

УДК 624.21.033

О. В. ШКВАРСЬКИЙ,

науковий співробітник

(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України, м. Київ)

Розрахунок військового низьководного мосту на горизонтальне навантаження

Проведено дослідження роботи дерев'яної мостової споруди при дії гальмівних навантажень. Під час будівництва військових низьководних мостів та при подальшій їх експлуатації проводились експериментальні дослідження роботи конструкції елементів мосту на дію горизонтальних навантажень. На підтвердження експериментальних досліджень були проведені розрахунки конструктивних систем мосту, що зводились до розрахунків багатоконтурних плоских рам на основі методів будівельної механіки. З'ясовано, що при початковій дії навантаження на одному з прольотів мосту зусилля сприймаються лише двома сусідніми рядами опор мосту. Коли величина горизонтального переміщення становила 4 см і більше, в роботу включалися наступні суміжні ряди опор конструкції мосту.

Ключові слова: водні перешкоди; гальмівне навантаження; епюра згинальних моментів; паля.

Проведены исследования работы деревянных мостовых сооружений при действии тормозных нагрузок. При строительстве военных низьководных мостов и дальнейшей их эксплуатации проводились экспериментальные исследования работы конструкции элементов моста на действии горизонтальных нагрузок. Для подтверждения экспериментальных исследований были проведены расчеты конструктивных систем моста, которые сводились к расчетам многоконтурных плоских рам на основе методов строительной механики. Обнаружено, что при начальном действии нагрузки на одном из пролетов моста нагрузки воспринимаются только двумя соседними рядами опор моста. Когда величина горизонтального перемещения была равна 4 см и больше, в работу включались следующие соседние ряды опор конструкции моста.

Ключевые слова: водные преграды; тормозная нагрузка; эпюра изгибающих моментов; свая.

Проблемам подолання військами водних перешкод приділялась та приділяється значна увага як в нашій країні, так і в провідних країнах світу. Це пов'язано, у першу чергу, з тим, що останніми роками зросла кількість збройних конфліктів у різних регіонах світу. Їх характерною особливістю є руйнування інфраструктури, зокрема стратегічних об'єктів, таких як мости. Тільки за період проведення антитерористичної операції (АТО) на території Донецької та Луганської областей було зруйновано 34 мости (мостові переходи) [1].

Виконання завдань військовими частинами в умовах руйнування стратегічних об'єктів незаконними збройними формуваннями та диверсійно-розвідувальними групами противника потребують якісного інженерного забезпечення. Одним з основних завдань інженерного забезпечення дій військових частин є подолання водних перешкод, що зустрічаються на маршрутах пересування.

Проведений аналіз досвіду інженерного забезпечення в ході проведення АТО на сході країни показує, що існуючі підходи до інженерного забезпечення подолання водних перешкод при пересуванні військ у операціях та при проведенні відновлювальних робіт на пошкоджених мостах призводять до швидкого виведення з ладу штатних механізованих мостових споруд, що не призначені для тривалого стаціонарного використання на водній перешкоді. Їх відновлення потребує значних фінансових ресурсів та часу, посилюючи таким чином проблему невідповідності між наявністю та потребою у відповідних засобах подолання водних перешкод. Тобто постає актуальна наукова проблема пошуку та обґрунтування можливості часткової заміни штатних механізованих мостових споруд при побудові мостових переправ на більш прості та менш вартісні в експлуатації конструкції мостових переходів. Одним з можливих варіантів таких конструкцій є військові низьководні мости. Незважаючи на більш тривалий час для їх встановлення в порівнянні з механізованими засобами, вони мають такі переваги, як простота спорудження, низькі витрати та порівняно висока тривалість експлуатації на водних перешкодах, легкість відновлення при пошкодженнях у ході ведення бойових дій.

Метою даної роботи є розгляд конструкції військового низьководного мосту та аналіз її просторової стійкості за рахунок роботи поздовжніх затяжок при дії горизонтальних навантажень.

Проблематика побудови конструкцій військових низьководних мостів розглянута в роботах М. А. Козлова, Г. А. Кобікова, В. А. Ключарева, А. А. Муратова, Н. А. Нивина, І. Ф. Лисухіна, В. А. Поліщука, І. П. Шаповала та інших вчених [2, 3, 4, 5].

За кордоном застосування військових низьководних мостів в ході ведення бойових дій не розглядається. Командування НАТО вважає достатньою наявну кількість штатних механізованих засобів подолання водних перешкод для успішного виконання завдань [6] та не планує їх застосування в ситуаціях, що не передбачені їх призначенням (зокрема, для довготривалої заміни стаціонарних мостових споруд) [7].

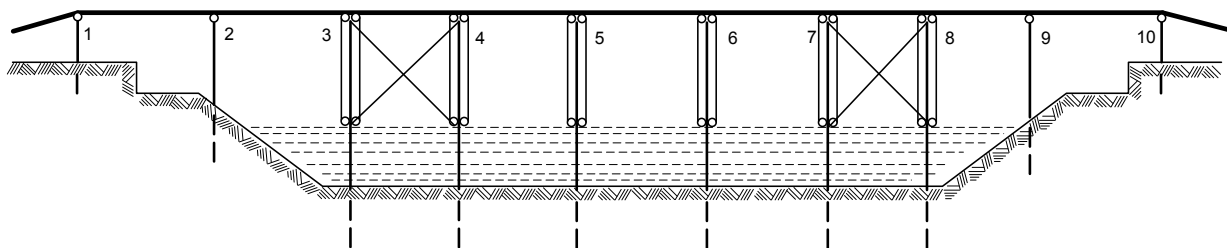


Рис. 1

Для розгляду стійкості військових низьководних мостів (рис. 1) при дії гальмівних навантажень необхідно задати вихідні дані. У даній роботі з метою проведення математичних розрахунків були використані такі вихідні дані:

