ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1991
Seria: GÓRNICTWO z. 200 Nr kol. 1136

International Seminar on Shaft Hoisting Technology

Alfred CARBOGNO

Instytut Mechanizacji Górnictwa
Politechniki Śląskiej, Polska

ANALIZA TEORETYCZNA ORAZ BADANIA MODELOWE I EKSPLOATACYJNE KSZTAŁTU PĘTLI LINY WYRÓWNAWCZEJ

Streszczenie. Przedstawiono analizę teoretyczną kształtu pętli liny wyrównawczej, a głównie jej szerokości. Podano sposób wyprowadzenia wzoru na obliczenie szerokości pętli w stanie statycznym z uwzględnieniem jej sztywności na zginanie. Omówiono stanowisko i sposób badań modelowych kształtu pętli lin oraz przedstawiono wyniki pomiarów szerokości pętli lin w szybach. Obliczone teoretycznie szerokości pętli lin porównano z wynikami badań modelowych i eksploatacyjnych. Na podstawie przeprowadzonych porównań zaproponowano ostateczne wzory do obliczania szerokości pętli lin w szybach w zależności od ich konstrukcji.

1. WSTĘP

Wprowadzenie do eksploatacji okrągłych lin wyrównawczych wielosplotkowych dwu- i trzywarstwowych na szerszą skalę w kraju po roku 1969 napotkało pewne trudności techniczne. Polegały one między innymi na tym, że zarówno istniejące urządzenia wyciągowe, jak i ostatnio uruchamiane nie były przystosowane do ich przyjęcia, ponieważ parametry mechaniczne lin okrągłych, zwłaszcza ich sztywność na zginanie, jest większa niż lin wyrównawczych płaskich. Przy stosowanych w kraju rozstawach naczyń wyciągowych ta większa sztywność poprzeczna lin okrągłych powoduje, że w swym nawrocie w rząpiu przyjmują one wyraźny kształt "gruszki" niekiedy o znacznej szerokości, co jest dla użytkownika dość kłopotliwe. Zmusza go do przebudowy stacji nawrotowych w rząpiu, a czasem do stosowania specjalnych zabezpieczeń przed kontaktowaniem się liny z obmurzem szybu lub z elementami stacji. Ponadto intensywne zginanie liny w nawrocie, gdzie siła osiowa jest

mała, nie wpływa dodatnio na jej trwałość. Powyższe sprawia, że poznanie kształtu osi liny w nawrocie jest dość istotnym zagadnieniem zarówno dla projektantów, jak i użytkowników wyciągów szybowych.

2. TEORETYCZNY KSZTAŁT OSI ZWISAJĄCEJ LINY

Kształt, jaki przyjmuje zwisająca lina rozpięta pomiędzy dwoma podporami, zależy od:

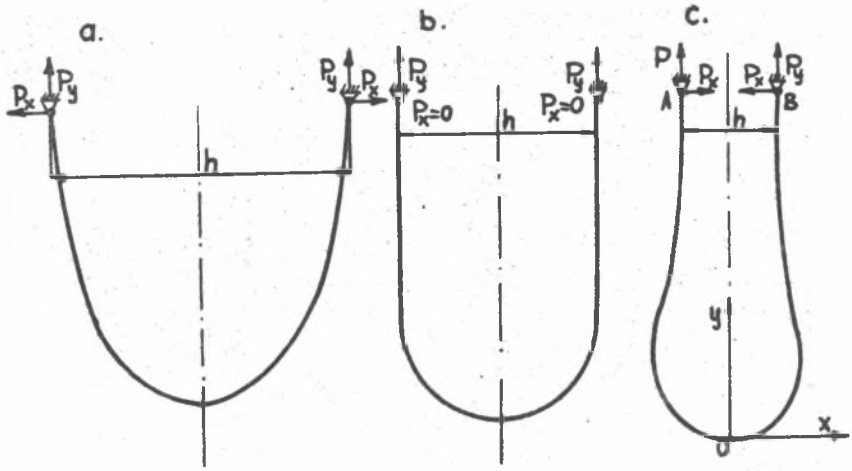
- rozstawu podpór h i długości liny,
- masy jednostki długości liny γ, sztywności poprzecznej EI,
- sposobu mocowania i obciążenia zewnętrznego.

Jeżeli długość całkowita zwisającego odcinka liny jest dostatecznie duża, można wyróżnić trzy podstawowe kształty osi liny, jak to pokazano na rys.1.

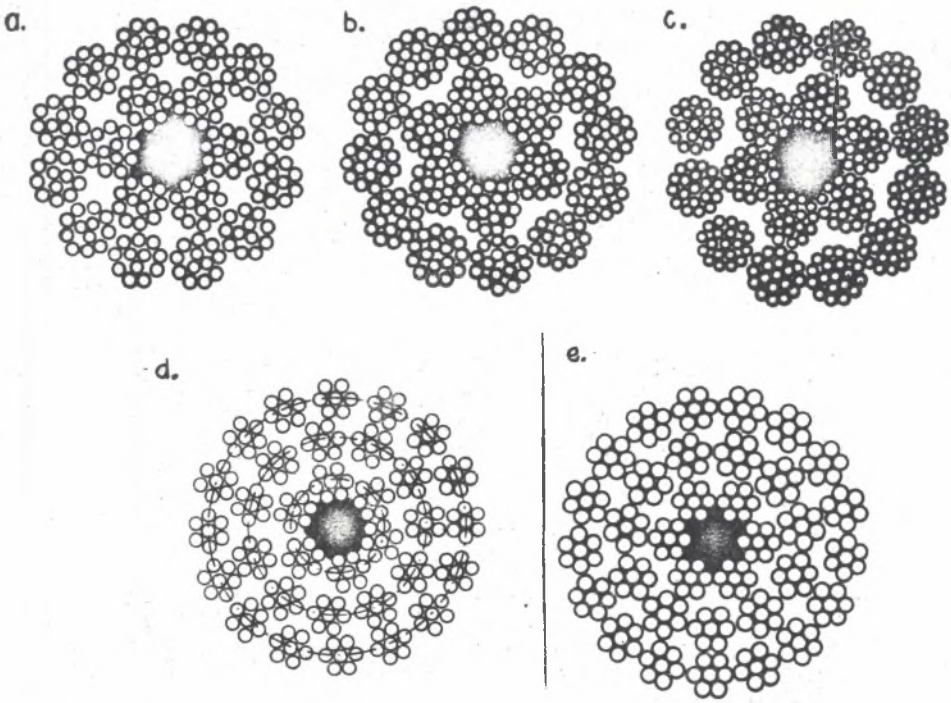
W układach, w których rozpiętość podpór h jest porównywalna z długością liny, jej kształt można opisać funkcjami hiperbolicznymi, bo krzywizny osi są małe, a wpływ sztywności EI - znikomy /rys.1a/. Kształt ten nie ma zastosowania w odniesieniu do lin wyrównawczych, gdzie stosunki h/d względnie h/b są rzędu 20 do 50 /d - średnica liny okrągłej, b - grubość liny wyrównawczej płaskiej/. Sztywności poprzecznej nie można wówczas pominąć. W tej sytuacji można wyróżnić zwis swobodny /wg rys.1.b./, w którym składowa pozioma reakcji $P_x=0$, oraz zwis liny ze ściskaniem w nawrocie /rys.1c/, gdy składowe P_x w podporach są skierowane do pionowej osi wyciągu. Przypadek ten występuje w praktyce najczęściej i charakteryzuje się zwłaszcza tym, że szerokość nawrotu h_p jest większa niż rozstaw zawieszenia h_z. Kształt pętli, głównie jej szerokość, zależy między innymi od konstrukcji liny, szczególnie uwidacznia się to przy linach wyrównawczych okrągłych. W kraju obecnie stosuje się szeroko liny wyrównawcze okrągłe dwuwarstwowe typu GIG /rys.2a,b,c/ w mniejszym stopniu liny trzywarstwowe konstrukcji $33x7+A_0$ /rys.2d/, a ostatnio czynione są próby z linami trzywarstwowymi konstrukcji $34x7+A_0$ /rys.2e/.

2.1. UPROSZCZONE RÓWNANIE OSI SWOBODNIE ZWISAJĄCEJ LINY

Do wyprowadzenia równania krzywizny pętli liny z uwzględnieniem jej sztywności na zginanie wykorzystano model podany w pracach Terleckiego V.I. [6,8,9]. Otrzymane w tych pracach równania równowagi momentów i sił działających na element liny w pętli nie są zgodne z podanym planem sił i momentów w odniesieniu do układu współrzędnych.



Rys.1. Symetryczne kształty pętli liny wyrównawczej: a-składowa P_x dodatnia (rozciąganie w nawrocie, b-składowa $P_x=0$, c-składowa P_x ujemna (ściskanie w nawrocie)



Rys.2. Przekroje poprzeczne stosowanych w kraju lin wyrównawczych okrągłych wielosplotkowych nieodkrętnych: a,b,c-dwuwarstwowych typu GIG, $18xm+A_o$, gdzie m-12,16,19, d-trzywarstwowej konstrukcji $33x7+A_o$, e-trzywarstwowej konstrukcji $34x7+A_o$

W niniejszym opracowaniu dla przyjętego modelu /rys.3/, w którym początek nieruchomego układu współrzędnych YOX znajduje się w najniższym przekroju pętli z warunków rzutów sił na osie współrzędnych oraz sumy momentów zginających, otrzymano:

na oś x $P_x+dP_x-P_x=0$, na oś y $P_y+dP_y-P_y-\gamma g ds=0$ /1/

$$M+dM-M+P_x dy+P_y \cdot dx=0,\quad dM+P_x ds \sin\alpha+P_y ds \cos\alpha=0 \qquad /2/$$

$$dx = ds \cos\alpha,\quad dy=ds \sin\alpha$$

Ostatecznie możemy zapisać:

$$P_x = \text{const},\quad P_y = \gamma \cdot g \cdot s \qquad /3/$$

$$\frac{dM}{ds} = -/P_x \sin\alpha+P_y \cos\alpha/ \qquad /4/$$

lub

$$\frac{dM}{ds} = -/P_x \sin\alpha+\gamma g S \cos\alpha/ \qquad /4a/$$

gdzie: γ - masa metra bieżącego liny,

S - długość łuku liczona od początku układu współrzędnych, za wzrost dodatni /+/ łuku przyjęto wzrost w kierunku prawej gałęzi liny,

α - kąt nachylenia stycznej w dowolnym punkcie łuku liny do osi poziomej x.

Z wytrzymałości materiałów krzywiznę K określa zależność:

$$K = \frac{1}{\varrho} = \frac{d\alpha}{dS} \text{ lub } \frac{d\alpha}{dS} = \frac{M}{EI} \text{ skąd } \frac{dM}{dS} = EI \frac{d^2\alpha}{dS^2} \qquad /5/$$

gdzie: ϱ - promień krzywizny osi zginania liny,

K - krzywizna płaskiego zginania sprężystej osi liny,

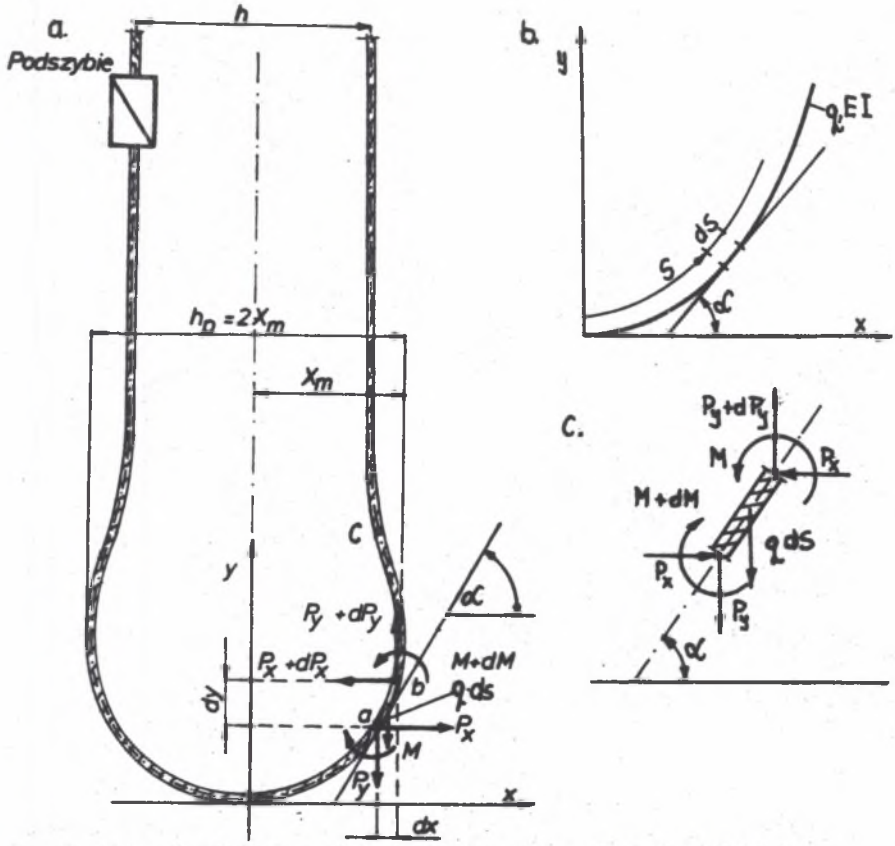
EI - sztywność liny na swobodne zginanie.

