

*Л.А. Кавецький, О.В. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, доцент,
Л.Ф. Дзюба, канд. техн. наук, доцент
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ РЯТУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ З ПОТЕРПІЛИМ ПО ПОХИЛІЙ ПЕРЕПРАВІ

Визначені параметри руху рятувального пристрою під час рятування людей з багатоповерхових будівель способом «спуск по похилій переправі». Рух рятувального пристрою з потерпілим по похилій переправі описаний диференціальними рівняннями у натуральних координатах. Опорна мотузка змодельована ланцюговою лінією. Побудовано графіки зміни: нормального прискорення під час руху рятувального пристрою по похилій переправі; реакції вздовж траєкторії руху рятувального пристрою та сили натягу страхувальної мотузки.

Ключові слова: рятувальна мотузка, похила переправа, диференціальні рівняння руху, радіус кривизни траєкторії, прискорення, сила натягу.

Вступ. Одним зі способів рятування людей під час пожежі у багатоповерхових будинках є їхній спуск по похилій переправі, організований рятувальниками. Такий спосіб використовують у разі необхідності евакуації значної кількості потерпілих, а також, коли використання пожежних автодрабин чи колінчастих підймачів з певних причин є неможливим.



Рис. 1. Спуск потерпілого по похилій переправі

Практичне застосування цього способу рятування було успішно продемонстровано на міжнародних навчаннях українських та польських рятувальників до «Євро-2012», які проходили 3 листопада 2011 року у м. Львові [1]. За легендою навчань унаслідок умовної пожежі на сьомому поверсі готельного комплексу «Власта» шляхи самостійної евакуації були заповнені димом. Тому проживаючі та обслуговуючий персонал готелю опинились у небезпеці. Перед рятувальниками, що прибули на виклик, було поставлено завдання: провести рятування людей з восьмого поверху з одночасним розгортанням сил і засобів для гасіння пожежі. Чотири рятувальники з балкона восьмого поверху натягнули здвоєну рятувальну мотузку за допомогою рятувального автомобіля марки АПД-4 (2705) 63Б. По змонтованій рятувальній системі здійснено спуск однієї умовно важко травмованої особи у рятувальних ношах і трьох осіб у рятувальному трикутнику «косинка» (рис. 1). Сумарний час рятувальної операції не перевищив дев'ять хвилин.

Постановка проблеми. Основними складниками рятувальної системи «похила переправа» є: натягнута під певним кутом між двома місцями кріплення опорна рятувальна мотузка, по якій рухається рятувальний пристрій, та страхувальна мотузка, яка забезпечує сталу швидкість руху цього пристрою. Кути нахилу мотузок залежать від висоти поверху, з якого відбувається рятування, та відстані від будинку до місця встановлення автомобіля, за допомогою якого натягують опорну мотузку.

Залежно від утворених кутів нахилу та швидкості руху силове навантаження мотузок має бути таким, щоб під час спуску потерпілого не відбувся обрив однієї з них.

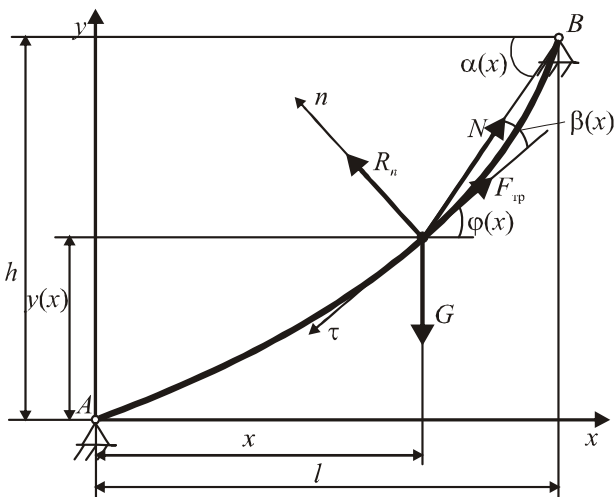
Мета роботи. Для безпечного рятування людей способом «спуск по похилій переправі» необхідно визначити параметри руху та сили, що діють на мотузки.

Виклад основного матеріалу. Згідно з [2], опорна рятувальна мотузка у положенні рівноваги під дією власної ваги набуває форми ланцюгової лінії, яка описується рівнянням

$$y(x) = C_1 ch \frac{x+C_2}{C_1} + C_3, \quad (1)$$

де C_1, C_2, C_3 - коефіцієнти рівняння ланцюгової лінії.