розрахункова довжина стійок (див. рис. 1): $L_1=0,45$ м; $L_2=2,0$ м; $L_3=3,75$ м; $L_4=4,1$ м; $L_5=4,1$ м; $L_6=4,1$ м; $L_7=3,95$ м; $L_8=3,8$ м; $L_9=3,3$ м; $L_{10}=0,6$ м;

гальмівне навантаження $T = 0,4\theta$, $\theta = 36$ т; $T = 0,4 \times 36 = 14,4$ т;

діаметр паль (стійок) – 20 см, $J_x = 7854$ см⁴;

переріз затяжок прямокутний 50×200 ,

$$J_x = \frac{20 \cdot 5^3}{12} = 208,3 \text{ см}^4;$$

модуль повздовжньої пружності $E = 10000$ кг/см².

Розрахунок складної конструктивної схеми мосту, зображеної на рис. 1, зводиться до розрахунків плоскої рами на основі методів будівельної механіки [8, 9, 10, 11]. Враховуючи, що у вузлах немінучі проміжки і при спільній роботі цілого ряду паль навантаження розподіляється пропорційно жорсткості, прийнята така послідовність розрахунку:

1. Визначаються внутрішні силові фактори в усіх елементах прольоту, що мають поздовжні затяжки (прогін обмежений стійками 3–4 або 7–8).

2. Визначається горизонтальне переміщення $\Delta_{гор}$ рами на рівні проїзної частини.

3. Якщо $\Delta_{гор} > 4$ см, то розраховується рама, яка складається з чотирьох стійок: 2, 3, 4, 5 або 6, 7, 8, 9 (див. рис. 1).

За попередніми експериментальними даними виявлено, що при гальмуванні танка на мосту існують проміжки між прольотами, що дорівнюють приблизно 4 см. Ці проміжки з'являються через неточність побудови і збирання мостової споруди, а також пом'якшення стикових з'єднань після руху по мосту. Інакше кажучи, горизонтальну динаміку мосту можна описати таким чином: при гальмуванні танка на одному з прольотів мосту все горизонтальне навантаження сприймається двома опорами цього прольоту, потім, після переміщення прольоту на 4 см, навантаження передається на сусідні з обох боків дві опори. Після переміщення конструкції мосту вже з чотирьох опор знову на 4 см в роботу включаються ще дві сусідні опори і так далі.

1. Так як пальовий ряд (опора) містить по 4 палі, то для визначення внутрішніх силових факторів у всіх елементах прольоту, що мають поздовжні зв'язки, розраховуємо діючу на плоску раму горизонтальну силу, що виникає від гальмівного навантаження:

$$T_1 = \frac{1}{4} T = \frac{14,4}{4} = 3,6 \text{ т.}$$

Ступінь статичної невизначеності (рис. 2)

$$C = 3K - III = 3 \cdot 2 - 2 = 4.$$

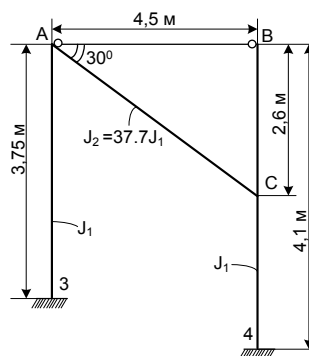


Рис. 2

Рама чотири рази статично невизначена.

Розрахунок проводимо методом сил. Вибираємо основну систему, відкидаючи зайві затяжки (рис. 3).

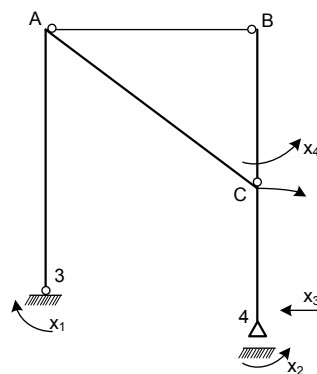


Рис. 3

Будуємо епюри згинальних моментів M_p (рис. 4, f) і від одиничних невідомих (рис. 4, a–d)

Складемо рівняння, що виражають умову рівності нулю переміщення за напрямком обраних невідомих x , отримаємо систему канонічних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} x_1 \delta_{11} + x_2 \delta_{12} + x_3 \delta_{13} + x_4 \delta_{14} + \Delta 1 p &= 0 \\ x_1 \delta_{21} + x_2 \delta_{22} + x_3 \delta_{23} + x_4 \delta_{24} + \Delta 2 p &= 0 \\ x_1 \delta_{31} + x_2 \delta_{32} + x_3 \delta_{33} + x_4 \delta_{34} + \Delta 3 p &= 0 \\ x_1 \delta_{41} + x_2 \delta_{42} + x_3 \delta_{43} + x_4 \delta_{44} + \Delta 4 p &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