Po przekształceniach otrzymano równanie różniczkowe:

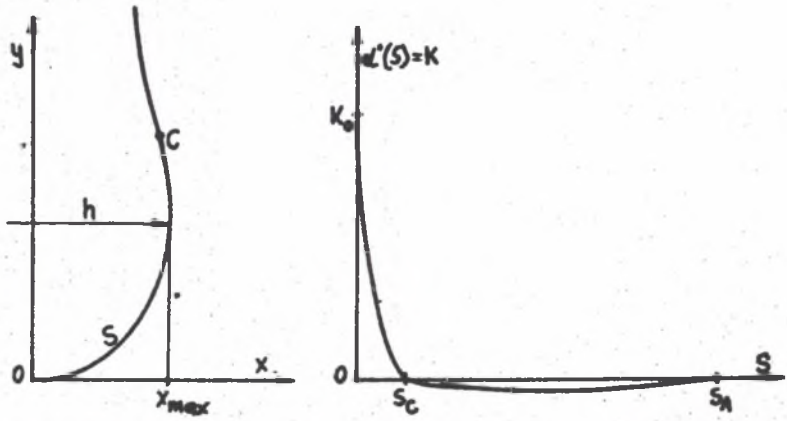
$$-\frac{d^2\alpha}{dS^2} = \frac{P_x}{EI} \sin\alpha + \frac{q \cdot S}{EI} \cos\alpha \qquad /6/$$

gdzie: $q = \gamma \cdot g$ - ciężar jednostkowy liny

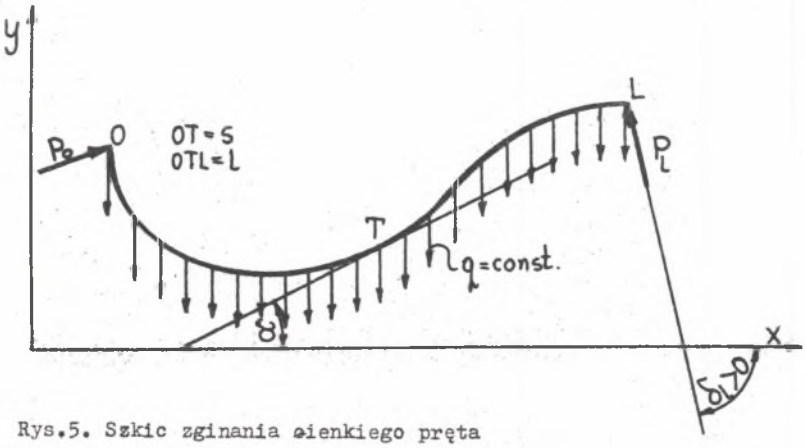
Zależność /6/ można również otrzymać wykorzystując teorię zginania cienkich prętów w jednej płaszczyźnie /brak skręcania/, według której dla ogólnego przypadku zginanego pręta jak na rys.5, z uwzględnieniem jednostkowego ciężaru własnego q, równanie różniczkowe równowagi sprężystej linii



Rys.3. Schemat sił i momentów działających na element pętli liny wyrównawczej



Rys.4. Kształt zwisu liny ze ściskaniem w nawrocie i zależność krzywizny K od przekroju S. C-punkt przegięcia liny, A-przegubowe mocowanie liny



Rys.5. Szkic zginania cienkiego pręta

przy dużych przemieszczeniach zginania wynosi [7]:

$$l^2 \frac{d^2\alpha}{dS^2} = -\beta_L^2 \sin(\alpha + \delta_l) + \beta_q^2 \left(\frac{l-S}{l}\right)\cos\alpha \qquad /7/$$

gdzie: $\beta_L = \sqrt{\frac{P_L \cdot l^2}{EI}}$, $\beta_q = \sqrt{\frac{q l^3}{EI}}$ - stałe bezwymiarowe

Po wykorzystaniu stałych bezwymiarowych i założeniu, że siła $P_L = P_x$ działa równolegle od osi x, czyli kąt $\delta_L = 0$, otrzymamy zależność:

$$\frac{d^2\alpha}{dS^2} = -\frac{P_x}{EI}\sin\alpha - \frac{qS}{EI}\cos\alpha \qquad /8/$$

Wzór /8/ jest identyczny ze wzorem /6/.

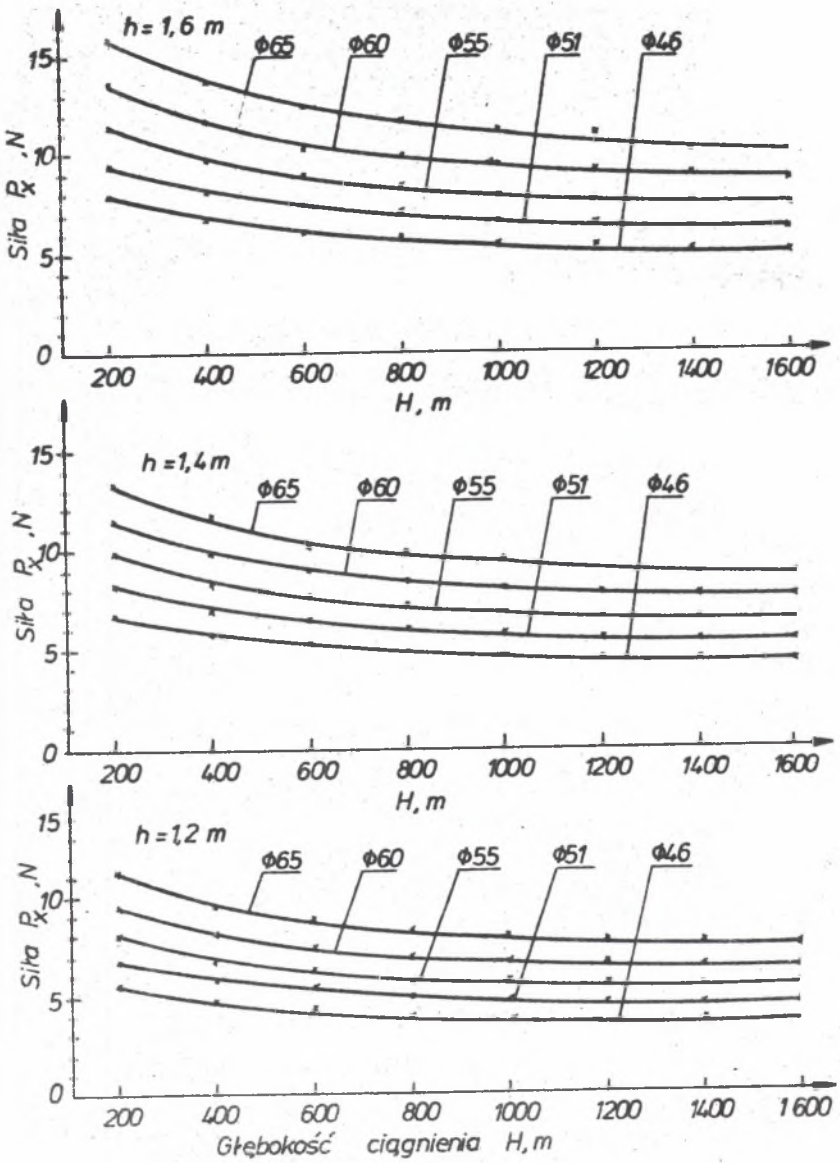
W pracach [1,4] przeprowadzono analizę wpływu poszczególnych składników prawej części wzoru /6/ na wynik rozwiązania. W tym celu przeprowadzono obliczenia wartości siły P_x dla parametrów krajowych urządzeń wyciągowych: rozstaw osi naczyń h=1,2 ÷ 3m oraz długość lin 200 ÷ 1600 m.

Na rys. 6 i 7 przykładowo przedstawiono obliczone wielkości sił P_x dla parametrów lin wyrównawczych okrągłych dwuwarstwowych typu GIG.

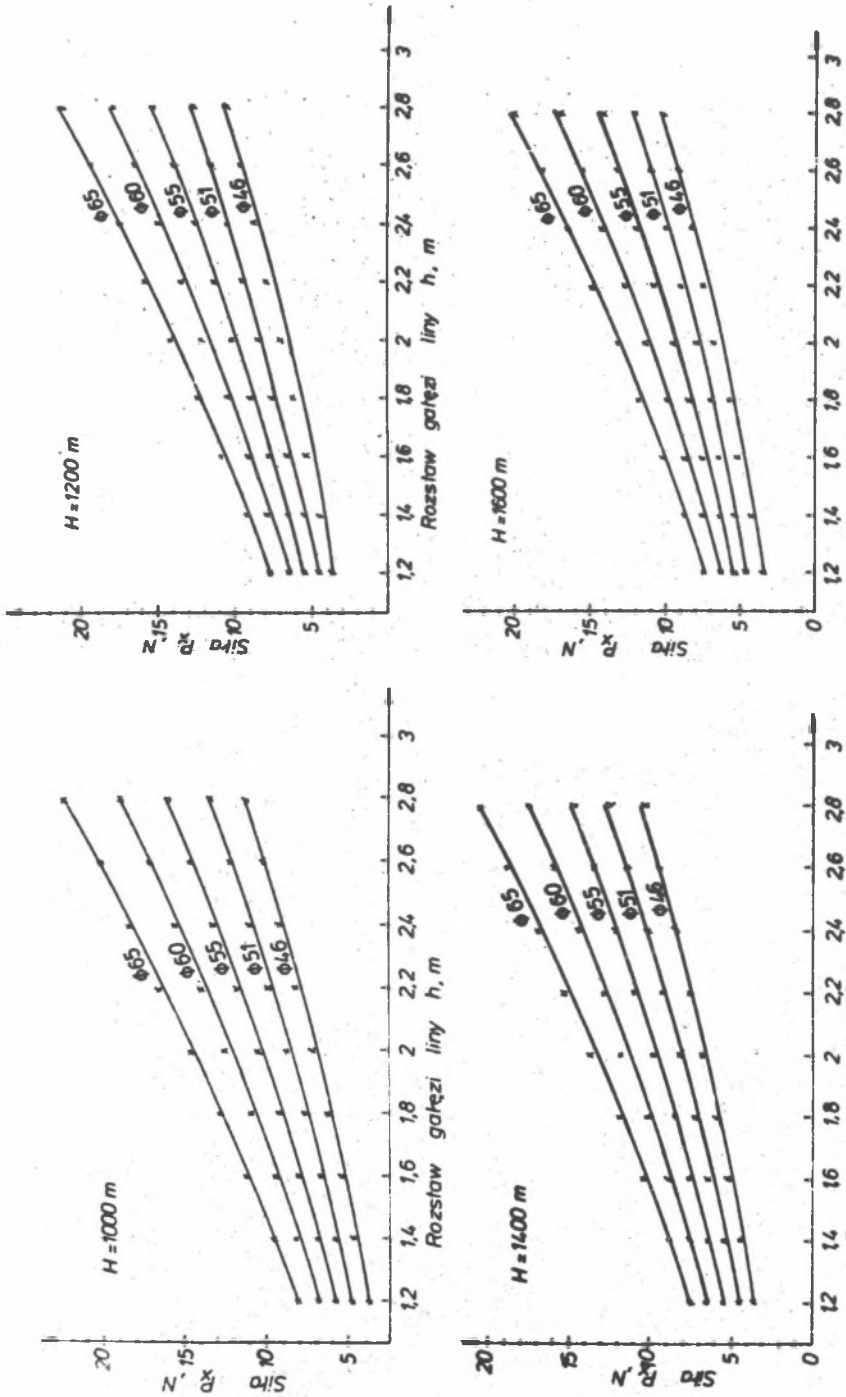
Z analizy wynika, że składnik $\frac{P_x}{EI}$ jest 20 ÷ 10 razy mniejszy od składnika qS/EI. Na tej podstawie do dalszej analizy przyjęto uproszczone równanie /6/ w postaci:

$$\frac{d^2\alpha}{dS^2} = -\frac{q}{EI} S \cos\alpha \qquad /9/$$

Z obliczeń wynikało, że siła P_x maleje ze wzrostem długości liny i spadnie na średnicy.