З певним наближенням можна вважати, що переміщення рятувального пристрою теж відбувається вздовж ланцюгової лінії. Розглянемо це переміщення як рух матеріальної точки по криволінійній траєкторії. Матеріальна точка (рис. 2) перебуває під дією: $G = m \cdot g$ - сили ваги потерпілого, спрямованої вертикально вниз, де m - маса потерпілого, g - прискорення сили земного тяжіння; N - сили натягу страхувальної мотузки, спрямованої до горизонту під кутом α , для якого $tg\alpha(x) = \frac{h-y(x)}{l-x}$, де h - відстань по вертикалі до точки закріплення опорної мотузки, l - відстань по горизонталі між точками закріплення кінців опорної мотузки, $x, y(x)$ - координати матеріальної точки на опорній мотузці; R_n - реакція з боку опорної мотузки, спрямована по нормалі до ланцюгової лінії; $F_{тр} = f \cdot R_n$ - сила тертя між сталевим карабіном і опорною рятувальною мотузкою, спрямована по дотичній до ланцюгової лінії у бік, протилежний рухові, f - коефіцієнт тертя між сталевим карабіном і мотузкою.



Диференціальні рівняння руху матеріальної точки у системі натуральних координат n, τ мають вигляд:

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = -F_{тр} - N \cos \beta(x) + G \sin \varphi(x); \\ m \frac{v^2}{\rho(x)} = R_n - G \cos \varphi(x) + N \sin \beta(x), \end{cases} \quad (2)$$

де $\varphi(x)$ - кут між горизонталлю і дотичною τ до ланцюгової лінії; $\beta(x)$ - кут між дотичною τ до ланцюгової лінії і страхувальною мотузкою ($\beta(x) = \alpha(x) - \varphi(x)$, див. рис. 2); ρ - радіус кривизни ланцюгової лінії у даній точці траєкторії.

Рис. 2. Розрахункова схема спуску потерпілого по навскісно натягнутій мотузці

Обчислений за диференціальним рівнянням кривизни кривої [3], радіус кривизни ланцюгової лінії дорівнює:

$$\rho(x) = C_1 \cdot ch \varphi(x). \quad (3)$$

Оскільки $\varphi(x)$ - кут між дотичною до ланцюгової лінії та віссю абсцис, то $tg\varphi(x) = \frac{dy(x)}{dx}$, або з урахуванням (1):

$$\varphi(x) = arctg \left(sh \frac{x+C_2}{C_1} \right).$$

Страховальна мотузка забезпечує майже сталу швидкість руху потерпілого. Тому, для подальших розрахунків приймаємо $v = const$. З урахуванням цього та залежностей для сил G і $F_{тр}$, система диференціальних рівнянь (1) набуде вигляду:

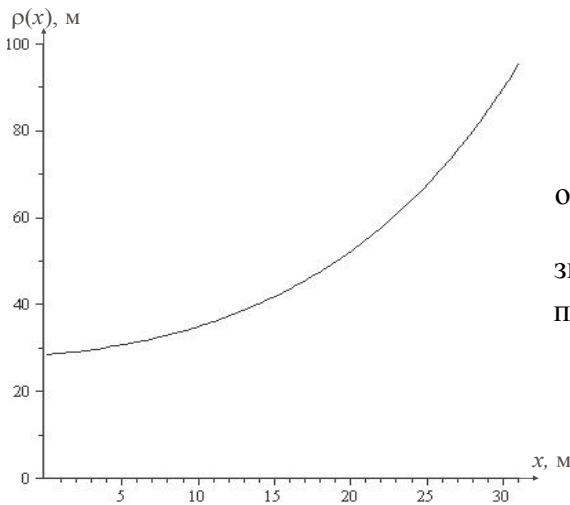
$$\begin{cases} 0 = -fR_n - N \cos \beta(x) + mg \sin \varphi(x); \\ m \frac{v^2}{\rho(x)} = R_n - mg \cos \varphi(x) + N \sin \beta(x). \end{cases} \quad (4)$$

З системи рівнянь (4) визначаємо невідомі сили R_n та N :

$$R_n(x) = \frac{m \frac{v^2}{\rho(x)} + mg \cdot (\cos \varphi(x) - \operatorname{tg} \beta(x) \cdot \sin \varphi(x))}{1 - f \cdot \operatorname{tg} \beta(x)}, \quad (5)$$

$$N(x) = \frac{mg \sin \varphi(x) - fR_n(x)}{\cos \beta(x)}. \quad (6)$$

Подальші обчислення проведено за таких параметрів рятувальної системи: $h = 25$ м; $l = 32$ м; $m = 70$ кг; навскісно натягнута мотузка типу «шнур плетений поліамідний» з діаметром $d = 12$ мм завдовжки $L = 42$ м. Рівняння ланцюгової лінії



$$y(x) = 28,166 ch \frac{x+3,314}{28,166} - 28,361.$$

Графік зміни радіуса кривини траєкторії $\rho(x)$, обчислений відповідно до (3), показаний на рис. 3.

