не рівна, має підвищення або западини.

Мета роботи. Виконати перевірку міцності опор рятувального пристрою «Триніг» у разі розміщення нижніх кінців ніг не на одній горизонтальній площині. Для стержня, на якому закріплена лебідка, виконати дослідження поздовжньо-поперечного згину.

Виклад основного матеріалу. Для визначення напружень в опорах пристрою слід розглянути три випадки з уточненням місця прикладання статичного навантаження та розміщенням нижніх кінців стержнів як на одному горизонтальному рівні, так і на різних рівнях. Розрахункова схема рятувального пристрою показана на рис. 2, де 1, 2, 3 – стержневі опори, 4 – лебідка, 5 – канат. Геометричні параметри пристрою наведені в [7].

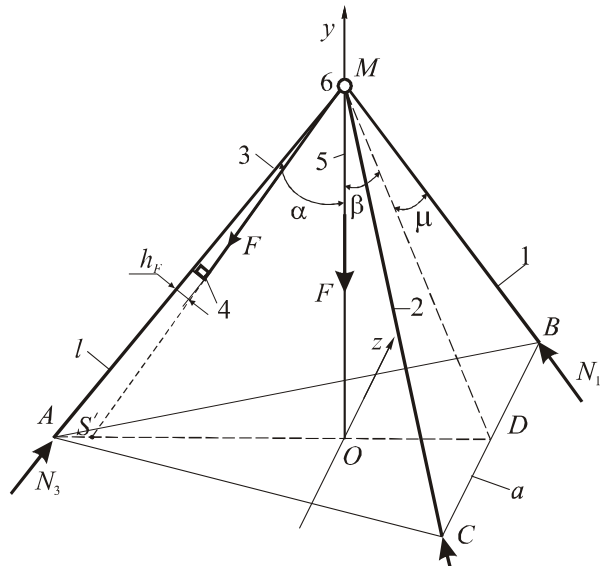


Рис. 2. Розрахункова схема пристрою «Триніг»

Значення кутів (рис. 2), обчислені за геометричними розмірами, дорівнюють: $\mu = 22,3^\circ$, $\alpha = 25,973^\circ$, $\beta = 13,59^\circ$.

На опори пристрою під час піднімання вантажу діє вертикальна сила F та аналогічна за величиною сила, яка спрямована вздовж канату лебідки. Ця сила нахилена до вертикальної осі y під кутом $(\alpha - \psi)$ (рис. 2). Від дії сил у ногах 1, 2 пристрою виникають однакові стискальні зусилля $N_1 = N_2$, а в нозі 3 – стискальне зусилля N_3 . Для визначення цих усилей запишемо систему рівнянь статки

$$\begin{cases} 2N_1 \cdot \cos \alpha + N_3 \cdot \cos \alpha = F + F \cdot \cos \alpha; \\ 2N_1 \cdot OD \cdot \cos \mu + N_3 \cdot OA \cdot \cos \alpha = -F \cdot SO \cdot \cos(\alpha - \psi). \end{cases} \quad (1)$$

Значення величин SO , ψ знаходимо, розглянувши ΔAMO : $\psi = 6,78^\circ$, $SO = 0,945$ м.

Після підстановки в систему (1) вказаних величин отримаємо

$$\begin{cases} 1,8N_1 + 0,899N_3 = 1,899F; \\ 1,19N_1 - 1,14N_3 = -0,89F. \end{cases} \quad (2)$$

Звідси визначаємо

$$N_1 = N_2 = 0,43F, N_3 = 1,24F.$$

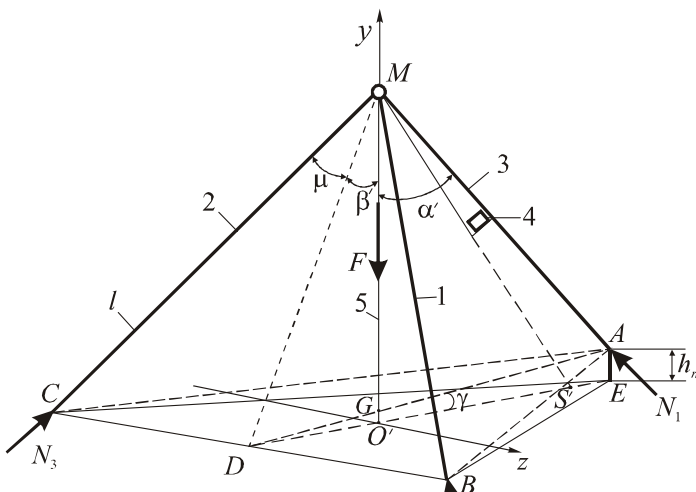


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення геометричних параметрів пристрою у разі розміщення однієї опори на виступі

