

5. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЛУЗІ

УДК 630.37

*Доц. Л.О. Тисовський, канд. техн. наук;
асист. І.М. Рудько – НЛТУ України, м. Львів*

ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ КАНАТІВ ПІДВІСНИХ СИСТЕМ ГНУЧКИМИ НИТКАМИ

Встановлено межі застосування теорії гнучких ниток для розрахунку канатних транспортних систем. Наведено результати числового аналізу конкретних підвісних установок. Розроблено практичні рекомендації для окремих випадків.

Assist. prof. L.O. Tysovskiy; assist. I.M. Rud'ko – NUFWT of Ukraine

Substantiation of the opportunity of modelling ropes of pendant systems flexible strings

It is established borders of application of the theory of flexible strings for calculation ropes transport systems. Results of the numerical analysis of concrete pendant plant are resulted. Practical recommendations are developed for separate cases.

При проектуванні підвісних систем (пасажирських доріг, транспортних вантажних установок, кабельних кранів тощо), в яких як ролі елементи застосовуються сталеві канати, виникає потреба виконання їх розрахунку. Зазвичай несні канати моделюються нитками. Виведенню і обґрунтуванню фундаментальних рівнянь статички, кінематики і динаміки нитки значну увагу приділено у працях [1-3]. При цьому умовно нитки поділяють на дві групи: гнучкі (чинять опір тільки розтягу) і жорсткі (чинять опір розтягу, згину, крученню). Гнучкі нитки, своєю чергою, можуть бути як нерозтяжними (ідеальні нитки), так і розтяжними (змінюють свою довжину під дією прикладених навантажень). Відомо, що ідеальних ниток у дійсності не існує. Однак у багатьох випадках напруження, що виникають в нормальному перерізі нитки від згину і кручення, настільки малі порівняно з напруженнями розтягу, що без істотних втрат точності ними можна знехтувати і вважати нитку абсолютно гнучкою. Для оцінки жорсткості нитки скористаємося співвідношенням [4] між напруженнями згину $\sigma_{зг}$ і напруженнями розтягу σ_p

$$\psi = \frac{\sigma_{зг}}{\sigma_p} \leq 0,05. \quad (1)$$

Якщо умова (1) виконується, то вважається, що система працює як гнучка нитка. Таким чином проводиться умовна межа між гнучкими і жорсткими нитками. Характеристику ψ визначаємо згідно з розробленим методом розрахунку геометричних та силових параметрів несних канатів [5]. Напруження розтягу каната розраховуємо за формулою

$$\sigma_p = \frac{T}{A_{мет}} = \frac{C_1 \cdot q \cdot ch((x - C_2)/C_1)}{A_{мет}}, \quad (2)$$

де: T – натяг каната; $A_{мет}$ – площа поперечного перерізу дротин каната; C_1 , C_2 – коефіцієнти ланцюгової лінії як кривої провисання каната; q – погонна вага каната.

Напруження згину, що виникають в несному елементі, визначаємо за формулою

$$\sigma_{зг} = \frac{M_{зг}}{W_x}, \quad (3)$$

де: $M_{зг}$ – згинальний момент, що виникає у перерізі; W_x – осьовий момент опору.

Враховуючи закон Гука при згині $1/\rho = M_{зг}/(E_k \cdot I_k)$ (ρ – радіус кривизни; $E_k I_k$ – згинальна жорсткість каната) та те, що $I_k/W_x = d_k/2$ (d_k – діаметр каната), отримаємо

$$\sigma_{зг} = \frac{E_k \cdot d_k}{2\rho}. \quad (4)$$

Кривизна ланцюгової лінії

$$1/\rho = C_1^{-1} \cdot ch^{-2}((x - C_2)/C_1). \quad (5)$$

Тоді

$$\sigma_{зг} = \frac{E_k \cdot d_k}{2C_1 \cdot ch^2((x - C_2)/C_1)}. \quad (6)$$

Враховуючи значення виразів (2) і (6), залежність (1) набуде вигляду

$$\psi = \frac{E_k \cdot d_k \cdot A_{мет}}{2q \cdot C_1^2 \cdot ch^3((x - C_2)/C_1)} \leq 0,05. \quad (7)$$

Згідно з дослідженнями проф. М.Г. Адамовського [6], модуль пружності несних канатів ГОСТ 2688, якими рекомендовано оснащувати підвісні установки для транспортування деревини, визначаємо згідно з емпіричною формулою

$$E_k = \left(1,63 + \frac{0,48 T_{ср}}{T_{розр}} \right) \frac{q}{A_{мет}} \cdot 10^6, \quad (8)$$

де $T_{ср}$ і $T_{розр}$ – відповідно середній натяг та розривне зусилля каната.