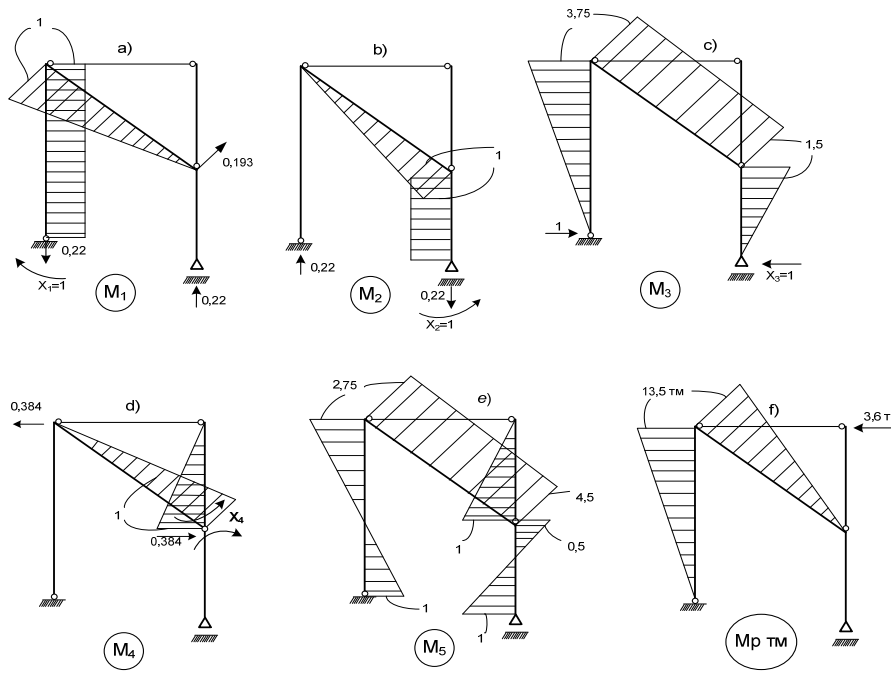


Рис. 4

Визначаємо одиничні переміщення

$$\delta_{ii} = \sum_n \int_0^s M_i^2 \frac{ds}{EJ}, \quad \delta_{ik} = \delta_{ki} = \sum_0^s M_i M_k \frac{ds}{EJ}$$

Визначаємо вантажні члени

$$\Delta = \sum_n \int_0^s M_i M_p \frac{ds}{EJ}$$

Побудувавши сумарну одиничну епюру M_s , обчислюємо сумарні переміщення

$$\Delta_{is} = \sum \int \frac{M_i M_s}{EJ_1} dx = \sum \delta_{ii} + \delta_{i1} + \delta_{i2} + \delta_{i3} + \delta_{i4}$$

Підставляємо розраховані коефіцієнти і вільні члени в систему канонічних рівнянь, отримуємо

$$\left. \begin{aligned} 3,796x_1 + 0,0229x_2 - 7,238x_3 - 0,0229x_4 - 25,934 &= 0 \\ 0,0229x_1 + 1,546x_2 - 1,28x_3 - 0,0459x_4 - 0,310 &= 0 \\ -7,238x_1 - 1,28x_2 + 19,676x_3 + 0,155x_4 + 66,115 &= 0 \\ -0,0229x_1 - 0,0459x_2 + 0,155x_3 + 0,8792x_4 + 0,310 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Систему рівнянь розв'язуємо за допомогою алгоритму Гауса.

Будуємо дійсну епюру згинальних моментів (рис. 5, e), використовуючи формулу

$$M_g = Mp + M_1x_1 + M_2x_2 + M_3x_3 + M_4x_4$$

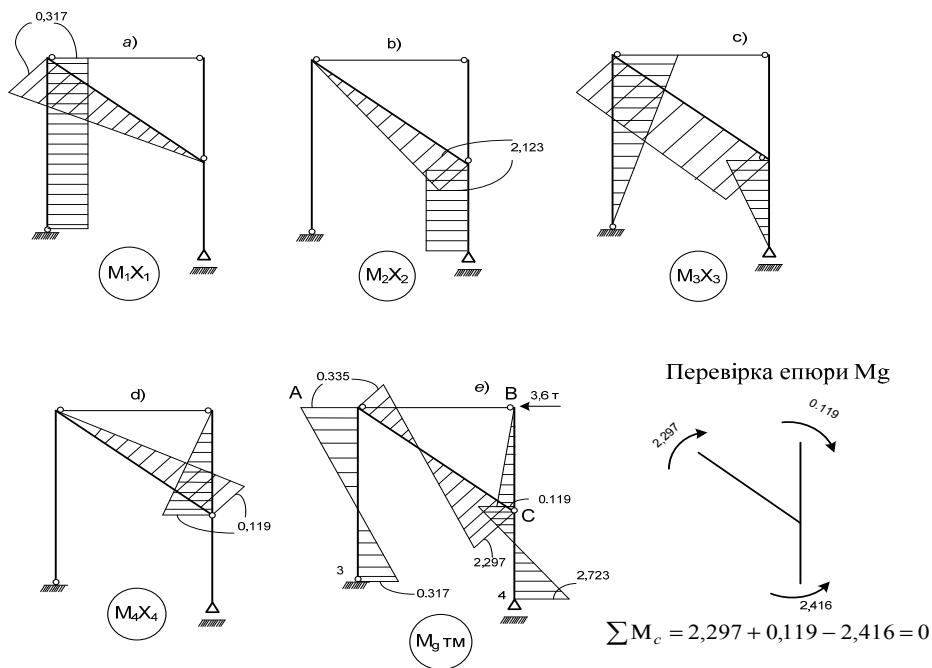


Рис. 5

2. Визначаємо горизонтальне переміщення рами. Вибираємо основну систему і прикладаємо $\bar{x} = 1$ (рис. 6)

$$\Delta_{гор} = \frac{l}{6EJ} [\bar{M}_1 \times Mg_3 + 4\bar{M}_1_{cp} \times Mg_{cp} + \bar{M}g_A \times Mg_A].$$