Числові значення цих сил, визначені для двох варіантів зовнішнього навантаження пристрою, наведені в табл. 1. Найбільш навантаженою є опора 3 пристрою, в поперечних перерізах якої виникає найбільше повздовжнє зусилля N_3 за обох випадків навантаження силою F .

У ситуаціях, коли отвір люка чи ями розміщений біля виступу чи западини, рятувальний пристрій встановлюють з розміщенням однієї з ніг на цьому виступі чи в западині. Розрахункова схема пристрою у разі розміщення однієї опори на виступі висотою h_n наведена на рис. 3.

За рис. 3 визначаємо значення кутів: $\beta' = 90^\circ - \angle MDE = 90^\circ - 82,437^\circ = 7,563^\circ$, $\alpha' = 32^\circ$. Сила, яка спрямована вздовж канату лебідки та діє на опори пристрою під

час піднімання вантажу, нахилена до вертикальної осі у під кутом $(\alpha' - \psi)$ (рис. 3). Унаслідок дії цієї сили в опорах 1, 2 пристрою виникають однакові стискальні зусилля $N'_1 = N'_2$, а в опорі 3 – стискальне зусилля N'_3 . Для визначення цих зусиль запишемо систему рівнянь рівноваги (2) у вигляді

$$\begin{cases} 2N'_1 \cos \xi' + N'_3 \cos \alpha' = F + F \cos(\alpha' - \psi); \\ 2N'_1 \cdot O'D \cos \mu + N'_3 \cdot O'Z \cdot \cos \alpha' = -F \cdot SO' \cdot \cos(\alpha' - \psi). \end{cases} \quad (3)$$

З рис. 3 видно, що $\angle OMV = \psi$, значення якого $\psi = 6,78^\circ$. Величини відрізків MO' , $O'D$, $O'Z$: $MO' = MD \cos \beta' = 2,66 \text{ м}$, $O'D = MD \cdot \sin \beta = 0,353 \text{ м}$, $O'Z = MO' \cdot \text{tg} \alpha' = 1,66$.

Значення кута ξ' визначаємо з $\Delta O'MC$: $\cos \xi' = \frac{MO'}{MC} = 0,917$, $\sin \xi' = \frac{O'C}{MC} = 0,4$.

Отримані значення кута ξ' та відстані $O'M$ підставляємо в систему (3):

$$\begin{cases} 1,83N'_1 + 0,848N'_3 = 1,905F; \\ 0,66N'_1 - 1,41N'_3 = -1,13F, \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язок системи (4) такий:

$$N'_1 = N'_2 = 0,55F, N'_3 = 1,06F.$$

Числові значення стискальних зусиль в опорах для цього випадку їх розміщення, визначені для двох варіантів зовнішнього навантаження пристрою, наведені в табл. 1. Найбільш навантаженою є опора 3 пристрою (рис. 3), у поперечних перерізах якої виникає найбільше повздовжнє зусилля N'_3 при обох випадках навантаження силою F .

Повздовжні сили у ногах рятувального пристрою у разі розміщення кінців двох опор на виступі висотою h_n визначимо з використанням рис. 4.

Кут γ між горизонтальною площиною та площиною, утвореною нижніми кінцями опор 1, 2 триноги, дорівнює:

$\sin \gamma = \frac{h_n}{AD} = 0,105$, $\gamma = 6,027^\circ$. Оскільки ноги пристрою зафіксовані, то $\alpha + \beta = \alpha'' + \beta'' = \text{const}$. Значення кутів α'' та β'' знаходимо з ΔMAK (рис. 4). Тоді: $\alpha'' = 29,213^\circ$

$\beta'' = 10,35^\circ$.