Rys.6. Wykresy zmiany siły poprzecznej P_x w pętli liny obliczonej teoretycznie w zależności od rozstawu gałęzi liny h oraz głębokości ciągnienia H. Liny wyrównawcze typu GIG



Rys.7. Wykresy zmiany siły poprzecznej P_x w pętli liny obliczonej teoretycznie w zależności od głębokości ciągnienia H oraz rozstawu gałęzi liny h. Liny wyrównawcze typu OIG

Przyrost krzywizny liny w pętli określa zależność

$$dK = -\frac{q}{EI} \cdot S.\cos\alpha \,.dS \qquad /10/$$

gdzie: K - krzywizna liny w dowolnym punkcie pętli.

Do rozwiązania zależności /10/ zastosowano metodę kolejnych przybliżeń. Jako pierwsze przybliżenie przyjęto, że krzywizna liny odpowiada krzywiźnie okręgu K_o, czyli:

$$\alpha = K_o \cdot S \qquad /11/$$

Wobec tego równanie /10/ po uwzględnieniu /11/ z jednoczesną zamianą ds na $ds=d\alpha/K$ przyjmie postać:

$$dK = -\frac{q}{EI} \cdot \frac{\alpha}{K_o} \cos\alpha \cdot \frac{d\alpha}{K} \qquad /12/$$

i po przekształceniach:

$$K_o K dK = -\frac{q}{EI} .\alpha \cdot \cos\alpha .d\alpha \qquad /13/$$

Po scałkowaniu równania /13/ w granicach K_o do K i 0 do α otrzymamy:

$$\int_{K_o}^{K} K_o K dK = \int_{0}^{\alpha} -\frac{q}{EI}\alpha \cos\alpha \; d\alpha \qquad /14/$$

$$K_o \int_{K_o}^{K} K dK = -\frac{q}{EI} \int_{0}^{\alpha} \alpha \cos\alpha \, d\alpha \qquad /15/$$

$$\frac{1}{2} K_o K^2 \Bigg|_{K_o}^{K} = -\frac{q}{EI} /\cos\alpha + \alpha \sin\alpha/ \Bigg|_{0}^{\alpha} \qquad /16/$$

Najpierw obliczono wartość krzywizny pierwotnej K_o przy następujących warunkach brzegowych:

dla $\alpha = 0$, $K=K_o$ oraz $\alpha = \frac{\pi}{2}$, K=0, otrzymano

$$K_o \cdot \frac{K^2}{2} - \frac{K_o^3}{2} = -\frac{q}{EI} /\alpha \sin\alpha + \cos\alpha - 1/ \qquad /17/$$

$$-\frac{K_o^3}{2} = -\frac{q.}{EI}\left(\frac{\pi}{2} - 1\right)$$

skąd krzywizna początkowa określona jest zależnością:

$$K_o = \sqrt[3]{\frac{2q_o}{EI}\left(\frac{\pi}{2}-1\right)} = 1{,}04513 \cdot \sqrt[3]{\frac{q_o}{EI}} \qquad /18/$$

Rozwiązując po przekształceniach zależność /17/

$$K^2 = K_o^2 - \frac{2q_o}{EI.K_o}\left(\alpha\sin\alpha+\cos\alpha-1\right) \Bigg| \cdot \frac{\frac{\pi}{2}-1}{\frac{\pi}{2}-1}$$

$$K^2 = K_o^2 - \frac{K_o^3}{K_o}\left(\alpha\sin\alpha+\cos\alpha-1\right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}-1\right)}$$

$$K^2 = K_o^2\left(1-\frac{\alpha\sin\alpha+\cos\alpha-1}{\frac{\pi}{2}-1}\right) = K_o^2\left[\frac{\frac{\pi}{2}-1-\alpha\sin\alpha-\cos\alpha+1}{\frac{\pi}{2}-1}\right]$$

ostatecznie otrzymano zależność na określenie bieżącej krzywizny

$$K = K_o\sqrt{\frac{1}{\frac{\pi}{2}-1}\cdot\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\sin\alpha-\cos\alpha\right)} \qquad /19/$$

Z równania równowagi elementarnego odcinka dS pętli liny oraz wzoru /19/ mamy:

$$d\alpha = K.dS\ , \quad dx = dS\ .\ \cos\alpha = \cos\alpha\ .\ \frac{d\alpha}{K(\alpha)}$$

$$\frac{d\alpha}{dS} = K = K_o\sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}-1\right)}\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\sin\alpha-\cos\alpha\right)} \qquad /20/$$

skąd

$$dx = \frac{1}{K_o}\cdot\frac{\cos\alpha\,.d\alpha}{\sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}-1\right)}\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\sin\alpha-\cos\alpha\right)}} \qquad /21/$$

Poziomy wymiar połowy szerokości pętli liny wyrównawczej /rys.3/ wynosi:

$$\int_0^{x_m} dx = \frac{1}{K_o}\int_0^{\alpha}\frac{\cos\alpha.\,d\alpha}{\sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}-1\right)}\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\sin\alpha-\cos\alpha\right)}} \qquad /22/$$

Wartość maksymalna połowy szerokości pętli liny wystąpi przy osiągnięciu przez kąt $\alpha = \frac{\pi}{2}$, czyli:

$$x_m = \frac{1}{K_o}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{\cos\alpha\ d\alpha}{\sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}-1\right)}\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\sin\alpha-\cos\alpha\right)}} \qquad /23/$$

Tablica 1

Wyniki obliczeń teoretycznych szerokości pętli $h = 2X_m$ oraz parametru h/d dla lin wyrównawczych okrągłych typu GIG oraz konstrukcji $33x7+A_o$ i $34x7+A_o$, $q = \gamma \cdot g$.

Lp.	Średnica liny d mm	Masa m.b. liny γ kg/m	Konstrukcja liny	$\sqrt[3]{\frac{EI}{q}}$ m	$h = 2{,}85\sqrt[3]{\frac{EI}{q}}$ m	$\frac{h}{d}$
1	34	3,9		0,70	1,99	58,5
2	36	4,4	GIG	0,73	2,08	57,7
3	38	5,0		0,75	2,13	56,2
4	40	5,6	18x12+Ao	0,78	2,22	55,5
5	42	6,1		0,82	2,33	55,6
6	44	6,8		0,84	2,39	54,4
7	46	7,5	GIG	0,78	2,22	48,2
8	48	8,2		0,81	2,30	47,9
9	51	9,1	18x16+Ao	0,84	2,39	46,8
10	53	10,0		0,87	2,47	46,7
11	55	10,9		0,89	2,53	46,1
12	58	11,9		0,92	2,62	45,2
13	60	12,9		0,94	2,67	44,6
14	62	14,0	GIG	0,92	2,62	42,2
15	65	15,2		0,95	2,70	41,6
16	67	16,5	18x19+Ao	0,97	2,76	41,2
17	70	17,8		1,00	2,85	40,7
18	72	19,1		1,03	2,93	40,7
19	75	20,5		1,06	3,02	40,2
20	41	7,4		0,85	2,42	59,0
21	43	8,1		0,88	2,51	58,3
22	45	8,9		0,90	2,56	57,0
23	47	9,7		0,93	2,65	56,4
24	49	10,5	33x7+Ao	0,96	2,74	55,8
25	51	11,3		0,98	2,80	54,9
26	53	12,2		1,01	2,88	54,3
27	55	13,1		1,04	2,96	53,8
28	57	14,0		1,07	3,05	53,5
29	30	3,6		0,67	1,92	64,0
30	32	4,2		0,70	1,99	62,3
31	34	4,8		0,73	2,07	61,0
32	36	5,3		0,76	2,17	60,0
33	38	6,0		0,78	2,24	59,0
34	40	6,6		0,81	2,33	58,2
35	42	7,3	34x7+Ao	0,84	2,40	57,3
36	44	8,0		0,87	2,49	56,6
37	46	8,8		0,89	2,56	55,7
38	48	9,6		0,92	2,64	54,9
39	50	10,4		0,95	2,71	54,2
40	52	11,3		0,97	2,78	53,6
41	54	12,3		1,00	2,85	52,7
42	56	13,2		1,03	2,92	52,2
43	58	14,2		1,05	2,99	51,5

Wyrażenie całkowe wzoru /23/ jest teoretycznie nierozwiązalne, dlatego całkę tę obliczono metodą numeryczną przez określenie wielkości płaszczyzny ograniczonej krzywą, której równanie ma postać funkcji podcałkowej przy zmianie wartości α od 0 do $\frac{\pi}{2}$. Wartość liczbowa płaszczyzny ograniczonej funkcją podcałkową wynosi:

$$f(\alpha) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos\alpha \cdot d\alpha}{\sqrt{\left(\frac{1}{\frac{\pi}{2}-1}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\sin\alpha - \cos\alpha\right)}} = 1{,}4925411$$

Po wstawieniu wartości $f(\alpha)$ do wzoru /23/ otrzymano:

$$X_m = \frac{1{,}4925411}{K_o} = \frac{1{,}4925411}{1.04513\sqrt[3]{\frac{q}{EI}}} = 1{,}428092\sqrt[3]{\frac{EI}{q}} \qquad /24/$$

Całkowita teoretycznie obliczona szerokość pętli liny wyniesie:

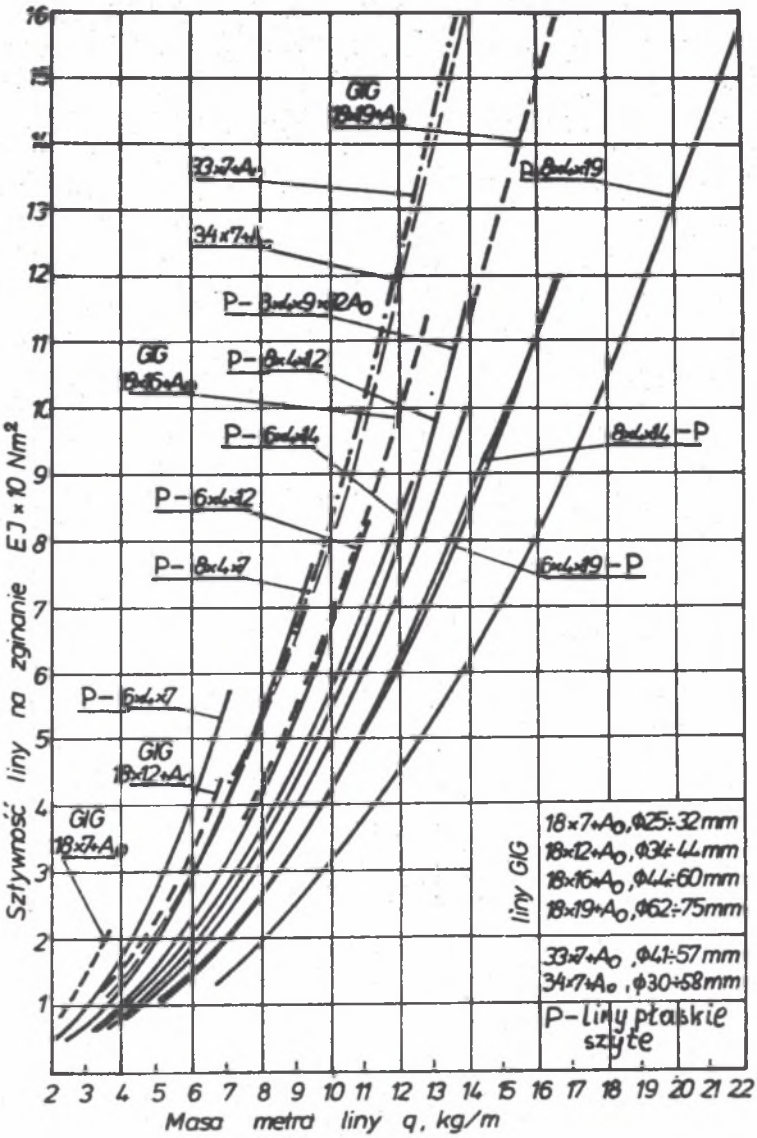
$$h_{max} = 2.X_m = 2{,}856\sqrt[3]{\frac{EI}{q}} \qquad /25/$$

Analogiczne wzory /18/,/19/ i /25/ u Terleckiego mają inną postać, co jest konsekwencją błędu poczynionego na początku rozważań tego autora.