У рамках запропонованого підходу визначено величини критичних довжини прольоту та дійсного коефіцієнта запасу міцності для ділянок канатів (ГОСТ 2688), завантажених власною вагою, тобто встановлено умови застосування тієї чи іншої теорії їх розрахунку (рис. 1, 2). Розрахунки проведено для таких значень параметрів: характеристики каната – ГОСТ 2688, діаметр $d_k = 3,6 \dots 28$ мм, погонна вага $q = 0,47873 \dots 28,54710$ Н/м, сумарне розривне зусилля дротин $T_{розр} = 8780 \dots 525000$ Н (маркувальна група 1670 МПа); характеристики схеми навішування – ухил хорди прольоту до горизонту $\alpha = 20^\circ$, стріла провисання несного елемента $f_{\max} = 1/20 \ell$ (ℓ – довжина прольоту). При цьому критичними вважаються довжина прольоту $\ell_{кр}$ та запас міцності каната $n_{кр}$, при яких згинальні напруження несного елемента становлять 5 % напружень розтягу ($\psi = 0,05$).

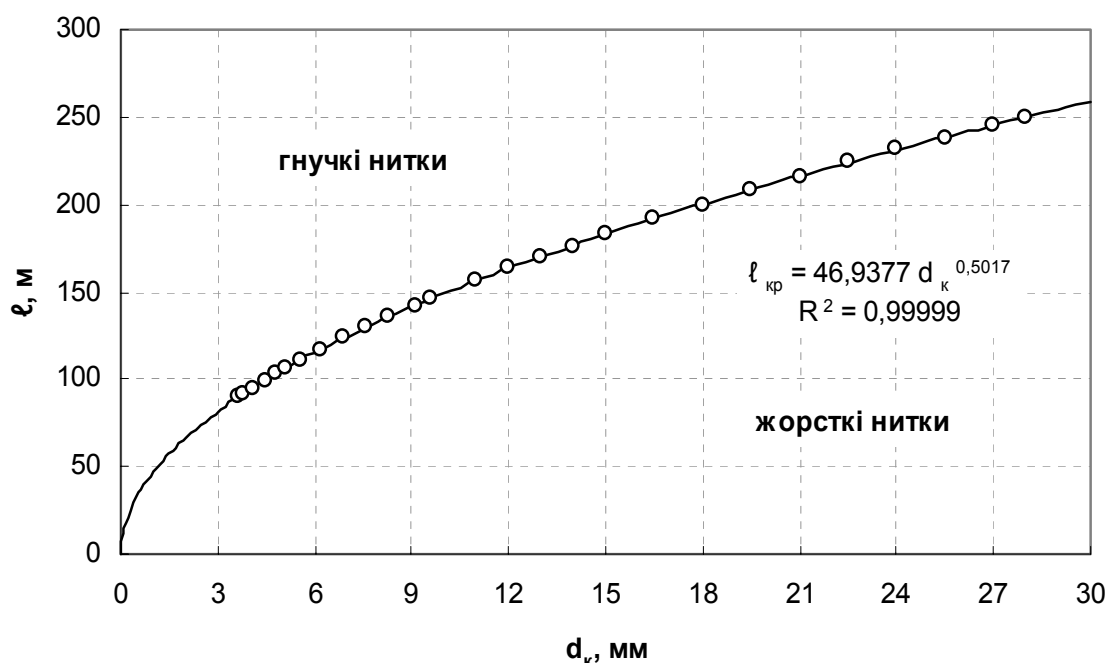


Рис. 1. Визначення критичної довжини прольоту для ділянки каната, завантаженого власною вагою