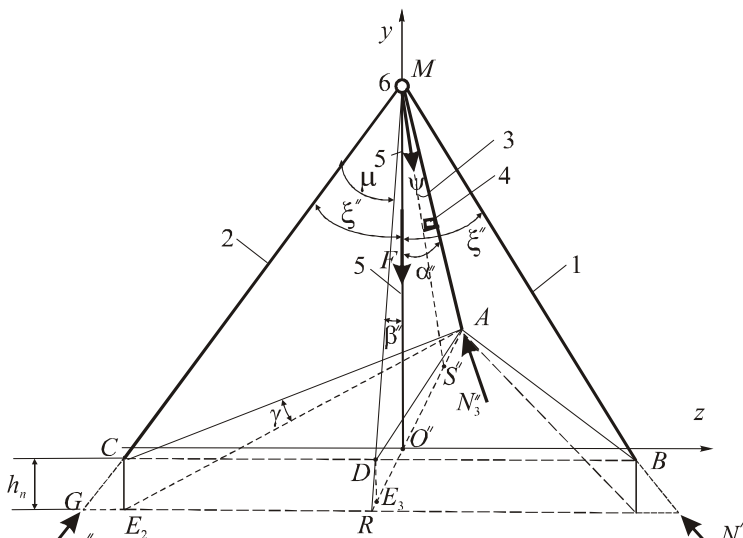


Рис. 4. Розрахункова схема для визначення геометричних параметрів у разі розміщення двох опор пристрою на виступі

Система (2) для даного випадку набуде вигляду

$$\begin{cases} 2N''_1 \cos \xi'' + N''_3 \cos \alpha'' = F + F \cos(\alpha'' - \psi), \\ 2N''_1 \cdot O''R \cdot \cos \mu - N''_3 \cdot O''A \cdot \cos \alpha'' = -F \cdot O''S \cdot \sin(\alpha'' - \psi), \end{cases} \quad (5)$$

де

$$\cos \xi'' = 0,8.$$

Підставивши числові значення параметрів в систему (4), отримаємо:

$$\begin{cases} 1,6N_1'' + 0,873N_3'' = 1,92F, \\ 2,16N_1'' - 1,24N_3'' = -0,96F. \end{cases} \quad (6)$$

Розв'язок системи (6):

$$N_1'' = N_2'' = 0,4F, N_3'' = 1,47F.$$

Числові значення стискальних зусиль в опорах, визначені для двох варіантів навантаження пристрою, наведені в табл. 1. Як і у попередніх випадках, зусилля стиску в нозі 3 буде найбільшим. У табл. 1 наведені також напруження стиску, які виникають в опорах пристрою.

Таблиця 1

Поздовжні сили N та статичні напруження стиску σ в опорах пристрою

№ п/п	Навантаження пристрою	Схема навантаження пристрою		
		Рис. 2	Рис. 3	Рис. 4
1.	$F = 5,0$ кН	$N_1 = N_2 = 2,15$ кН, $N_3 = 6,2$ кН	$N_1' = N_2' = 2,75$ кН, $N_3' = 5,3$ кН	$N_1' = N_2' = 2$ кН, $N_3' = 7,35$ кН
		$\sigma_1 = \sigma_2 = 5,7$ МПа, $\sigma_3 = 16,5$ МПа	$\sigma_1 = \sigma_2 = 7,3$ МПа, $\sigma_3 = 14,1$ МПа	$\sigma_1 = \sigma_2 = 5,3$ МПа, $\sigma_3 = 19,6$ МПа
2.	$F = 8,0$ кН	$N_1 = N_2 = 3,44$ кН, $N_3 = 9,92$ кН	$N_1' = N_2' = 4,4$ кН, $N_3' = 8,48$ кН	$N_1' = N_2' = 3,2$ кН, $N_3' = 11,76$ кН
		$\sigma_1 = \sigma_2 = 9,2$ МПа, $\sigma_3 = 26,5$ МПа	$\sigma_1 = \sigma_2 = 11,7$ МПа, $\sigma_3 = 22,6$ МПа	$\sigma_1 = \sigma_2 = 8,5$ МПа, $\sigma_3 = 31,4$ МПа

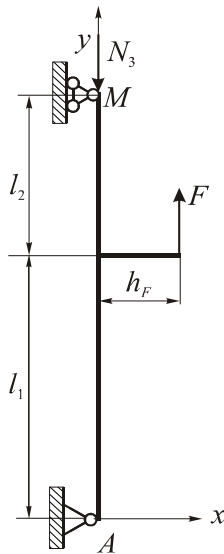


Рис. 5. Розрахункова схема стержня – ноги 3 пристрою

Для обох випадків навантаження та трьох способів розміщення нижніх кінців опор рятувального пристрою значення напружень стиску є значно меншими, ніж допустимі для сталі напруження $[\sigma] = 160$ МПа. Умови міцності на стиск у разі статичного навантаження рятувального пристрою виконуються.