Rezygnując z wspomnianego wyżej uproszczenia można równanie /10/ rozwiązać metodą graficzno-analityczną.

Dokładność tej metody zależy od długości odcinków ΔS, na jakie dzieli się linę w kolejnych przybliżeniach. Próby prowadzi się tak długo, aż dla przyjętej krzywizny K_o otrzyma się przy kącie $\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}$ promień łuku rzędu co najmniej kilkudziesięciu metrów.

Obliczone teoretycznie wartości h_{max} i $\frac{h_{max}}{d}$ dla lin typu GIG i trzywarstwowych konstrukcji $33x7+A_o$ i $34x7+A_o$ zestawiono w tablicy 1. Obliczenia przeprowadzono przy przyjęciu, że sztywność liny na zginanie jest sumą sztywności wszystkich drutów liny, czyli $EI = \sum EI_d$ /gdzie I_d - osiowy moment bezwładności drutu, E - moduł Younga dla drutu/ /rys.8/. Z tablicy tej wynika, że liny konstrukcji GIG tworzą pętle o szerokości 1,99 do 3,0 m, co odpowiada h/d = 58 ÷ 40 w zależności od średnicy liny, a liny konstrukcji $33x7+A_o$ tworzą pętle o szerokości 2,3 do 3,05 m, co odpowiada h/d = 59 ÷ 57 i liny konstrukcji $34x7+A_o$ tworzą pętle o serokości 1,9 ÷ 2,99. Porównując liny konstrukcji GIG oraz $33x7+A_o$ i $34x7+A_o$ w zakresie równoważnych im mas jednostkowych, a więc przedziałów średnic lin typu GIG od /46÷62/ mm i /41÷57/mm konstrukcji $33x7+A_o$ i /42-58/mm konstrukcji $34x7+A_o$ widzimy, że wymagany teoretycznie parametr h/d dla



Rys.8. Wykresy obliczonych teoretycznie sztywności na zginanie EI= EI_d lin wyrównawczych okrągłych i płaskich różnych konstrukcji. EI_d - sztywność na zginanie pojedynczego drutu

lin konstrukcji $33x7+A_o$ i $34x7+A_o$ jest o /23÷34/% większy niż dla lin typu GIG. Z przeprowadzonych obliczeń szerokości pętli lin okrągłych trzywarstwowych konstrukcji $33x7+A_o$ i $34x7+A_o$ wynika, że tworzą one pętle o tej samej szerokości. Nie ma więc teoretycznie żadnych korzyści w szerokości pętli lin konstrukcji $34x7+A_o$ w porównaniu z linami $33x7+A_o$, a takie założenie było podstawą do opracowania tej konstrukcji w kraju i wyeliminowania z eksploatacji sztywnych lin konstrukcji $33x7+A_o$.

2.2. DOKŁADNE RÓWNANIE OSI SWOBODNIE ZWISAJĄCEJ LINY

Rezygnując z już dwukrotnie wspomnianego uproszczenia $\alpha = K_o S$ zapiszemy w jego miejsce

$$S = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{K(\alpha)}$$

co po wstawieniu do /10/ i dwukrotnym zróżniczkowaniu po α da równanie różniczkowe trzeciego stopnia o postaci:

$$K''' K^3 + 3K'' K^2 + K' K^3 + \frac{q}{EI} K' \cos\alpha + 2\frac{q}{EI} K \sin\alpha = 0 \qquad /26/$$

dla rozwiązania którego należy znać wartości początkowe pochodnych. Jeśli w równaniu /26/ przejść z funkcji $K/\alpha/$ na funkcję $\alpha/S/$, można wtedy rozwiązania poszukiwać na maszynie analogowej.

2.3. RÓWNANIE OSI ZWISAJĄCEJ LINY ZE ŚCISKANIEM W NAWROCIE $P_x < 0$

Uwzględniając składową P_x jak na rys.3, równanie momentów

$$dM = qSdS\cos\alpha + P_x dS \sin\alpha$$

przekształca się do funkcji $\alpha/S/$ otrzymując

$$\frac{d^2\alpha}{dS^2} - \frac{q}{EI} S \cos\alpha - \frac{P_x}{EI} \sin\alpha = 0 \qquad /27/$$

$$\alpha'' - C_1 S \cos\alpha - C_2 \sin\alpha = 0 \qquad /27a/$$

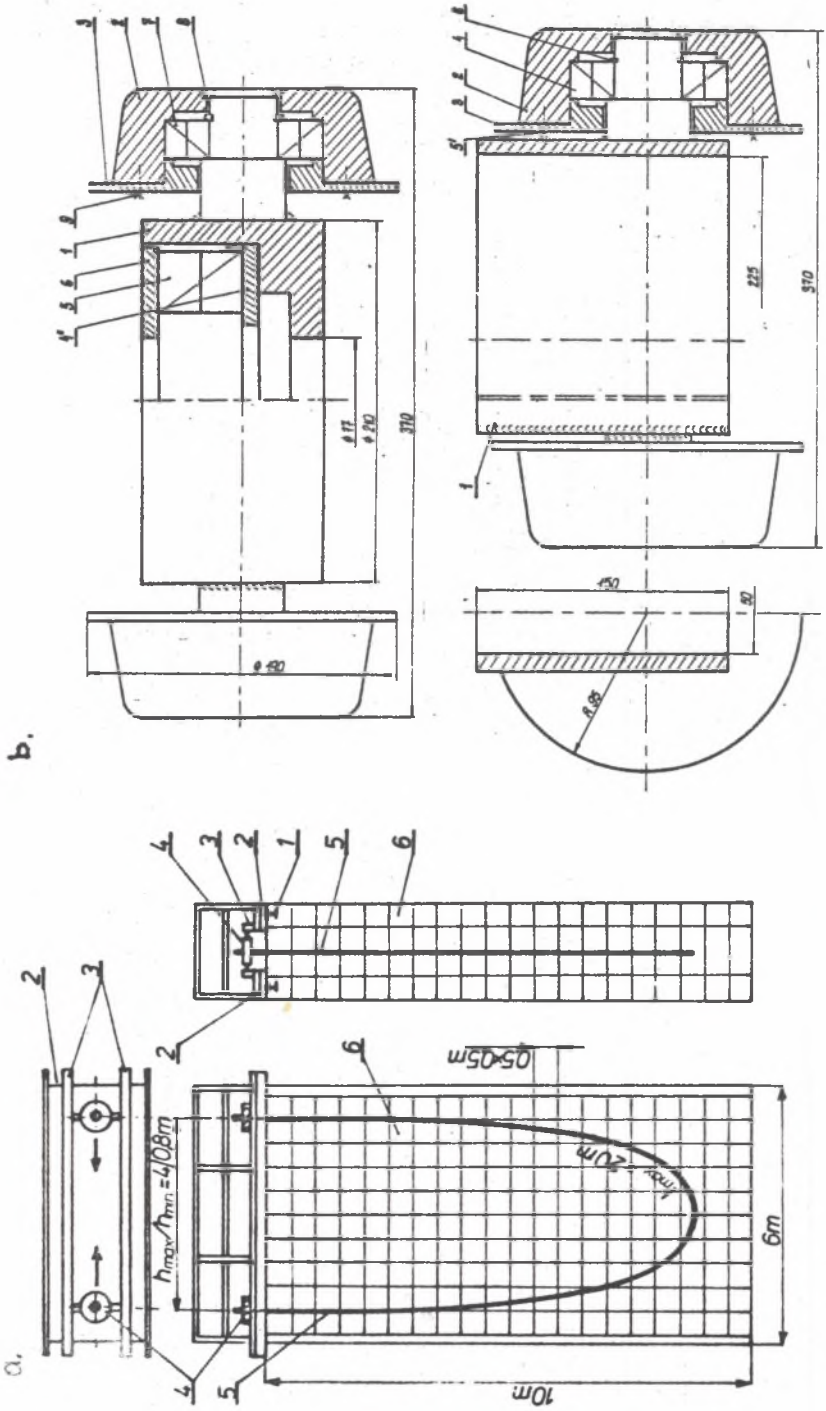
Rozwiązania /27a/ można poszukiwać na maszynie analogowej, a polega ono na tym, że dla danej liny /dane C_1/ i danej długości liny /wartość maksymalna na wejściu/ tak dobiera się wartość początkową $\alpha/0/$, aby dla końca S=1 otrzymać $\alpha'/l/=0$.

W punkcie przegięcia C i na końcu A krzywizny $\alpha'/S_C/ = \alpha'/S_A/ = 0$ /rys.4/

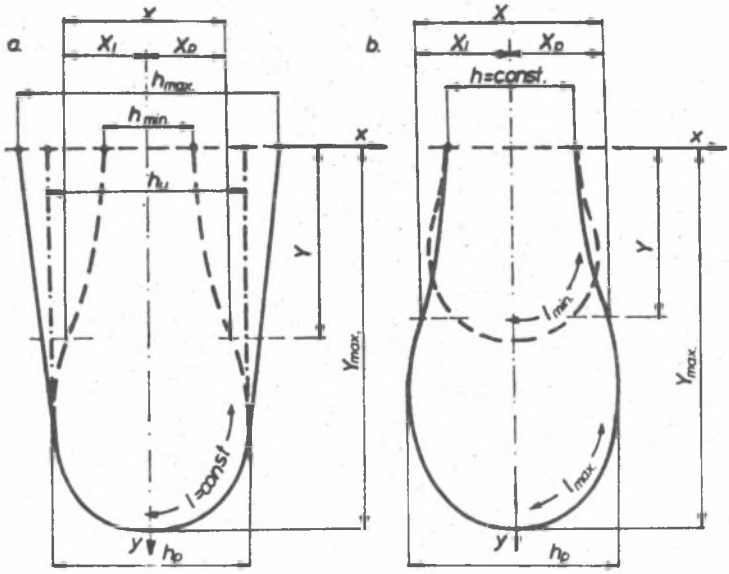
Ponieważ krzywizna początkowa K_o zależy od siły P_x, współczynnik C_2 i wartość początkowa $\alpha'/o/$ są ze sobą związane [5].