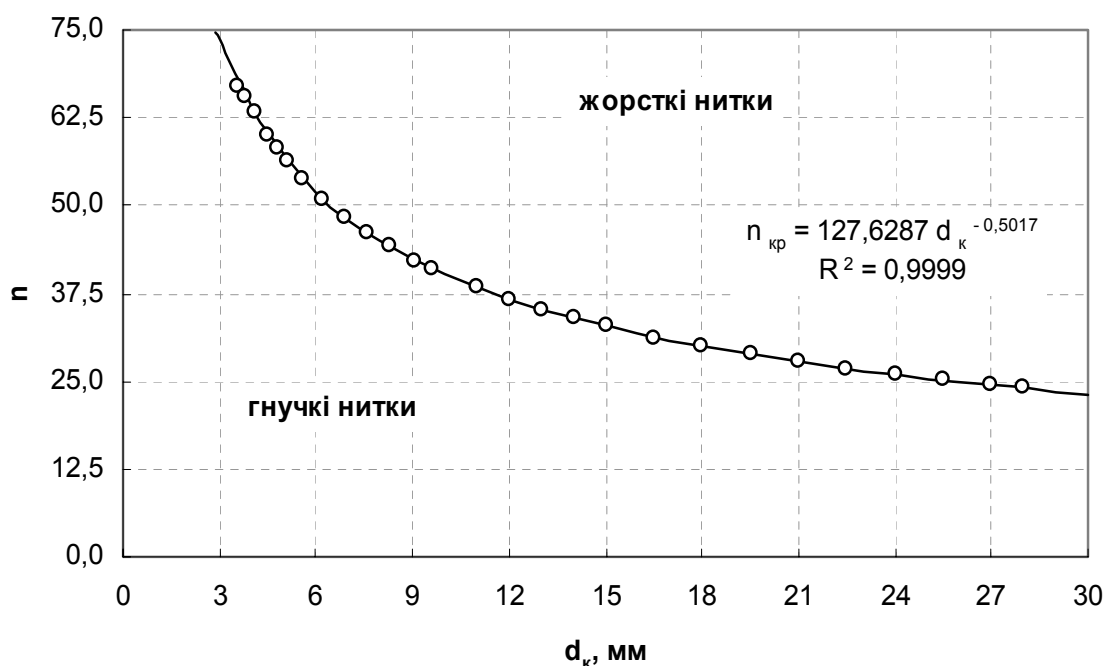


Рис. 2. Визначення критичного коефіцієнта запасу міцності для ділянки каната, завантаженого власною вагою

Визначення жорсткості каната на окремих ділянках було виконано при експертному оцінюванні міцності елементів канатної дороги бази відпочинку "Захар Беркут" у с. Волосянка Сколівського району Львівської області [7].

Технічні характеристики: канатної дороги (рис. 3) – довжина траси 5358 м, погонна вага вантажної вітки $q_z = 93,76 Н/м$, погонна вага холостої вітки $q_n = 52,35 Н/м$; каната – ГОСТ 2688, діаметр $d_k = 30,5 мм$, сумарне розривне зусилля дротин $T_{розр} = 629000 Н$ (маркувальна група 1670 МПа).

Результати розрахунку величин ψ та n наведено в табл. 1.



Рис. 3.
Канат парнокрісельної
підвісної дороги

Табл. 1. Розрахунок максимальних значень ψ та n тягово-несного каната на характерних ділянках дороги