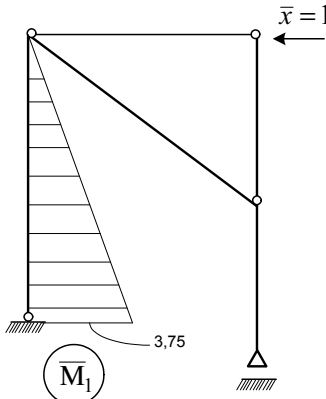


Рис. 6

3. Так як $\Delta_{гор} > 4$ см, то розраховуємо раму, яка складається з чотирьох стійок: 2, 3, 4, 5.

Для того щоб виявити залежність між перерізом поздовжніх затяжок і деформаціями мосту, прийmemo жорсткість затяжок, що дорівнює жорсткості стійок:

$$EJ_1 = EJ_2.$$

Повторюємо розрахунок за раніше обраною основною системою (рис. 3).

Визначаємо одиничні переміщення

$$\delta_{ii} = \sum_n \int_0^s M_i^2 \frac{ds}{EJ_x}, \quad \delta_{ik} = \delta_{ki} = \sum_n \int_0^s M_i M_k \frac{ds}{EJ_x}.$$

Визначаємо вантажні члени

$$\Delta = \sum_n \int_0^s M_i M_p \frac{ds}{EJ_x}.$$

Побудувавши сумарну одиничну епюру M_s , розраховуємо сумарні переміщення

$$\Delta_{1s} = \sum \int \frac{M_i M_s}{EJ} dx = \delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{13} + \delta_{14}.$$

Підставляємо розраховані коефіцієнти і вільні члени в систему канонічних рівнянь, отримуємо

$$\left. \begin{aligned} 3,796x_1 + 0,0229x_2 - 7,238x_3 - 0,0229x_4 - 25,934 &= 0 \\ 0,0229x_1 + 1,546x_2 - 1,28x_3 - 0,0459x_4 - 0,310 &= 0 \\ -7,238x_1 - 1,28x_2 + 19,676x_3 + 0,155x_4 + 66,115 &= 0 \\ -0,0229x_1 - 0,0459x_2 + 0,155x_3 + 0,8792x_4 + 0,310 &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

Систему рівнянь розв'язуємо за допомогою алгоритму Гауса.

Будуємо дійсну епюру згинальних моментів (рис. 7, e), використовуючи формулу

$$M_g = Mp + M_1x_1 + M_2x_2 + M_3x_3 + M_4x_4.$$

З метою отримання залежності горизонтальних переміщень Δ від величини гальмівного навантаження T_1 визначені коефіцієнти x при $T_1 = 1$ т; 2 т; 3 т; 4 т (табл. 1).

Таблиця 1

Коефіцієнти x	Горизонтальна сила T , т			
	1	2	3	4
x_1	0,26	0,56	0,78	1,04
x_2	-1,4	-2,8	-4,22	-5,7
x_3	-0,83	-1,66	-2,53	-3,38
x_4	-0,993	-1,99	-3,02	-4,02

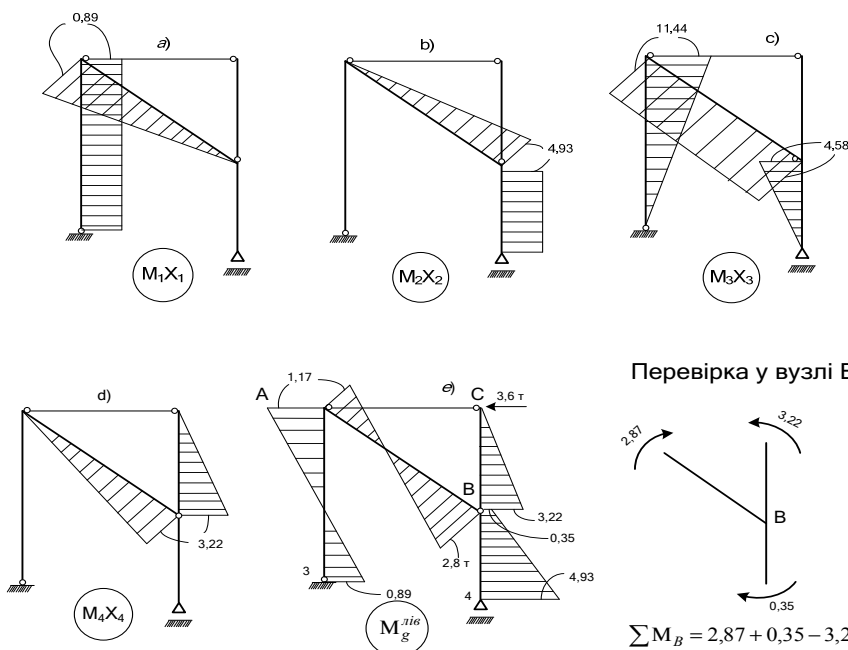


Рис. 7

Використовуючи епюру \bar{M}_1 і епюру M_g з розрахунком певних коефіцієнтів x (табл. 2), визначаємо горизонтальні переміщення за формулою

$$\Delta = \frac{l}{6EJ} [\bar{M}_1 M_{g_3} + 4\bar{M}_{1cp} M_{g_{cp}} + \bar{M}_{g_A} M_{g_A}]$$

Таблиця 2

T, τ	1	2	3	4
$\Delta_{гор}, \text{см}$	3,98	11,7	19,1	26,6

За даними табл. 2 побудовано на рис. 8 графік залежності горизонтальних переміщень від навантаження T_1 .