Ноги-опори пристроїв (рис. 1, рис. 2), на яких закріплені лебідки, перебувають в умовах поздовжньо-поперечного згину. Для оцінки міцності такої опори приймемо розрахункову схему у вигляді шарнірно закріпленої балки (рис. 5). На балку водночас діє стискальна сила N_3 та момент

$$M = F \cdot h_F,$$

який утворюється силою натягу каната F на плечі h_F (відстані від каната до центра перерізу ноги).

При складанні диференціального рівняння пружної лінії балки згинальний момент у її поперечних перерізах буде сумою зовнішнього моменту M та моменту від поздовжньої сили N_3 . Оскільки прогини балки вважаємо малими, то момент M не залежить від x та від поздовжньої сили N_3 . Тоді рівняння пружної лінії балки, згідно з [8], має вигляд:

$$EI_z \frac{d^2x}{dy^2} = -N_3 \cdot x + M_{зр}, \quad (7)$$

де

$$M_{зр} = R_A \cdot y = \frac{F \cdot h_F}{l_1 + l_2} y = \frac{M}{l} y.$$

З урахуванням цього, рівняння (7) запишемо так:

$$EI_z \frac{d^2 x}{dy^2} + N_3 \cdot x = \frac{M}{l} y$$

або

$$\frac{d^2 x}{dy^2} + \frac{N_3}{EI_z} \cdot x = \frac{M}{EI_z l} y. \quad (8)$$

Уведемо позначення

$$k^2 = \frac{N_3}{EI_z}; \quad A = \frac{M}{EI_z l},$$

з урахуванням яких у (8), отримаємо

$$\frac{d^2 x}{dy^2} + k^2 \cdot x = A \cdot y \quad (9)$$

Рівняння (9) є неоднорідним диференціальним рівнянням другого порядку, розв'язок якого шукаємо у вигляді суми розв'язків

$$x = x_1 + x_2 \quad (10)$$

де x_1 – розв'язок однорідного диференціального рівняння, x_2 - частковий розв'язок неоднорідного диференціального рівняння.

Розв'язок однорідного диференціального рівняння має вигляд

$$x_1 = C_1 \sin ky + C_2 \cos ky. \quad (11)$$

Частковий розв'язок неоднорідного рівняння приймаємо таким

$$x_2 = ay + b, \quad (12)$$

де a та b – сталі величини, які дорівнюють

$$a = \frac{A}{k^2}; \quad b = 0. \quad (13)$$

З урахуванням (11)-(13) розв'язок (10) набуде вигляду

$$x = C_1 \sin ky + C_2 \cos ky + \frac{A}{k^2} y \quad (14)$$

Сталі інтегрування C_1 та C_2 визначаємо з граничних умов: при $x=0$; $y=0$, при $x=0$; $y=l$.

Після підстановки граничних умов у вираз (14) маємо:

$$C_2 = 0; \quad C_1 = \frac{Al}{k^2 \sin kl}.$$

З урахуванням введених позначень загальний розв'язок диференціального рівняння (8) запишемо у вигляді:

$$x = -\frac{M \sin ky}{EI_z k^2 \sin kl} + \frac{M}{EI_z k^2} y. \quad (15)$$

Згинальний момент у перерізах балки:

$$M_{зг} = EI_z \frac{d^2 x}{dy^2} = M \frac{\sin ky}{\sin kl} \quad (16)$$

Максимальне значення згинального моменту (при $y=l_2$):

$$M_{зг\max} = M \frac{\sin kl_2}{\sin kl}, \quad (17)$$

де

$$k = \sqrt{\frac{N_3}{EI_z}}.$$

Максимальні напруження у разі поздовжньо– поперечного згину знайдемо за формулою

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\text{зг max}}}{W}.$$

Результати обчислень $M_{\text{зг max}}$ та σ_{\max} наведені в табл. 2.

Таблиця 2.