3. BADANIA LABORATORYJNE GEOMETRII OSI ZWISAJĄCEJ LINY

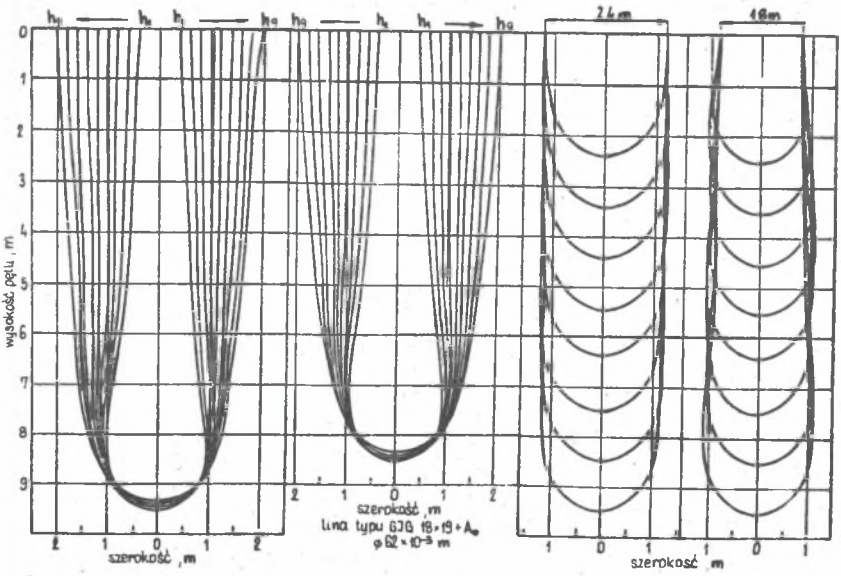
W celu ustalenia wpływu szerokości rozstawu punktów zawieszenia liny, jak i również jej długości na kształt geometryczny pętli, wykonano stanowisko/rys.9/ w wieży basztowej kopalni "Zabrze". Wykorzystano istniejącą konstrukcję tunelu w wieży wyciągu wieloliniowego, na której zamocowano pomost z prowadzeniem obrotowych zawiesi, w których mocowane były końce odcinków lin wyrównawczych. Ściana czołowa i boczna tunelu zostały wykorzystane jako ekran, na którym narysowano podziałkę w formie kratownicy o wymiarach pól 500x500mm, co ułatwiało odczytywanie wyników badań kształtu pętli. Zmianę rozstawu h osi zawieszeń końców odcinka liny uzyskiwano przez przesuwanie zawiesi obrotowych w prowadnicy, które również zezwalały na badanie przechodzenia obrotów liny z jednego jej końca na drugi. Parametry konstrukcyjne badanych lin zawiera tablica 2.
Pomiary wykonywano przy użyciu taśm mierniczych i teodolitu. Rozpoczynano je od długości odcinka liny 20 m i rozstawu zawiesi h = 4m. Pomiary wykonano dla dwu wariantów. W wariancie pierwszym /rys.10a/ zmniejszano rozstaw punktów zamocowań liny od h_{max}=4m do h_{min}=0,4m, co 0,4m zachowując tę samą długość l odcinka liny. W drugim wariancie /rys.10b/ zmniejszano długość odcinka liny przez odcinanie jednego końca od l_{max} = 20 m do l_{min} = 6 m, co 2m zachowując ten sam rozstaw punktów zamocowania liny h. Podczas pomiarów odczytywano wartości współrzędnych x i y wg.szkiców na rys.10 dla lewej X_L i prawej X_p strony pętli. Wyniki pomiarów dla 13 badanych lin zestawiono w tablicach i na wykresach, które podano w pracach [1,4]. W tablicy 3 podano przykładowo wyniki pomiarów kształtu pętli lin dla przypadku tak zwanego naturalnego promienia zginania lin, który odpowiada kształtowi litery U, a na rys.11 otrzymane krzywe dla jednej liny.



Rys.9. Szkic: a-stanowiska badawczego; 1-konstrukcja w wieży, 2-pomost, 3-prowadzenie zawiesi obrotowych, 4-zawiesia obrotowe z łożyskami, 5-badana lina, 6-siatka pomiarowa w formie kratownicy narysowana na ścianach stanowiska; b-zawiesi w stanowisku badawczym dla liny okrągłej (ZO) i płaskiej (ZP); 1-obudowa, 2-koła, 3-obrzeża kół, 4,5,7-łożyska kulkowe



Rys.10. Szkice do pomiarów geometrii osi zwisu liny w stanowisku badawczym: a-dla tej samej długości liny L przy malejącym rozstawie punktów zawieszenia od h_{max}=4m do h_{min}=0,4m, b-dla tego samego rozstawu punktów zawieszenia h przy malejącej długości liny od l_{max}=20m do l_{min}=6m



Rys.11. Przykład pomiarów kształtów pętli liny wyrównawczej okrągłej dwuwarstwowej ϕ 62mm konstrukcji 18x19+A_o w stanowisku badawczym

Tablica 2

Dane techniczne lin wyrównawczych okrągłych i płaskich szytych poddanych badaniu geometrii swobodnego zwisu liny w stanowisku pomiarowym. Parametry lin według świadectw. Wytrzymałość drutów R_m = 1177 N/mm^2

Lp.	Wymiar liny d mm	Konstrukcja liny	Średnica drutów δ mm	Masa m.b. γ kg/m	Średnica rdzenia d_r mm	Skok zwicia liny h mm	Czas pracy liny w szybie miesiące
1	40	GIG,18x12+A_o	1,9	5,6	-	340	6
2	44	GIG,18x12+A_o	2,1	6,8	12	380	nowa
3	44	GIG,18x12+A_o	2,1	6,8	12	380	39
4	48	GIG,18x16+A_o	2,0	8,2	14	415	nowa
5	48	GIG,18x16=A_o	2,0	8,2	14	415	65
6	48	GIG,18x16+A_o	2,0	8,2	14	415	nowa
7	50	GIG,18x16+A_o	2,2	8,9	-	425	nowa
8	57	33x7+A_o	2,9	14	-	353	nowa
9	62	GIG,18x19+A_o	2,4	14	18	540	36
10	62	GIG,18x19+A_o	2,4	14	18	535	13
11	139x27	8x4x7	2,3	9,8	-	350	nowa
12	166x32	8x4x9+32A_o	2,1	11,32	-	410	53
13	1[illegible]8x33	8x4x9+32A_o	2,2	13,8	-	477	53

Na podstawie analizy wyników podanych w tablicy 3 możemy przyjąć wartości h/d wynikające z badań laboratoryjnych:

- dla lin okrągłych dwuwarstwowych $\frac{h}{d}$ = 35 ÷ 53
- dla lin okrągłych trzywarstwowych $\frac{h}{d}$ = 47
- dla lin płaskich stalowych $\frac{h}{\delta}$ = 60 ÷ 74

4. [illegible] KSZTAŁTU PĘTLI LIN WYRÓWNAWCZYCH W SZYBACH

Z wstępnych obserwacji układania się lin wyrównawczych, zarówno okrągłych, jak i płaskich w rząpiach szybów wynikało, że tworzą one w stanie statycznym pętle o różnym kształcie, szczególnie o szerokości przekraczającej rozstaw osi naczyń wyciągowych w szybie.

Tablica 5

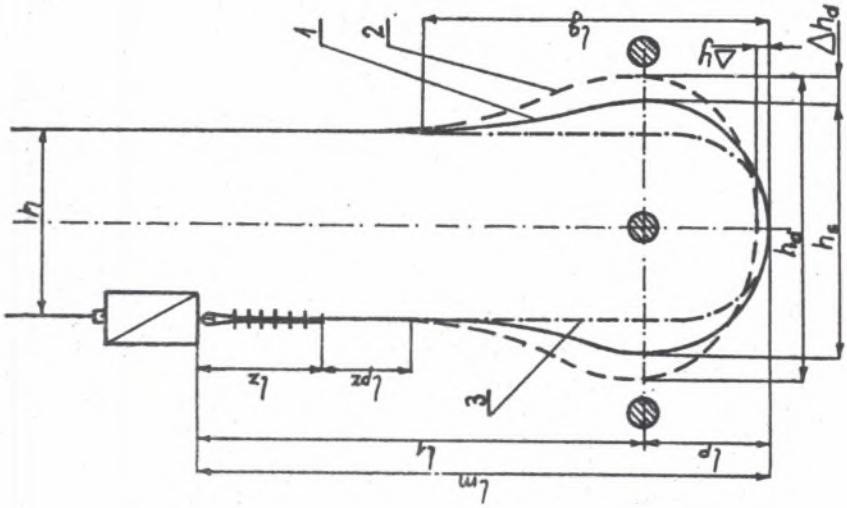
Otrzymane z badań stanowiskowych swobodnego zwisu lin wyrównawczych okrągłych i płaskich, minimalne wartości stosunku rozstawu punktów zamocowania liny do jej średnicy lub grubości h/d (h/b), przy którym pętla ma kształt literu U, tzn. $h=h_u=h_p$

Lp.	d lub b x10^{-3}m	Konstrukcja liny	Rozstaw punktów zamocowań		Wartości h/d dla długość zwisającego odcinka liny l, m							
			h,m	$\frac{h}{d}$	20	18	16	14	12	10	8	6
1	40	GIG,18x12+A$_o$ po 6 mc.pr.	2,0 1,6	50 40	52,9 48,6	52,8 49,1	52,2 47,5	51,9 48,0	52,1 47,3	52,7 47,1	50,0 46,3	50,4 44,0
2	44	GIG,18x12+A$_o$ nowa	2,4 2,0	54,5 45,4	55,6 51,2	56,5 52,8	56,2 50,0	56,6 51,8	54,2 49,3	53,0 50,4	55,4 49,5	52,9 48,9
3	44	GIG,18x12+A$_o$ po 39 mc.pr.	2,4 2,0	54,5 45,4	56,0 52,5	57,3 58,7	57,4 51,7	54,8 51,8	56,8 50,7	54,6 50,1	54,6 48,7	54,2 46,9
4	48	GIG,18x16+A$_o$ nowa	2,0 1,6	41,6 33,3	43,6 39,5	42,5 39,2	42,4 38,6	42,2 38,2	40,8 37,7	42,3 38,0	40,8 36,3	40,6 34,6
5	48	GIG,18x16+A$_o$ po 63 mc.pr.	2,0 1,6	41,6 33,3	43,8 40,6	45,6 42,1	43,4 39,8	43,8 41,5	43,8 39,9	43,8 39,3	42,3 38,6	41,9 37,1
6	48	GIG,18x16+A$_o$ nowa	2,0 1,6	41,3 33,3	wyniki jak lina nr 4							
7	50	GIG,18x14+A$_o$ nowa	2,4 2,0	48,0 40,0	49,8 42,8	49,2 43,6	50,4 42,6	51,0 43,4	51,2 43,3	51,8 43,3	53,1 46,4	50,6 46,1
8	57	33x7+A$_o$ nowa	2,8 2,4	49,1 42,1	50,5 47,3	52,6 48,7	52,6 46,3	50,9 47,8	52,6 46,3	52,6 49,1	52,9 46,1	52,0 42,6
9	62	GIG,18x19+A$_o$ po 30 mc.pr.	2,8 2,4	45,2 38,7	48,4 45,6	46,7 42,4	45,6 40,0	45,8 40,1	45,0 41,5	46,1 41,4	46,0 40,0	46,1 40,4
10	62	GIG,18x19+A$_o$ po 13 mc.pr.	2,4 2,0	38,7 32,2	38,6 36,9	38,6 35,2	38,5 34,9	38,7 34,9	39,0 35,7	37,0 34,7	39,1 34,1	39,0 33,1
11	139x x27	8x4x7 nowa	2,0 1,6	74,1 62,5	77,4 63,6	77,9 65,4	77,7 63,4	78,4 63,5	77,5 63,8	79,8 65,2	78,9 64,8	78,4 63,1
12	166x x32	8×4×9+32A$_o$ po 53 mc.pr.	2,0 1,6	59,2 50	69,3 59,5	72,3 59,8	68,6 60,5	71,0 58,5	68,1 59,1	70,2 58,6	68,1 58,7	67,9 56,6
13	188x x33	8×4×9+32A$_o$ po 53 mc.pr.	2,0 1,6	60,6 48,5	61,8 57,5	63,1 58,1	63,3 58,0	64,2 59,6	61,6 55,8	60,5 55,4	61,7 55,9	60,7 52,0