За сталої швидкості руху при відомих значеннях $\rho(x)$ нормальне прискорення пристрою з потерпілим дорівнює:

$$a_n = \frac{v^2}{\rho(x)}.$$

Графіки зміни нормального прискорення при двох сталих швидкостях руху показані на рис. 4.

Рис. 3. Графік зміни радіуса кривини траєкторії

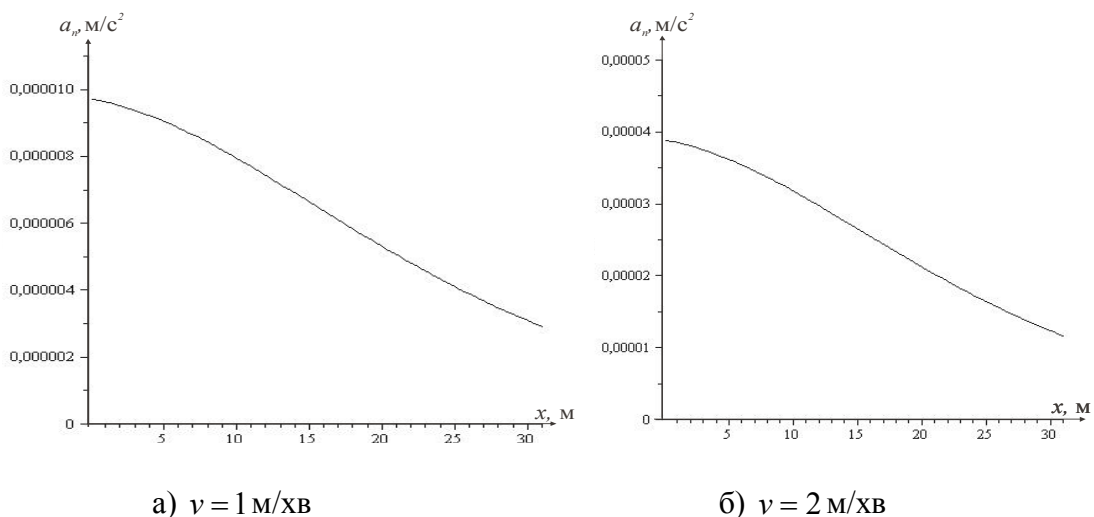


Рис. 4. Графік зміни нормального прискорення під час руху рятувального пристрою по похилій переправі

Як видно з рис. 3, радіус кривини траєкторії руху потерпілого по навскіс натягнутій переправі змінюється істотно. Однак унаслідок невеликої швидкості руху, нормальне прискорення (рис. 4) хоч і змінюється у певних межах, проте значення його невеликі. Найбільшого значення прискорення набуває біля нижньої опори.

Графіки зміни реакції $R_n(x)$ та сили натягу $N(x)$ страхувальної мотузки відповідно до залежностей (5) та (6) показані на рис. 5 та рис. 6.

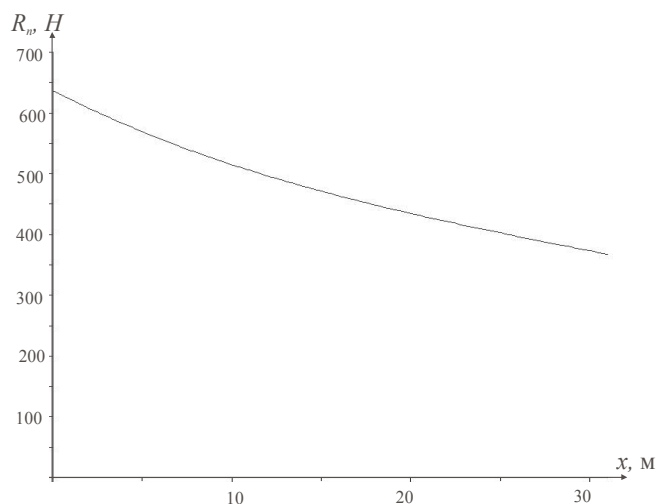


Рис. 5. Графік зміни реакції R_n опорної мотузки

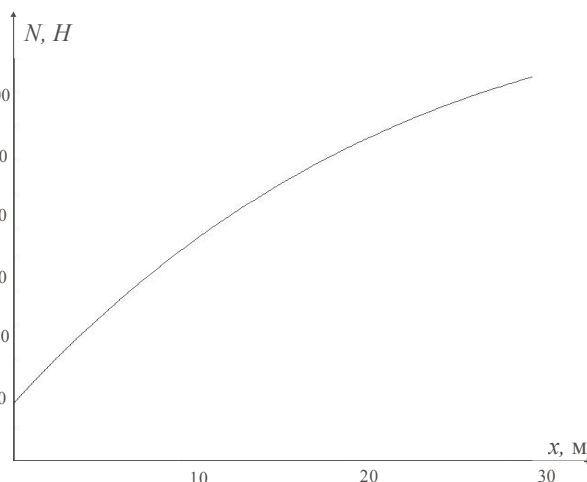


Рис. 6. Графік зміни сили натягу N страхувальної мотузки

З наведених графіків видно, що реакція R_n опорної мотузки досягає найбільшого значення біля нижньої опори, де сила натягу N страхувальної мотузки набуває найменшого значення. Зі збільшенням маси рятувального пристрою у два рази, сили R_n та N збільшуються так само, однак характер їхнього розподілу вздовж довжини прогону похилої переправи залишається незмінним.