№ прольоту	ℓ , м	α , град	вантажна вітка		холоста вітка	
			ψ	n	ψ	n
1	76	10,07248	0,16482	16,58	0,02152	10,95
2	110	8,02069	0,14775	15,62	0,02091	10,74
3	70	3,67824	0,13214	15,17	0,02016	10,64
4	152	4,51399	0,11753	14,1	0,01929	10,33
5	149	8,21084	0,10751	13,22	0,01829	9,99
6	155	11,48754	0,09742	12,38	0,01722	9,65
7	84	8,46405	0,08869	12,25	0,01665	9,62
8	232	3,82227	0,07934	11,58	0,01627	9,46
9	235	9,77832	0,07514	10,77	0,01550	9,07
10	46	0,24911	0,06950	11,07	0,01502	9,19
11	68	19,29005	0,05704	9,87	0,01249	8,44
12	188	11,86562	0,05949	9,66	0,01354	8,52
13	108	7,38604	0,05559	9,69	0,01326	8,56
14	52	18,10376	0,04630	8,98	0,01132	8,06
15	196	18,08345	0,04635	8,36	0,01138	7,77
16	194	22,53593	0,04100	7,81	0,01023	7,39
17	50	10,75797	0,04143	8,46	0,01114	7,91
18	30	0,00000	0,04046	8,41	0,01123	7,93
19	66	18,43495	0,03386	7,65	0,00951	7,36
20	104	19,58399	0,03201	7,31	0,00911	7,15
21	170	13,87753	0,03310	7,29	0,00967	7,23
22	96	14,03624	0,03065	7,18	0,00923	7,16
23	48	4,17044	0,03065	7,28	0,00955	7,29
середнє значення	116	10,71406	0,07077	10,46	0,01402	8,71

Визначено також характеристику ψ для канатів маятникових підвісних канатних доріг (МПКД), що експлуатуються в м. Тирніауз (Грузія) [8]. Технічна характеристика каната МПКД з одним вагоном: ГОСТ 2688, діаметр $d_k = 56 \text{ мм}$, погонна вага $q = 108,9 \text{ Н/м}$; сумарне розривне зусилля дротин $T_{розр} = 1980000 \text{ Н}$ (маркувальна група 1670 МПа). Технічна характеристика каната МПКД з двома вагонами: ГОСТ 2688, діаметр $d_k = 96 \text{ мм}$, погонна вага $q = 315 \text{ Н/м}$; сумарне розривне зусилля дротин $T_{розр} = 5660000 \text{ Н}$ (маркувальна група 1670 МПа). Результати розрахунку величин ψ та n наведено в табл. 2.

Табл. 2. Розрахунок максимальних значень ψ та n каната на характерних ділянках МПКД

№ прольоту	ℓ , м	α , град	ψ	n
МПКД з одним вагоном				
1	200	17,48443	0,00415	5,34
2	600	18,43495	0,00599	6,08
3	800	18,19828	0,00598	5,92
середнє значення	533,33	18,03922	0,00537	5,78
МПКД з двома вагонами				
1	268,3	12,89008	0,18929	25,39
2	608,8	19,24979	0,01124	6,25
3	982,4	17,50798	0,00779	5,07
середнє значення	619,83	16,54928	0,06944	12,24

З метою перевірки правильності наведених положень та встановлення впливу згинальної жорсткості несного елемента на його форму провисання авторами розроблено дослідний стенд (рис. 4).