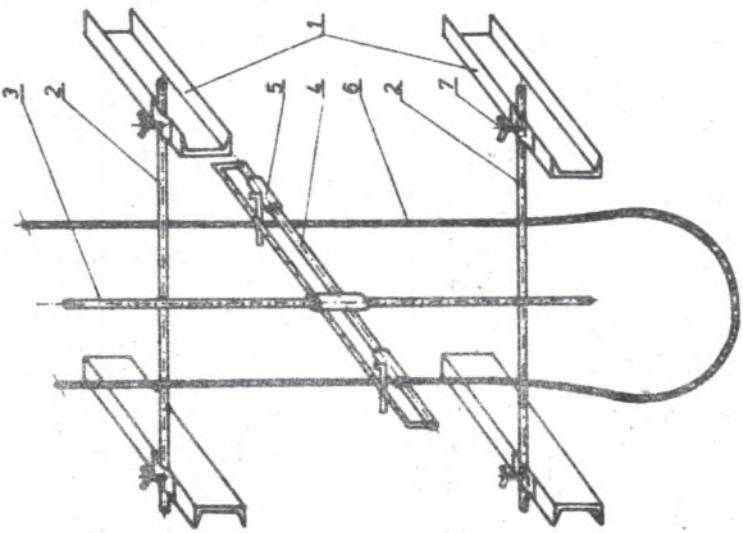
W celu zorientowania się co do wielkości występującej pętli w stanie statycznym, przeprowadzono pomiary w rząpiach szybów za pomocą specjalnie wykonanego przyrządu, który zabudowywano na dźwigarach stacji nawrotowej /rys.12/. Belka nawrotowa na czas pomiarów była usunięta. Prowadnica pionowa 3 i pozioma 4 przyrządu posiadała naniesione skale o podziałce 100 mm. Wymiary pętli ustalono za pomocą suwaków. Do odczytywania wyników pomiarów zabudowano w rząpiu dodatkowe pomosty. Pomiary szerokości i wysokości pętli przeprowadzono przy różnych położeniach naczyń wyciągowych w szybach. Wyniki pomiarów przedstawiono wykreślnie na rys.14 i 15. Rozstaw osi naczyń wyciągowych wynosił w przypadku lin okrągłych h=1,3m, a płaskiej h=1,2m. W tablicy 4 podano wyniki pomiarów dla charakterystycznych położeń naczyń wyciągowych w szybie.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że szerokości pętli dla różnych położeń naczyń wyciągowych w szybie niewiele różnią się pomiędzy sobą. Szerokość pętli liny przy skrajnych położeniach naczyń wyciągowych jest nieco większa niż dla przypadku naczyń usytuowanych w połowie głębokości szybu. Zauważono, że od osi urządzenia wyciągowego zawsze więcej jest odchylona dłuższa gałąź zwisającej liny pod naczyniem znajdującym się aktualnie wyżej w szybie. Dotyczy to zarówno lin okrągłych, jak i płaskich. Wszystkie badane liny tworzyły w rząpiu pętle o wyraźnym kształcie "gruszki". Szerokość pętli liny nowej była większa niż lin pracujących już kilka lat. Z pomiarów wynika również, że zmiana kształtu osi liny dla różnych położeń naczyń wyciągowych w szybach nie występuje w sposób regularny. Wpływają na to deformacje, które liny nabyły podczas produkcji, przewijania i zakładania do urządzeń wyciągowych, jak również różne własności mechaniczne liny wzdłuż jej długości. Stwierdzono, że szerokość pętli liny wyrównawczej płaskiej jest mniejsza niż liny okrągłej. Wynika to głównie, ze sztywności zginania liny okrągłej, która jest większa niż liny płaskiej. Pomierzony parametr h_s/b dla liny płaskiej wynosił 48,7÷52,7, natomiast stosunek rozstawu osi naczyń do grubości liny wynosił $\frac{h}{b}$ =35,3. W przypadku liny okrągłej parametr h_s/d wynosił 33÷34, a stosunek rozstawu osi naczyń do średnicy liny wynosił h/d=22,4. Dla nowo założonej liny okrągłej parametr h_s/d =35,3. Z powyższego wynika, że szerokość pętli liny płaskiej jest 1,4 razy większa od rozstawu osi zawieszeń liny wyrównawczej, a szerokość pętli liny okrągłej jest 1,5-1,6 razy większa od rozstawu osi zawieszeń.

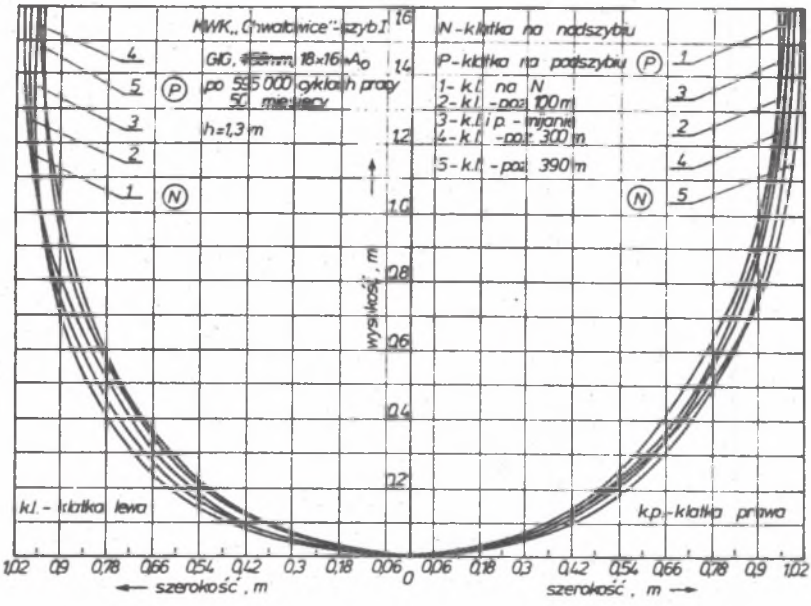
Przedstawiony sposób pomiarów kształtu pętli lin wyrównawczych był czasochłonny. Sposób ten nie nadawał się do przeprowadzania pomiarów w więk-

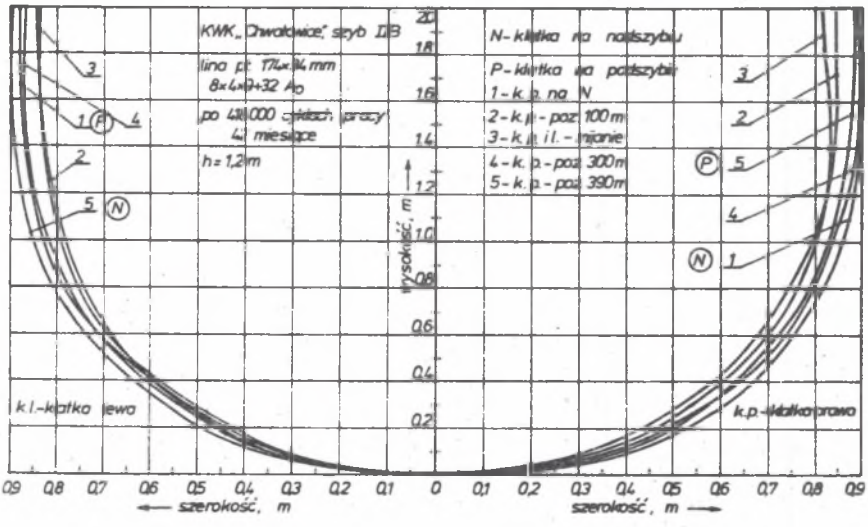


Rys.13. Szkic wymiarowy pętli liny wyrównawczej

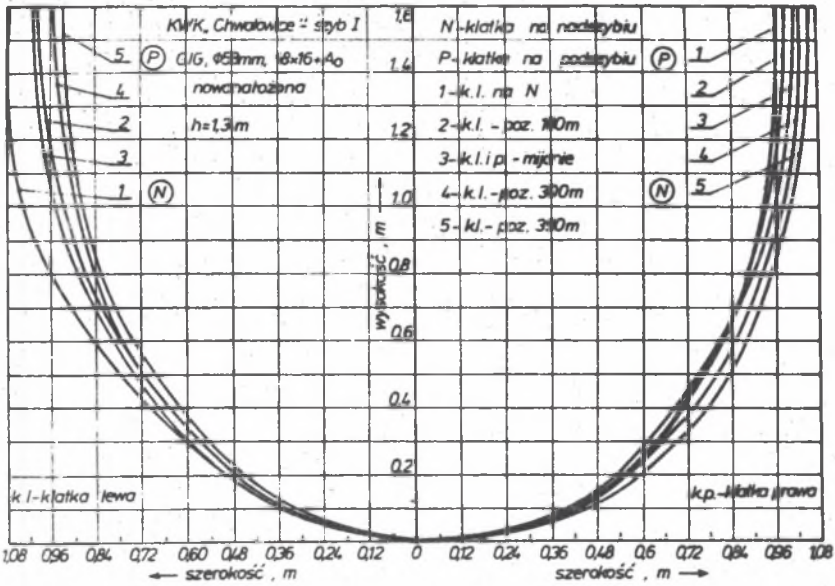


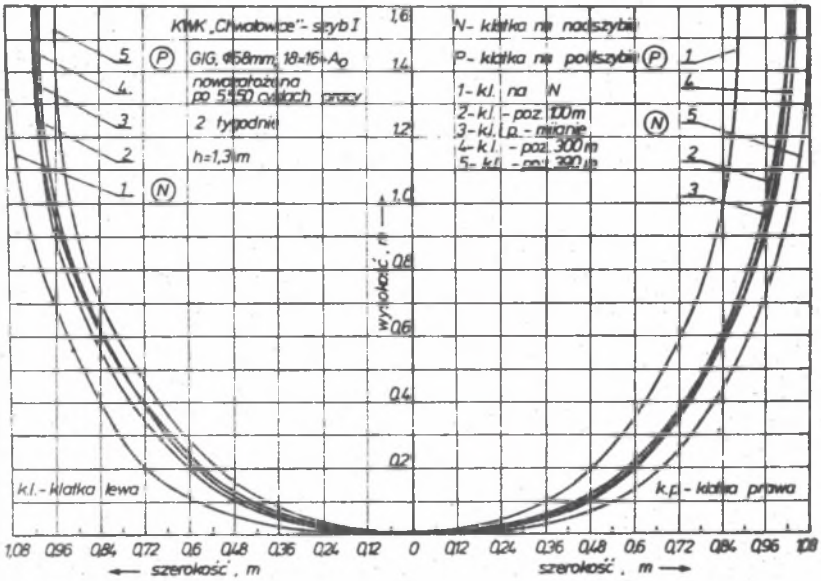
Rys.12. Przyrząd do pomiaru statycznych wymiarów pętli liny wyrównawczej: 1-dźwigary, 2-belki poziome, 3-prowadnica pionowa, 4-prowadnica pozioma, 5-suwaki, 6-lina wyrównawcza, 7-śruby mocujące





Rys.14. Pomierzone w szybie kształty pętli lin wyrównawczych przy różnym usytuowaniu naczyń wyciągowych w szybie: a-dla liny ⌀ 58 mm, 18x16+A_0 po 50 miesiącach pracy, b-dla liny płaskiej 174x34mm po 42 miesiącach pracy





Rys.15. Pomierzone w szybie kształty pętli lin wyrównawczych okrągłych ø 58 mm 18x16+A_0 przy różnym usytuowaniu naczyń w szybie: a-dla liny nowej, b-dla liny nowej po 5550 cyklach pracy

Tablica 4

Wyniki pomiarów szerokości pętli lin wyrównawczych za pomocą przyrządu rys 12

Lp.	Konstrukcja liny	Czas pracy liny w szybie miesiące	Wg dokumentacji		h_s i h_s/d dla różnych położeń naczyń wyciągowych w szybie					
			h m	$\frac{h}{d}$	skrajne				w połowie głębokości szybu	
					lewe		prawe			
					h_s m	h_s/d	h_s m	h_s/d	h_s m	h_s/d
1	GIG Ø 58mm 18x16+A_o	50	1,3	22,4	1,966	33,9	1,955	33,7	1,917	33,1
2	- " -	nowo założona	1,3	22,4	2,042	35,2	1,972	34,1	2,022	34,9
3	- " -	nowo założona po 2 tyg. pracy	1,3	22,4	1,985	34,3	2,038	35,1	2,043	35,2
4	płaska 174x34mm 8x4x9+32A_o	42	1,2	35,3	1,791	52,7	1,784	52,5	1,657	48,7

Tablica 5

Wartości stosunku pomierzonej szerokości pętli liny w szybie w stanie statycznym h_s i dynamicznym h_d do średnicy liny wyrównawczej okrągłej d