Максимальні згинальні моменти $M_{\text{зг max}}$ та статичні напруження $\sigma_{\max}^{\text{ст}}$ при поздовжньо-поперечному згині у носі 3 пристрою

Зовнішня сила	Поздовжня сила	Коефіцієнт $k, \frac{1}{\text{м}}$	Зовнішній момент $M, \text{Нм}$	Максимальний згинальний момент $M_{\text{зг max}}, \text{Нм}$	Максимальне напруження $\sigma_{\max}^{\text{ст}}, \text{МПа}$
$F = 5 \text{ кН}$	$N_3 = 6,2 \text{ кН}$	0,578	800	613,6	139
	$N'_3 = 5,3 \text{ кН}$	0,535	800	575	130
	$N''_3 = 7,35 \text{ кН}$	0,6029	800	669,8	152
$F = 8 \text{ кН}$	$N_3 = 9,92 \text{ кН}$	0,732	1280	1336	303
	$N'_3 = 8,48 \text{ кН}$	0,676	1280	1175	266
	$N''_3 = 11,76 \text{ кН}$	0,796	1280	1610	365

Висновки

1. В опорі пристрою, на якій закріплена лебідка, під час поздовжньо-поперечного згину при навантаженні зовнішньою силою 8,0 кН, у небезпечному поперечному перерізі виникають статичні напруження, які перевищують допустимі для сталі напруження $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$. У цьому разі умова статичної міцності для опори 3 не виконується.

2. Під час навантаження пристрою силою 5000Н у разі розміщення двох опор рятувального пристрою на підвищенні висотою 20 см розрахункові напруження в опорі 3 становлять 152 МПа, тобто дуже наближені до допустимого напруження. Тому такий випадок потрібно перевірити на динамічну міцність. Оскільки при підніманні вантажу опори працюють в умовах динамічних навантажень, то необхідно для більш точного розрахунку виконати динамічне дослідження конструкції рятувального пристрою.

Список літератури:

1. http://promalp.bigwall.ru/catalog/detail.php?SECTION_ID=370&ELEMENT_ID=3684.
2. <http://vostok.ru/catalogue/7054/81421/>.
3. <http://shop.krok.biz.ua/trenoga-spasatel'naya-krok-1-vertikal'naya>.
4. <http://pogoboronprom.ru/produkcija/trenogi.html>.
5. <http://cnkt.en.ningbo-export.com/jesus/productshow/detail/cnck>.
6. http://zaxid.net/home/showSingleNews.do?u_lvovi_skonstruyuvati_noviy_ryat.
7. **Ольховий І.М.** Дослідження міцності елементів рятувального пристрою «Триніг» / Ольховий І.М., Боднар Г.Й., Воробець Б.С., Лащ В.А. // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Львів: ЛППБ, 2009. №15. – С.118-124.
8. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: Наука. 1979. – 560 с.

И.М.Ольховый, Л.Ф.Дзюба, О.В.Меньшикова, А.М.Гузаревиц

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ОПОР СПАСАТЕЛЬНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ПРИ ИХ РАЗМЕЩЕНИИ НА РАЗНЫХ УРОВНЯХ

Исследована прочность опор спасательного приспособления в случае его установки не в горизонтальной плоскости. Определены продольные усилия сжатия в опорах приспособления для трёх случаев его установки. При этом наиболее нагружена опора, на которой размещена лебёдка, смоделирована шарнирно-опёртой балкой, которая работает в условиях продольно-поперечного изгиба. Определены напряжения и произведена оценка прочности опор для трёх случаев установки приспособления и двух значений внешней нагрузки.

Ключевые слова: прочность, балка, продольно-поперечный изгиб

I.M. Olkhovy, L.F. Dzyuba, O.V. Menshykova, O.M. Guzarevych

ASSESSMENT OF THE STRENGTH OF RESCUE DEVICE'S SUPPORTS IN CASE OF THEIR LOCATION AT DIFFERENT LEVELS

The article studies the strength of rescue device's supports in case the device is set not in horizontal plane. Longitudinal compressive forces in the resistance device for three cases of its accommodation are defined. The most loaded bearing (support), on which the winch is fixed, is simulated by hinged-around beam, which runs in a longitudinal-transverse bending. We also calculated tension and made the estimation of the strength of supports for three cases of device's location and two values of external load.

Key words: power capacity, beam, longitudinal-transverse bending