Збільшення швидкості руху вздовж опорної мотузки вдвічі призводить до зростання нормального прискорення відповідно до (3) у чотири рази. Однак, таке збільшення прискорення істотно не впливає на зміну силового навантаження опорної та страхувальної мотузок.

Висновки:

На підставі рівняння ланцюгової лінії, форму якої набуває рятувальна мотузка, та диференціальних рівнянь руху матеріальної точки по криволінійній траєкторії досліджено рух рятувального пристрою з потерпілим по похилій переправі. У результаті досліджень встановлено:

1. Нормальне прискорення за двох швидкостей руху ($v = 1 \text{ М/ХВ}$, $v = 2 \text{ М/ХВ}$) набуває значень у межах $(2 \cdot 10^{-6} \dots 4 \cdot 10^{-5}) \text{ М/с}^2$. Зростання нормального прискорення відбувається по мірі наближення до нижньої опори. Зі збільшенням швидкості руху вдвічі, прискорення зростає у чотири рази, однак його значення залишаються достатньо малими та не впливають істотно на силове навантаження мотузок. Тому швидкість руху по похилій переправі можна збільшити.

2. Визначено значення динамічної реакції опорної мотузки та сили натягу страхувальної мотузки та побудовано графіки розподілу цих сил вздовж траєкторії руху рятувального пристрою. Сила натягу страхувальної мотузки при забезпеченні сталої швидкості руху рятувального пристрою з потерпілим змінюється в межах від 600 Н до 100 Н при масі потерпілого 70 кг. Значення цієї сили перебувають у межах, які є істотно меншими від розривного зу-

силля мотузки – 3500 Н. Якщо вважати за прийнятої розрахункової моделі, що у страхувальній мотузці створюється стала сила натягу, яку може забезпечити мускульна сила рятувальника (від 150 Н до 300 Н), тоді швидкість руху рятувального пристрою з потерпілим буде змінюватись не тільки за напрямом, але і за величиною.

3. Відома величина динамічної реакції опорної мотузки дасть змогу визначити силу натягу цієї мотузки при подальших дослідженнях.

Література:

1. http://www.ubgd.lviv.ua/index.php?id=56&tx_ttnews%5BpS%5D=1320428065&tx_ttnews%5Btt_news%5D=818&tx_ttnews%5BbackPid%5D=56&cHash=1c1a17a4aa.

2. Петренко А. М. Моделювання форми кривої, що набуває рятувальна мотузка/ А. М. Петренко, Л. А. Кавецький // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Л., 2012. – №20. – С. 48-53.

3. Дубовик В.П., Юрик І.І. Вища математика: Навч. посібник. – К.: А.С.К., 2001. – 648с.

Л.А. Кавецький, А.В. Меньшикова, Л.Ф. Дзюба

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СПАСАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С ПОСТРАДАВШИМ ПО НАКЛОННОЙ ПЕРЕПРАВЕ

Определены параметры движения спасательного устройства при спасении людей из многоэтажных зданий способом «спуск по наклонной переправе». Движение спасательного устройства с потерпевшим по наклонной переправе описано дифференциальными уравнениями в натуральных координатах. Опорная веревка смоделирована цепной линией. Построены графики изменения: нормального ускорения при движении спасательного устройства по наклонной переправе; реакции вдоль траектории движения спасательного устройства и силы натяжения страховочной веревки.

Ключевые слова: спасательная веревка, наклонная переправа, дифференциальные уравнения движения, радиус кривизны траектории, ускорение, сила натяжения.

L.A. Kavetskyy, O.V. Menshykova, L.F. Dzyuba

RESEARCH OF RESCUE DEVICE MOTION WITH A CASUALTY ON THE INCLINED CROSSING

The parameters of rescue device motion during people rescue from high buildings by means of "descent on inclined crossing" are determined. Motion of rescue device with a casualty on the inclined crossing is described by differential equations in natural coordinates. Supporting rope is modeled by catenary line. Change diagrams are constructed: normal acceleration of rescue device while moving on the inclined crossing; reactions along the trajectory of the rescue device and safety rope tension forces.

Key words: rescue rope, inclined crossing, differential equations of motion, the radius of trajectory curvature, acceleration, tension force.