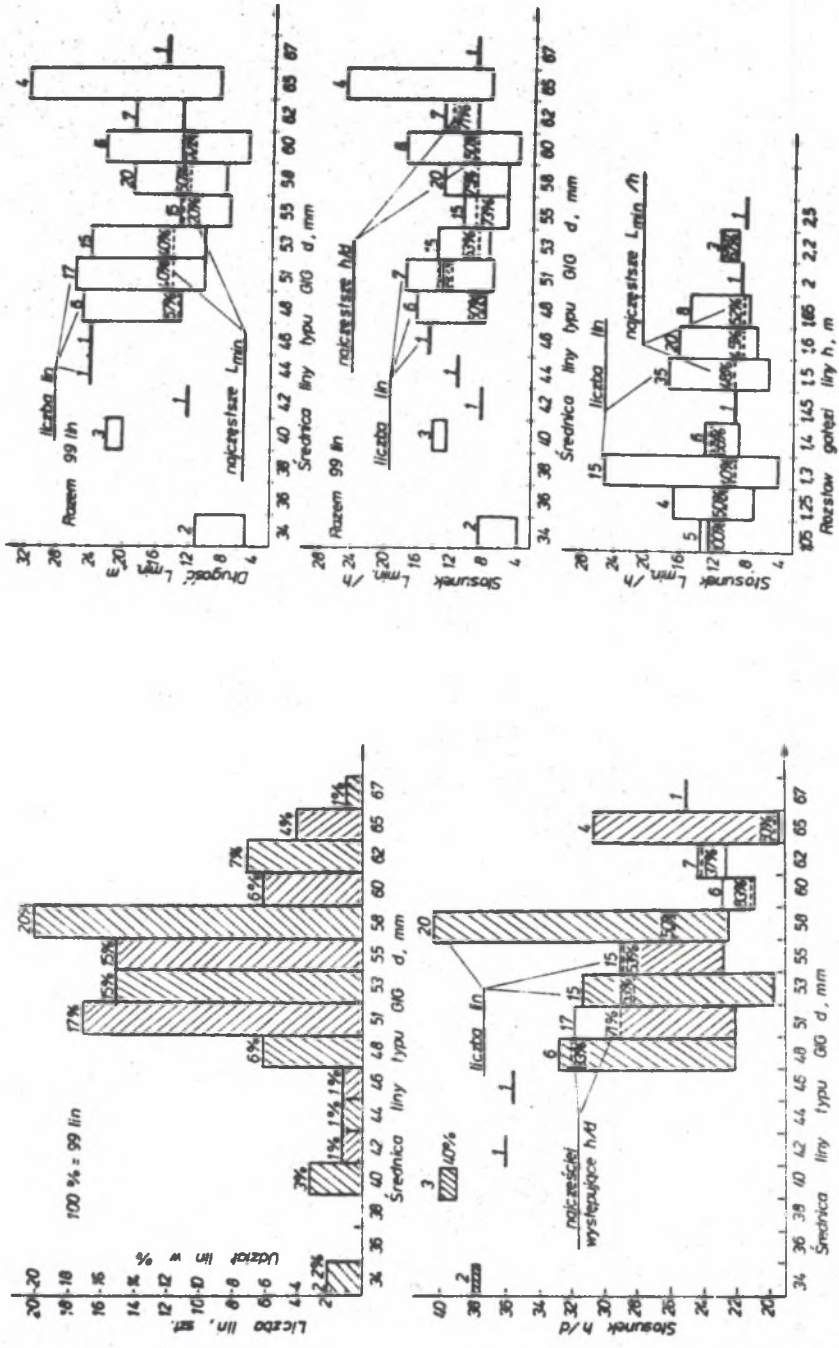
	Lp.	Średnica liny d mm	Liczba lin szt	Zakres stosunku	
				$\frac{h_s}{d}$	$\frac{h_d}{d}$
Liny dwuwarstwowe typu GIG	1	34	1	47	-
	2	40	2	47,5	-
	3	44	4	43÷45	-
	4	46	1	43,5	50
	5	48	4	35 - 39,6	46 - 47
	6	51	2	37 - 41	-
	7	53	7	38 - 60,4	
	8	55	9	36 - 38	38 - 47
	9	56	1	34,5	40
	10	58	15	34 - 44,8	41 - 44
	11	60	4	35 - 37	40 - 45
	12	62	4	32 - 37	-
	13	65	2	28 - 33	-
	14	67	1	37	-
Liny trzywarstwowe 33x7+A_o	1	45	2	44,4 - 45,6	47,8 - 51,1
	2	49	2	40,8 - 46,9	46,9 - 51
	3	53	7	37,7 - 43,4	42,5 - 47,2

szej ilości szybów z uwagi na konieczność przerw w pracy urządzeń wyciągowych, dlatego w dalszych pomiarach ograniczono się jedynie do pomiarów szerokości pętli i orientacyjnie jej wysokości.

W kilku przypadkach pomierzono za pomocą znaków i wymiarów stacji zwrotnych szerokości i usytuowanie się pętli lin podczas ruchu naczyń wyciągowych w szybach. Szkic wymiarowy pętli do pomiarów przedstawiono na rys.13. Szczegółowe wyniki pomiarów przedstawiono w pracach [1,2]. W tablicach 5 i 6 przedstawiono rzeczywiste pomierzone wartości stosunku szerokości pętli liny w nawrocie do jej średnicy d lub grubości b.

W celu porównania parametru $\frac{h_s}{d}$ lub $\frac{h_d}{d}$, jaki wynika z pomiarów szerokości pętli lin w szybach krajowych z parametrem $\frac{h}{d}$ lub $\frac{h}{b}$, **wynikającym** z dokumentacji urządzeń wyciągowych, gdzie h jest rozstawem osi naczyń wyciągowych, przeanalizowano parametr $\frac{h}{d}$ dla 62 urządzeń wyciągowych. Wyniki analizy przedstawiono na rys. 16. Z rys.16 wynika, że najczęściej stosowane są liny typu GIG o średnicach od 51 do 58 mm, które stanowią 67% wszystkich lin typu GIG. Jest to konstrukcja $18x16+A_o$, której należy poświęcić najwięcej uwagi w celu jej poprawienia. Zakres parametru $\frac{h}{d}$ = 19-40. Na łączną liczbę 99 sztuk lin eksploatowanych w 62 urządzeniach wyciągowych, 19 lin pracuje stale w szybach, w których $\frac{h}{d}<25$, **poniżej** wartości wymaganej przez normę oraz 23 liny w szybach o $\frac{h}{d}$ = 25 - 26. Pozostałe 57 lin pracuje w szybach o $\frac{h}{d}$ = 27 - 42. W tej grupie przeważająca większość lin pracuje przy dolnej wartości podanego zakresu $\frac{h}{d}$, tj. od 27 - 31.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zalecana przez normę minimalna wartość parametru h/d=25 jest zbyt mała. Jest to główna przyczyna tworzenia się w szybach pętli lin w kształcie „gruszki", który to kształt wpływa negatywnie na spokojną pracę lin w szybach. W przypadku większej liczby zawieszonych lin wyrównawczych okrągłych "gruszkowate" pętle lin sprzyjają spętlaniu się tych lin w rząpiach. Z tego powodu krajowe konstrukcje stacji zwrotnych nie zawsze spełniają swoje zadanie i powinny być zmienione w szybach głębokich [3]. Podstawowym parametrem niezbędnym do prawidłowego zaprojektowania stacji zwrotnych jest znajomość parametru h_s/d, przy którym lina tworzy pętlę w kształcie litery U. Porównanie obliczeń teoretycznych szerokości pętli z wynikami badań modelowych i eksploatacyjnych przedstawiono w tablicy 7. Wyniki te są bardzo zbieżne. Dla przykładu w tablicy 8 zestawiono wymagania w różnych krajach dotyczące minimalnej wartości parametru h/d zapewniającego kształt pętli w postaci litery U. Wykorzystując wyniki badań podane w tablicy 7 można skorygować wzór teoretyczny /25/ na obliczanie szerokości pętli liny przez zastosowanie współczynnika podobieństwa geometrycznego kształtu pętli liny k, który określony jest



Rys.16. Wykresy: a-częstości stosowanych średnic lin wyrównawczych okrągłych i stosunku rozstawu osi naczyń wyciągowych h do średnicy liny d czyli h/d, b-wartości długości liny minimalnej l_{min}

Tablica 6

Wartości stosunku (pomierzonej w szybie w stanie statycznym) szerokości pętli liny wyrównawczej płaskiej h_s do jej grubości b, x - liny płaskie nitowane

Lp.	Konstrukcja liny	Wymiary axb mm	Liczba lin szt	Zakres $\frac{h_s}{b}$
1	6x4x7x2,0	90x22	1	86,4
2	8x4x7x2,0	120x23	4	65,2 - 82,6
3	8x4x12x1,8	135x23	2	82,6 - 84,8
4	8x4x7x2,2	136x26	2	77 - 84
5	8x4x7x2,3	139x27	2	70,4 - 73,3
6	8x4x9+32A_o	174x34	5	53 - 70
7	8x4x14x2,1	180x32	4	46,9 - 62,5
8	8x4x14x2,2	187x31	1	74,2
9	8x4x10+32A_o	188x33	2	60,6 - 63,6
10	8x4x14x2,2	189x33	7	51,5 - 75,6
11	8x4x10+32A_o	196x34	3	44 - 61,8

Tablica 7

Porównanie wyników badań szerokości pętli z obliczeniami teoretycznymi

Konstrukcja, średnica d lub grubość b liny $x10^{-3}m$	Parametr h_s/d lub h_s/b			
	obliczony teoretycznie	z pomiarów w szybach	z pomiarów modelowych	propozycja autora do normatywów
GIG 34 - 53	58 - 46	60 - 47	53 - 48	40 /35/
GIG 55 - 67	46 - 41	45 - 35	39 - 35	40 /35/
33x7+A_o 45 - 57	59 - 53	47 - 38	47	45 /40/
płaskie szyte	-	44 - 86	60 - 74	60 /55/

Tablica 8

Wartości stosunku rozstawu h osi zawieszeń końców liny wyrównawczej okrągłej do jej średnicy d według wymagań instrukcji projektowania urządzeń wyciągowych oraz według danych koncesyjnych, pomiarów w szybach i badań modelowych. Uwaga: w Szwecji, Wielkiej Brytanii, Kanadzie, USA, Rep. Płd. Afryki wymaga się, aby stosowane konstrukcje lin wyrównawczych tworzyły w szybie w stanie statycznym pętle o szerokości minimum odpowiadającej kształtowi litery U, x - liny konstrukcji przeciwzwitej

Lp.	Kraj	Konstrukcja liny	Zakres średnic liny d, mm	Stosunek h/d według instrukcji norm lub katalogu lin minimum	według danych z dokumentacji urządzeń wyciągowych	z pomiarów szerokości pętli lin w szybach	z badań modelowych litera U
1	Polska	$18x7+A_o$	25÷32	25	-	-	przyjęto 65
2		$18x12+A_o$	34÷44		40÷28	47÷43	55÷44
3		$18x16+A_o$	46÷60		35÷20,8	43÷35	49÷40
4		$18x19+A_o$	62÷67		25÷19,2	37÷32	46÷39
5		$33x7+A_o$	41÷57		33÷28	47÷41	53÷43
6	Czechosłowacja	$18x14+A_o$	35÷56	30	32÷28,6	48,5÷37,5	50÷45
7		$18x19+A_o$					45÷40
8	Wielka Brytania firma British Rope Limited	$14x6+11x6+4x19+A_o$	35÷40	30	40÷29	-	-
9		$17x6+13x6+6x19+A_o$	44÷70	30			
10		$20x6+17x6+13x6+6x19+A_o$	44÷76	25			
11	Wielka Brytania firma Latch and Batchelor Limited	18x7 oraz 17x7	32÷40	55		-	55
12		Seale - $18x17+A_o$	38÷48	48		-	48
13		Seale $18x19+A_o$	41÷56	45		-	45
14		$34x7+A_o$	41÷56	45		-	45
15		Filler $18x25+A_o$	51÷67	40		-	40
16		Seale $34x17+A_o$	51÷67	35		-	35
17	Stany Zjednoczone Ameryki Płn.	$18x19+A_o$	dowolny	30	-	-	30
18		$34x7+A_o$		46	-	-	46
19		$18x7+A_o$		60	-	-	60
20		$6x7+A_o$ x		90	-	-	90
21	Kanada	$34x7+A_o$	dowolny	46	90 - 30	-	46
22		$18x7+A_o$		60		-	60
23		$6x7+A_o$ x		90		-	90
24	Republika Południowej Afryki	liny 2, 3 i 4-ro warstwowe nieodkrętne	dowolny	35 jeżeli są koła kierujące w rząpiu	147÷4.7	kształt litery U	- -
25				45 jeżeli brak kół kierujących w rząpiu			
26	Szwecja	liny wielowarstwowe nieodkrętne	dowolny	kształt litery U	80÷70	kształt litery U	-

zależnością:

$$k = \frac{EI}{h^3 q} \qquad /28/$$

gdzie: h, q, EI - oznaczenia jak poprzednio.