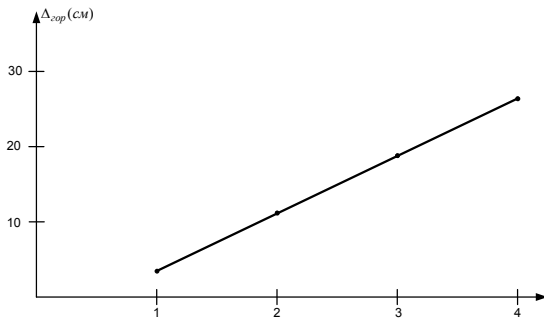


Рис. 8

Ступінь статичної невизначеності (рис. 9) $C = 3K - Ш = 3 \cdot 4 - 6 = 6$. Рама шість разів статично невизначена.

Вибираємо основну систему, відкидаючи зайві заťažки (рис. 10).

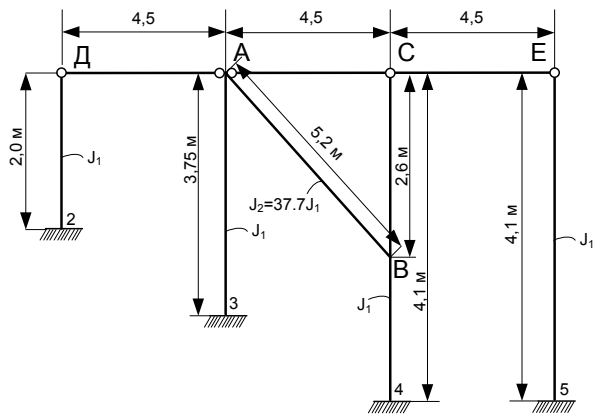


Рис. 9

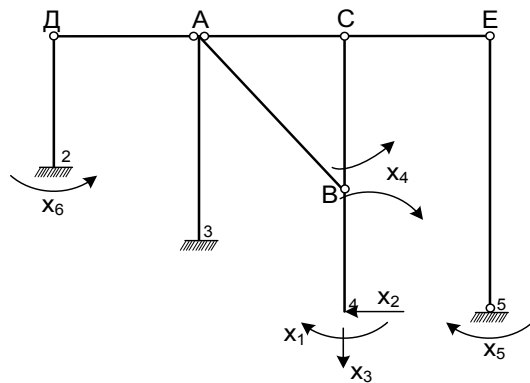


Рис. 10

Будуємо епюри моментів M_p (рис. 11, h) і від одиничних невідомих (рис. 18, a-f).