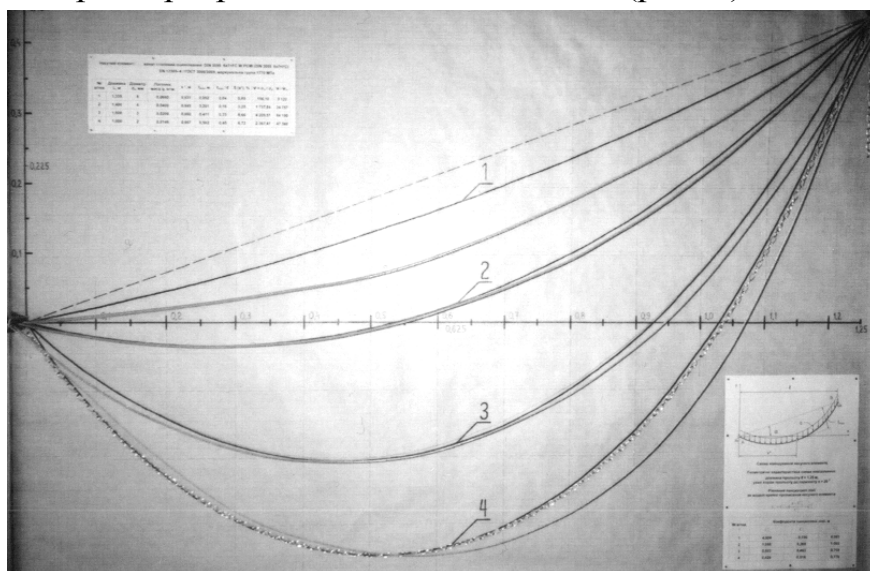


**Рис. 4.
Стенд для
дослідження форми
провисання гнучких
та жорстких несних
елементів**

Як несучі елементи використано канат сталевий оцинкований DIN 3055 $6 \times 7 + \text{FC W PCW}$ та DIN 3055 $6 \times 7 + \text{FC}$ (EN 12385-4, ГОСТ 3066 / ГОСТ 3069) маркувальної групи 1670 МПа, ланцюг сталевий (ДСТУ 3555 - 97) та нитку синтетичну (ДСТУ ГОСТ 23364-2003). Геометричні характеристики схеми навішування на стенді: довжина прольоту $\ell = 1,25 \text{ м}$, ухил хорди прольоту до горизонту $\alpha = 20^\circ$. Результати розрахунку характеристик ψ та n для канатів стенда наведено в табл. 3.

Табл. 3. Розрахунок максимальних значень ψ та n для канатів дослідного стенда

№ вітки	d_k , мм	погонна маса m , кг/м	$f_{\max}/\ell$	ψ	n
1	5	0,0660	0,04	156,10	9 049
2	4	0,0400	0,16	1 737,84	28 031
3	3	0,0200	0,33	4 209,51	40 214
4	2	0,0146	0,45	2 367,41	24 170

На основі проведеного аналізу результатів дослідження можна зробити такі висновки:

1. Незважаючи на те, що модель нитки є деякою абстракцією, у багатьох випадках канати підвісних систем відповідають цій моделі.
2. Запропоновано метод розрахунку критеріїв ψ (співвідношення між напруженнями згину і напруженнями розтягу) та n (коефіцієнт запасу міцності) і, на цій основі, визначено межі застосування теорії гнучких ниток.
3. Встановлено, що в реальних підвісних транспортних системах, оснащених канатами за ГОСТ 2688, здебільшого несучий елемент працює як гнучка нитка. Розроблено практичні рекомендації (отримано емпіричні залежності критичних довжини прольоту і коефіцієнта запасу міцності каната від його діаметра), які можуть бути використані при проектуванні підвісних систем.
4. Показано, що використання стендів для дослідження реальних підвісних конструкцій є недоцільним, оскільки адекватні результати для канатів за ГОСТ 2688 діаметром $d_k = 14 \dots 27$ мм отримуються при довжинах прольотів більших за 175...245 м.

Література

1. Алексеев Н.И. Статика и установившееся движение гибкой нити. – М.: Легкая индустрия, 1970. – 272 с.
2. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. – М.: Машиностроение. 1978. – 222 с.
3. Меркин Д.Р. Введение в механику нити. – М.: Наука, 1981. – 240 с.
4. Качурин В.К. Теория висячих систем. – М.-Л.: Гостехиздат, 1962. – 224 с.
5. Тисовський Л.О., Рудько І.М. Розроблення методу розрахунку геометричних та силових параметрів несучих канатів підвісних установок// Восьмий Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2007. – С. 171.
6. Адамовский Н.Г. Оптимальные режимы нагружения несущих канатов подвесных лесотранспортных установок с учётом приведённой жесткости системы: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.06.02/ Львовск. лесотехн. ин-ут. – Львов: ЛЛТИ, 1984. – 24 с.
7. Боднар Г.Й., Дзюба Л.Ф., Ольховий І.М., Рудько І.М. До оцінки міцності елементів підвісних канатних доріг// Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів. – 2006, № 9. – С. 98-102.
8. Патарая Д.И. Расчёт и проектирование канатных систем на примере подвесных дорог. – Тбилиси: Мецниереба, 1991. – 104 с.

УДК 515.07.8

Ст. викл. Г.М. Ланіцька; ст. викл. Г.М. Чайковська;
асист. Л.В. Салапак – НЛТУ України, м. Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ЗАДАЧ НА ПОБУДОВУ

Розглядаються питання дискусійного характеру. У ній наведено методику розв'язування геометричних задач на побудову: позиційних та метричних. Пропонується прийом вибору адекватного методу розв'язання задач на побудову.