Z badań modelowych i eksploatacyjnych szerokości pętli lin wyrównawczych wartości doświadczalne współczynnika k wynoszą:

- dla lin wyrównawczych płaskich k = 0,071 - 0,08,
- dla lin wyrównawczych okrągłych dwuwarstwowych typu GIG k=0,055-0,064,
- dla lin wyrównawczych okrągłych trzywarstwowych konstrukcji 33x7+A_o i 34x7+A_o k = 0,05 - 0,06

Wzór /28/ po przekształceniach możemy zapisać w postaci:

$$h = \sqrt[3]{\frac{EI}{kq}} = A \cdot \sqrt[3]{\frac{EI}{q}}, \text{ m} \qquad /29/$$

gdzie: $A = \sqrt[3]{\frac{1}{k}}$ - oznaczenie pomocnicze

dla k = 0,050 oznaczenie A = 2,71
k = 0,055 oznaczenie A = 2,63
k = 0,060 oznaczenie A = 2,55
k = 0,065 oznaczenie A = 2,48
k = 0,070 oznaczenie A = 2,43
k = 0,075 oznaczenie A = 2,37
k = 0,080 oznaczenie A = 2,32

Po wykorzystaniu powyższych danych poprawiony wzór /25/ na obliczenie szerokości pę tli lin wyrównawczych różnych konstrukcji wynosi:

- dla lin wyrównawczych płaskich stalowych szytych

$$h = 2{,}37 \sqrt[3]{\frac{EI}{q}}, \text{ m} \qquad /30/$$

- dla lin wyrównawczych okrągłych dwuwarstwowych typu GIG

$$h = 2{,}55 \sqrt[3]{\frac{EI}{q}}, \text{ m} \qquad /31/$$

- dla lin wyrównawczych okrągłych trzywarstwowych konstrukcji 33x7+A_o i 34x7+A_o

$$h = 2{,}65 \sqrt[3]{\frac{EI}{q}}, \text{ m} \qquad /32/$$

Z przeprowadzonych badań wynika również, że maksymalna szerokość pętli lin wyrównawczych w stanie statycznym h_s występuje w odległości /0,7÷1/.h_s od najniższego punktu pętli liny.

Drugim ważnym wymiarem pętli liny jest jej wysokość. Z analizy minimalnych długości zwisających odcinków lin wyrównawczych pod naczyniem wyciągo-

wym, kiedy znajduje się ono w najniższym położeniu w szybach wynika, że w wyciągach krajowych l_m = 5-26 m, a najczęściej l_m = 11-14 m. Długość odcinka liny z zaciskami pod naczyniem wynosi l_z = 2,5 - 4m. Z pomiarów w szybie wynika, że wysokość "gruszki", to znaczy wyraźnego jej poszerzenia, wynosi 8 do 10 m dla lin wyrównawczych okrągłych. Pomiędzy początkiem tworzenia się "gruszki" a ostatnim zaciskiem na linie powinien istnieć pionowy odcinek liny l_{pz}, powinien być równy co najmniej wysokości "gruszki". Uwzględniając powyższe oraz długość liny w zaciskach l_z= 3-4 m, l_{pz}=8-10m otrzymamy, że minimalna długość odcinka liny okrągłej pod naczyniem winna wynosić:

$$l_{min} = l_g + l_z + l_{pz} = (8-10) + (3-4) + (8-10) = (19-24)\ m \qquad /33/$$

Biorąc jako wartość odniesienia l_{min} = 19-24 m możemy stwierdzić, że w 85% krajowych urządzeń wyciągowych wartość ta jest znacznie mniejsza i wynosi 11-14m. Tak krótki odcinek utrudnia nie tylko obracanie się końca liny w zawiesiu, ale powoduje to, że pętla liny zaczyna się tworzyć już pod ostatnim zaciskiem na linie, co sprzyja powstawania niesymetrycznego jej kształtu i pękaniu drutów liny pod zaciskiem.

W przypadku lin wyrównawczych płaskich otrzymano z dokumentacji wyciągów l_{min} = 10-38m, a najczęściej l_{min}= 10-17 m, l_z = 2,0 - 4,5 m oraz wysokość "gruszki" lg = 3,5-6m. Uwzględniając powyższe oraz l_{pz}=3,5-6m otrzymamy, że minimalna długość zwisającej liny pod naczyniem winna wynosić w zależności od wymiarów liny płaskiej:

$$l_{min.pł} = l_g + l_z + l_{pz} = (3,5-6) + (2,0-4,5) + (3,5-6) = (9-16,5)\ m \qquad /34/$$

Ze wzoru /34/ wynika, że w przypadku lin wyrównawczych płaskich wymagane wielkości $l_{min.pł}$ są zgodne ze stosowanymi w praktyce, gdzie najczęściej l_{min} = 10-17m.

W kilku przypadkach pomierzono szerokości pętli lin wyrównawczych okrągłych h_d podczas ruchu naczyń wyciągowych w szybach. Parametr $\frac{h_d}{d}$ jest większy od parametru $\frac{h_s}{d}$ o wartość $\Delta \frac{h_s}{d}$ =4 - 6, czyli szerokość pętli wzrasta o 1[illegible]-18% w stosunku do szerokości pętli w stanie statycznym. Podczas rozruchu lub hamowania promieniowe i styczne siły bezwładności powodują wychylenia pętli liny, natomiast podczas ruchu ustalonego zanika styczna siła bezwładności w pętli liny, a istnieją składowe poziome od sił odśrodkowych działające na gałęzie liny w pętli. Siły odśrodkowe działające na obie połowy pętli w ruchu ustalonym równoważą się i nie mogą doprowadzić do poprzecznego ruchu całej pętli. Przy równoważeniu się tych sił [illegible] jak naciąg liny w punkcie jej nawrotu /w najniżej położonym

punkcie pętli/, w wyniku czego występuje poszerzenie się szerokości pętli i podniesienie do góry najniższego punktu pętli liny, co przedstawiono na rys.13.

5. WNIOSKI

1. Analiza teoretyczna kształtu pętli lin wyrównawczych z uwzględnieniem jej sztywności na zginanie wykazała, że dla celów projektowych można obliczyć jej szerokości z dużym przybliżeniem za pomocą wzoru /25/ lub bardzo dokładnie za pomocą poprawionych na podstawie badań modelowych i eksploatacyjnych wzorów /30/,/31/ i /32/.
2. Z przeprowadzonych badań modelowych i pomiarów w szybach szerokości pętli lin wynika bardzo duża ich zgodność. Wynika z tego, że do określania rzeczywistych wymiarów pętli lin wyrównawczych wystarczające są jako znacznie łatwiejsze badania modelowe na stanowisku laboratoryjnym.
3. Przeprowadzone pomiary i obserwacje kształtu pętli lin wyrównawczych w szybach krajowych wykazały, że liny wyrównawcze tworzą w prawie 90% pętle o kształcie "gruszki", której szerokość h_s znacznie przekracza rozstaw h osi zawieszeń lin pod naczyniami wyciągowymi.
4. Badania wykazały, że pętle o największej szerokości i wysokości tworzą liny wyrównawcze okrągłe trzywarstwowe konstrukcji $33x7+A_o$, przypuszczalnie również i nowe liny konstrukcji $34x7+A_o$, a następnie liny okrągłe dwuwarstwowe typu GIG. Najmniejsze rozmiary pętli wykazują liny płaskie stalowe szyte i nitowane. Przypuszcza się jednak, że najmniejsze szerokości pętli wystąpią w przypadku stosowania lin nowych konstrukcji lin wyrównawczych płaskich stalowo-gumowych.
5. W celu zapewnienia w szybach kształtu pętli lin wyrównawczych zbliżonych do litery U odpowiadającej naturalnemu promieniowi zginania należy stosować odpowiedni stosunek rozstawu osi zawieszeń lin h do średnicy liny d lub grubości liny płaskiej b, który dla lin konstrukcji krajowej wynosi co najmniej :
   - dla lin wyrównawczych okrągłych dwuwarstwowych typu GIG $\frac{h}{d}=35$,
   - dla lin wyrównawczych okrągłych trzywarstwowych konstrukcji $34x7+A_o$ i $33x7+A_o$ - $\frac{h}{d} = 40$,
   - dla lin wyrównawczych płaskich szytych i nitowanych - $\frac{h}{b} = 55$.

   Wartości te są znacznie większe od obecnie zalecanej w kraju wartości 25 dla wszystkich rodzaji konstrukcji lin wyrównawczych.

6. Z przeprowadzonych badań wynika, że minimalna długość zwisającej liny wyrównawczej pod naczyniem winna wynosić:
   - w przypadku liny okrągłej l_{min} = 19 - 24 m.
   - w przypadku liny płaskiej stalowej l_{min} = 8 - 16 m.
7. Konstrukcje stacji zwrotnych dla lin wyrównawczych należy projektować z uwzględnieniem rzeczywistego kształtu pętli liny, który uwzględnia parametr $\frac{h}{d}$ lub $\frac{h}{b}$ podany we wniosku 5, a nie błędna wartość $\frac{h}{d}$ = 25.
8. Celowe byłoby opracowanie w kraju wytycznych doboru lin wyrównawczych i projektowania stacji zwrotnych z uwzględnieniem własności mechanicznych lin, takich jak sztywność liny na zginanie, rozciąganie i współczynnik odkrętności oraz parametrów pracy i wymiarów charakterystycznych urządzenia wyciągowego.

Literatura

1. Carbogno A.: Wpływ rozstawu naczyń wyciągowych, zawiesi i własności mechanicznych liny wyrównawczej okrągłej na jej pracę w górniczych urządzeniach wyciągowych. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1983.
2. Carbogno A.: Badanie kształtu pętli lin wyrównawczych w szybach. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1990 /w druku/.
3. Carbogno A.: Koncepcje rozwiązań stacji zwrotnych. Praca naukowo-badawcza. Instytut Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice 1984.
4. Carbogno A, Czaja J.: Badania eksploatacyjne i modelowe kształtu pętli oraz własności mechanicznych lin wyrównawczych. Praca naukowo-badawcza Instytut Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice 1983.
5. Carbogno A, Czaja J.: Badanie kształtu nawrotu liny wyrównawczej w rząpiu. Międzynarodowe Sympozjum "Jak bezpieczna jest lina. OIPEC, AGH, GIG. Kraków - Katowice, 24-26.06.1981.
6. Pocztowienko I.E. Tierlecki I.W.: O formie pętli urawnowesiwajaszczewo kanata z uczetom jego izgobnoj żestkosti. Sb. Stalnyje kanaty. Izd. Tiechnika. Kijew 1965.
7. Popow E.P.: Tieorija i raszczet gibkich uprugich stierżniej. Izd. Nauka Moskwa 1986.
8. Tierleckij I.W.: O wieliczinie keoficyienta podobia formy pętli urawnowesiwajuszczego kanata. Sb. Stalnyje kanaty. Izd. Tiechnika. Kijew. 1966.

9. Tieleckij I.W.: K woprosu opriedielenija maksimalnych razmierow petli urawnowesiwojuszczego kanata w staticzeskom sostojani. Pieriedowoj opyt w stroitielstwie i ekspluatacyji. szacht. Izd. Nedra. Moskwa 1966.

Recenzent: Doc. dr inż. Tadeusz Zmysłowski

Wpłynęło do Redakcji w październiku 1990r

THEORETICAL ANALYSIS, MODEL AND OPERATION INVESTIGATIONS OF A FREE LOOP IN BALANCE ROPE

S u m m a r y

In the paper theoretical analysis of balance rope free loop is considered, especially along its width. The pattern derivation for the width of loop in static state is shown. The rigidity of bending loop is taken into account. The laboratory stand for the model investigation of the loop is described together with procedure of the investigation. In the field tests carried out in mine shafts, concerning the measurement of the loop of balance ropes are described. Comparison analysis between theoretical results with empirical ones is made. Finally, a set of formulas to determine width of balance roope loop as the function of rope construction is shown.

Теоретический анализ и модельные и эксплуатационные исследования формы петли уравновешивающего каната

Резюме

В реферате представлен теоретический анализ формы петли уравновешивающего каната, а особенно ее ширины. Дан способ получения формулы для расчета петли каната в статическом состоянии с учетом ее жесткости при изгибе. Обсужден испытательный стенд и способ модельных исследований формы петли, а также представлены результаты измерений ширины петли канатов в шахтных стволах. Теоретически вычисленные ширины петли канатов сравнены с результатами исследований на стенде и в шахтах. На основе сделанных сравнений предложены формулы для расчетов ширины петли канатов в стволах в зависимости от их конструкции.