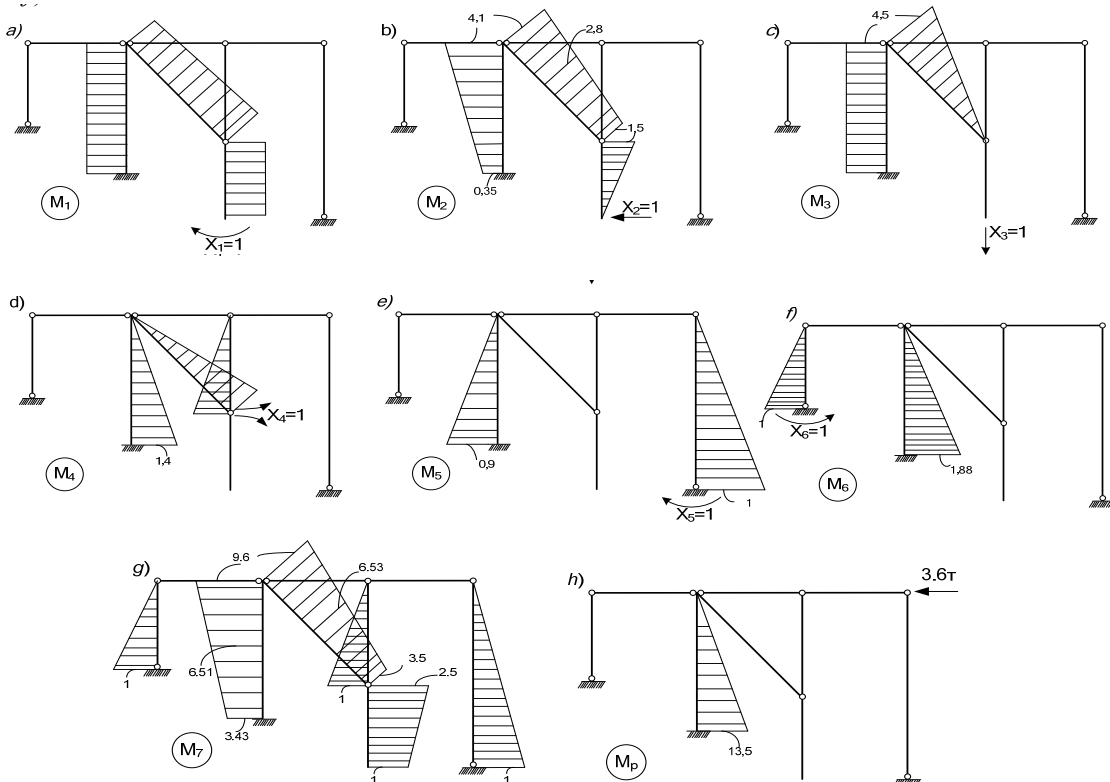


Рис. 11

Складемо рівняння, що виражає умови рівності нулю переміщень по напрямку вибраних невідомих x , отримаємо систему канонічних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} x_1 \delta_{11} + x_2 \delta_{12} + x_3 \delta_{13} + x_4 \delta_{14} + x_5 \delta_{15} + x_6 \delta_{16} + \Delta_{1p} &= 0 \\ x_1 \delta_{21} + x_2 \delta_{22} + x_3 \delta_{23} + x_4 \delta_{24} + x_5 \delta_{25} + x_6 \delta_{26} + \Delta_{2p} &= 0 \\ x_1 \delta_{31} + x_2 \delta_{32} + x_3 \delta_{33} + x_4 \delta_{34} + x_5 \delta_{35} + x_6 \delta_{36} + \Delta_{3p} &= 0 \\ x_1 \delta_{41} + x_2 \delta_{42} + x_3 \delta_{43} + x_4 \delta_{44} + x_5 \delta_{45} + x_6 \delta_{46} + \Delta_{4p} &= 0 \\ x_1 \delta_{51} + x_2 \delta_{52} + x_3 \delta_{53} + x_4 \delta_{54} + x_5 \delta_{55} + x_6 \delta_{56} + \Delta_{5p} &= 0 \\ x_1 \delta_{61} + x_2 \delta_{62} + x_3 \delta_{63} + x_4 \delta_{64} + x_5 \delta_{65} + x_6 \delta_{66} + \Delta_{6p} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Визначаємо одиничні переміщення

$$\delta_{ii} = \sum_n \int_0^s M_i^2 \frac{ds}{EJ}, \quad \delta_{ik} = \delta_{ki} = \sum_n \int_0^s M_i M_k \frac{ds}{EJ}.$$

Визначаємо вантажні члени

$$\Delta = \sum_n \int_0^s M_i M_p \frac{ds}{EJ}.$$

Побудувавши сумарну одиничну епюру M_s , перевіримо вірність визначення коефіцієнтів δ :

$$\Delta_{is} = \sum_n \int_0^s \frac{M_i M_s}{EJ} dx = \sum \delta_{in}.$$

Підставляємо розраховані коефіцієнти і вільні члени в систему канонічних рівнянь, отримуємо

$$\left. \begin{aligned} 5,39x_1 + 9,87x_2 + 17,19x_3 - 2,64x_4 + 1,69x_5 - 3,53x_6 - 25,31 &= 0 \\ 9,87x_1 + 25,23x_2 + 38,55x_3 - 4,16x_4 + 2,7x_5 - 5,64x_6 - 40,5 &= 0 \\ 17,19x_1 + 38,55x_2 + 78,87x_3 - 12,05x_4 + 7,59x_5 - 15,86x_6 - 113,9 &= 0 \\ -2,64x_1 - 4,16x_2 - 12,05x_3 + 3,5x_4 - 1,62x_5 + 3,38x_6 + 24,3 &= 0 \\ 1,69x_1 + 2,7x_2 + 7,59x_3 - 1,62x_4 + 2,38x_5 - 2,12x_6 - 15,19 &= 0 \\ -3,53x_1 - 5,64x_2 - 15,86x_3 + 3,38x_4 - 2,12x_5 + 5,09x_6 + 31,73 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$x_1=3,9; x_2=-4,22; x_3=3,36; x_4=0,98; x_5=0,67; x_6=2,91.$

Будуємо дійсну епюру згинальних моментів за формулою

$$M_g = M_p + M_1x_1 + M_2x_2 + M_3x_3 + M_4x_4 + M_5x_5 + M_6x_6.$$

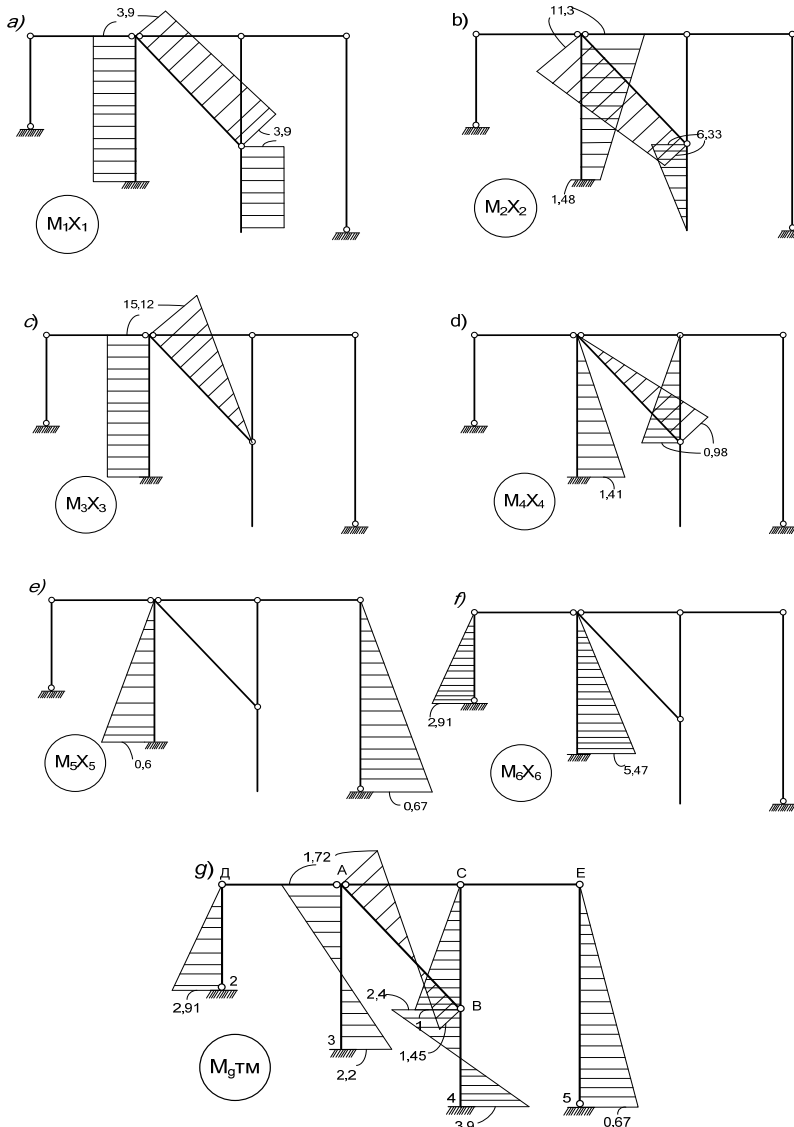


Рис. 12

Горизонтальне переміщення ригеля

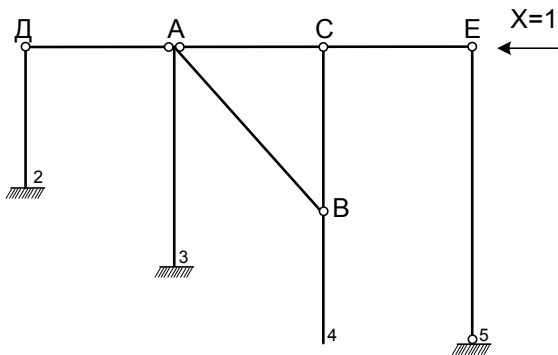


Рис. 13

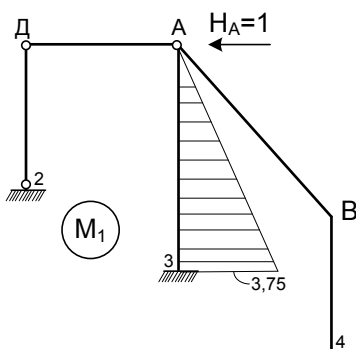
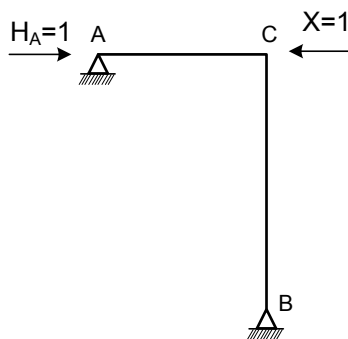
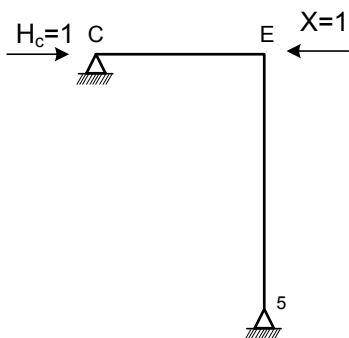


Рис. 14

$$\Delta_{\text{зоп}} = \int \frac{M_1 M_g}{EJ_x} dx$$

Таким чином, загальна горизонтальна жорсткість рами, що має горизонтальні затяжки, може бути визначена так:

$$K_{1\text{зоп}} = \frac{P}{\Delta_1} = \frac{3,6}{23,8} = 0,151 \text{ т/см.}$$

Горизонтальна жорсткість рами з чотирьох стійок

$$K_{2\text{зоп}} = \frac{P}{\Delta_1} = \frac{3,6}{7,3} = 0,49 \text{ т/см.}$$

Враховуючи, що горизонтальна жорсткість рам змінюється лінійно, нескладно розрахувати жорсткість рами, що складається з 6 стійок.

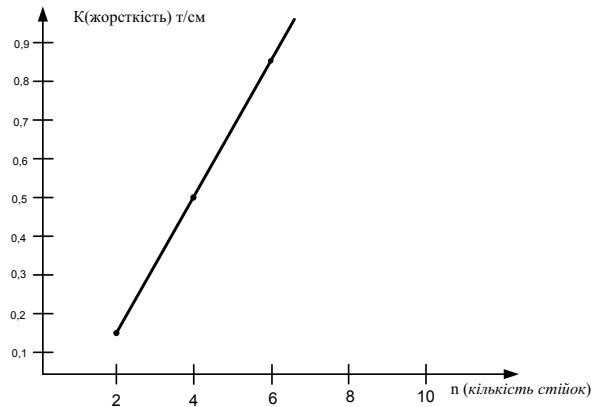


Рис. 15

Визначивши з графіка на рис. 15 $K_{3\text{зоп}}$ горизонтальну жорсткість рами, що складається з шести стійок, за залежністю $K_{\text{зоп}} = \frac{P}{\Delta_3}$, визначаємо горизонтальне переміщення

$$\Delta_3 = \frac{P}{K_{3\text{зоп}}} = \frac{3,6}{0,85} = 4,20 \text{ см.}$$

Виходячи з описаної раніше роботи мосту і використовуючи отримані теоретичні дані, на рис. 16 показані графіки горизонтальних переміщень опор мосту по його довжині.

Висновки:

1. Як показали теоретичні розрахунки, жорсткість поздовжньої затяжки суттєво не впливає на горизонтальні переміщення мосту, хоча її наявність забезпечує загальну просторову стійкість мосту в цілому.
2. Горизонтальні переміщення опор мосту за величиною зменшуються у міру віддалення від прольоту, де здійснюється гальмування танка (див. рис. 16).
3. Закон розподілу величин горизонтальних переміщень опор за своїм характером співпадає з переміщеннями, що спостерігаються при експериментальних дослідженнях.
4. Отримані теоретичні результати розрахунку мосту як плоскої системи співпадають з величинами переміщень, отриманих при експериментальних дослідженнях роботи конструкції мосту при дії горизонтальних навантажень.

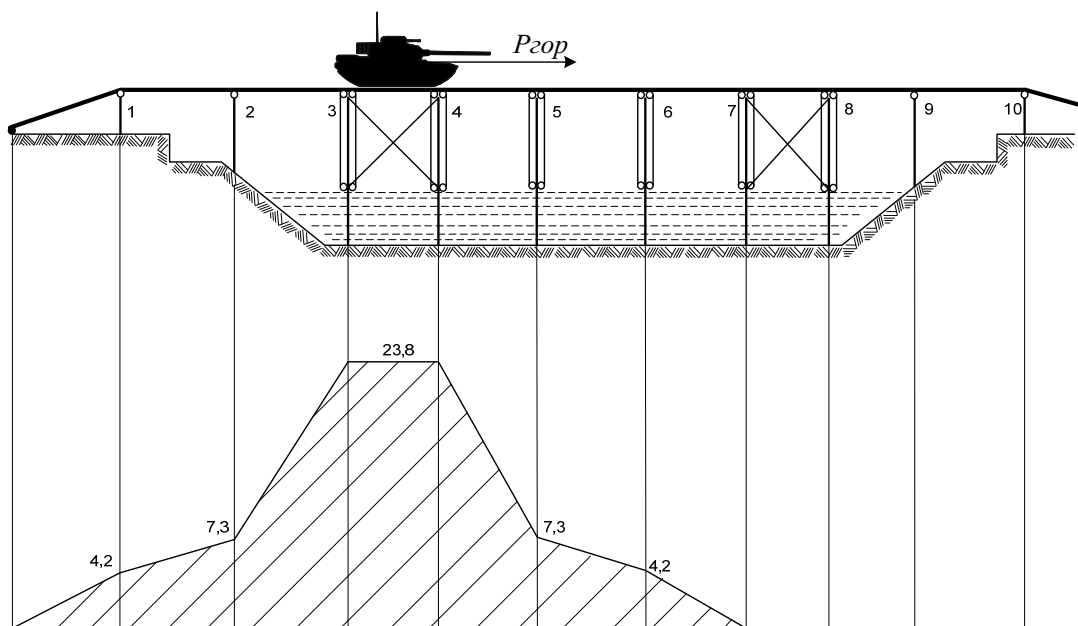


Рис. 16

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лист заступника начальника Об'єднаного оперативного штабу Збройних Сил України № 313/5/2313 від 24.03.2016 щодо кількості зруйнованих постійних мостових споруд та знищених механізованих мостів, які використовуються у Збройних Силах України для забезпечення подолання перешкод, за час проведення антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей [Текст].
2. Военные мосты на жестких опорах [Текст] / М. А. Козлов, В. А. Ключарьов, Г. А. Кобиков [и др.]. – М. : ВИА, 1974. – 65 с.
3. Военные мосты на жестких опорах [Текст] : руководство. – М. : Воениздат, 1982. – 119 с.
4. Колибернов, Е. С. Инженерное обеспечение боя [Текст] / Е. С. Колибернов, В. И. Корнев, А. А. Сосков ; под ред. Е. С. Колибернова. – [2-е изд.]. – М. : Воениздат, 1988. – С. 185–229.
5. Лысухин, И. Ф. Инженерное обеспечение форсирования рек [Текст] / И. Ф. Лысухин. – М. : Воениздат, 1968. – 116 с.
6. Ахметов, Р. Р. Инженерные войска иностранных армий [Текст] / Р. Р. Ахметов. – Омск : СиБАДИ, 2011. – 102 с.
7. Инженерное обеспечение форсирования водных преград // Зарубежное военное обозрение [Электронный ресурс]. – 2014. – № 3. – Режим доступа: <http://www.zvo.su/suh>.
8. Лалетін, Н. В. Основания и фундаменты [Текст] / Н. В. Лалетін. – 2-е изд. – М. : Высш. шк., 1970. – 217 с.
9. Линович, Л. Е. Расчет и конструирование частей гражданских зданий [Текст] / Л. Е. Линович. – К. : Будівельник, 1972. – 664 с.
10. Величкин, А. П. Справочник проектировщика инженерных сооружений [Текст] / А. П. Величкин. – К. : Будівельник, 1973. – 552 с.
11. Дарков, А. В. Строительная механика [Текст] / А. В. Дарков. – М. : Высш. шк., 1976. – 607 с.

Рецензент В. В. Зубарєв, д-р техн. наук, проф.
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України, м. Київ)