

## Практична робота 2

### Визначення статичних та динамічних опорів механізмів гірничо-металургійних комплексів

#### 1. Конвеєрний транспорт

##### Прямолінійна ділянка

Прямолінійною ділянкою стрічкового конвеєра вважають відрізок між двома точками дотику на сусідніх роликах.

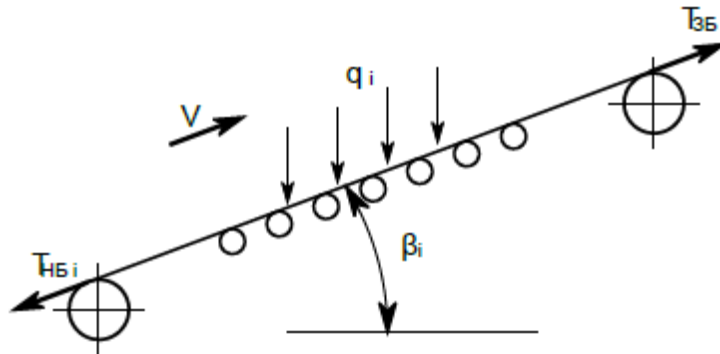


Рис. 1. Розрахункова схема лінійної нахиленої ділянки

$T$  — сила натягу стрічки в точці, що набігає, [Н];

$T_{збі}$  — сила натягу стрічки в точці, що збігає, [Н];

$q_i$  — питоме навантаження, що припадає на 1 метр конвеєра [Н м];

$\beta_i$  — кут нахилу ділянки конвеєра до горизонту.

$$T_{збі} = T_{нбі} + \Delta F_{пi}, [Н];$$

$\Delta F_{пi}$  — сила опору руху на прямолінійній ділянці:

$$\Delta F_{пi} = q_i L_i (C_{пi} \cos \beta_i \pm \sin \beta_i), [Н];$$

$L$  — довжина прямолінійної ділянки конвеєра, [м]

$C_{пi}$  — результуючий коефіцієнт опору руху на прямолінійній ділянці:

$$C_{пi} = k_{пi} \left( \mu \frac{d}{D} + \frac{2f}{D} \right),$$

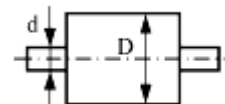


Рис. 2. Ілюстрація до пояснення

$k_{пi} = 1, 1, \dots, 1, 3$  — коефіцієнт запасу;

$D$  — діаметр катка, [м];

$d$  — діаметр цапф катків, [м];  
 $\mu$  — коефіцієнт тертя в підшипниках катків та роликів;  
 $f$  — коефіцієнт тертя кочення між катками і стрічкою.  
 При русі на підйом  $\sin\beta > 0$  при русі на спуск  $\sin\beta < 0$ .

Ділянка вигину

Ділянкою вигину вважається криволінійний відрізок стрічки, який обхоплює ролик від точки набігання до точки збігання. Довжина ділянки визначаються кутом обхвату  $\alpha$ .

$G$  — вага катка, [Н];

$\alpha$  — кут обхвату стрічкою катка на ділянці вигину.

Натяг на збігаючому боці:

$$T_{збі} = T_{нбі} + \Delta F_{ві}, [Н];$$

де  $\Delta F_{ві}$  — сила опору руху на ділянці вигину:

$$\Delta F_{ві} = \xi T_{нбі} + N \mu \frac{d}{D}, [Н]$$

де  $N$  — рівнодіюча сила реакції катка;

$\xi$  — коефіцієнт опору від вигину тягового елемента.

З трикутника векторів за теоремою косинусів знаходимо  $T_{\Sigma}$ :

$$T_{\Sigma} = T_{збі}^2 + T_{нбі}^2 - 2T_{збі} T_{нбі} \cos\alpha, [Н].$$

Для визначення сили  $N$  вважаємо, що  $T_{збі} \approx T_{нбі}$  і нехтуємо вагою катка  $G$ , так як зазвичай  $G \ll T_{нбі}$ .

$$T_{\Sigma} \approx T_{нбі} \cdot 2(1 - \cos\alpha) = 2T_{нбі} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right);$$

$$T_{\Sigma} \approx N, \text{ тоді } T_{збі} = C_{зі} T_{нбі},$$

де  $C_{зі}$  — результуючий коефіцієнт опору руху на ділянці вигину:

$$C_{зі} = \xi + 2\mu \frac{d}{D} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right);$$

$$T_{збі} = T_{нбі} + C_{зі} T_{нбі} = (1 + C_{зі}) T_{нбі} = k_{зі} T_{нбі}$$

$k_{зі} = (1 + C_{зі})$  — коефіцієнт збільшення натягу на ділянці вигину.

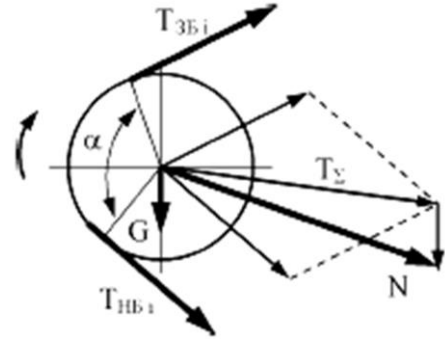


Рис. 3. Розрахункова схема ділянки вигину

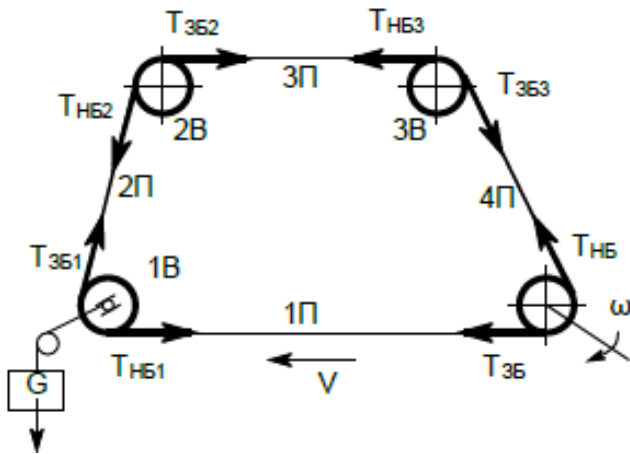


Рис. 4. Розрахункова схема конвеєра

$$\begin{aligned}
 T_{нб1} &= T_{зб} + \Delta F_{П1} ; \\
 T_{зб1} &= T_{нб1} \cdot k_{\epsilon 1} ; \\
 T_{нб2} &= T_{зб1} + \Delta F_{П2} ; \\
 T_{зб2} &= T_{нб2} \cdot k_{\epsilon 2} ; \\
 T_{нб3} &= T_{зб2} + \Delta F_{П3} ; \\
 T_{зб3} &= T_{нб3} \cdot k_{\epsilon 3} ; \\
 T_{нб} &= T_{зб3} + \Delta F_{П4} .
 \end{aligned}$$

Зазвичай коефіцієнти  $C_{Пi}$ ,  $C_{Bi}$  не розраховують, а беруть експериментально визначені значення з довідників.

Сили опору руху  $\Delta F_{Пi}$ ,  $\Delta F_{Bi}$  збільшують натяг стрічки на кожній ділянці.

Результуюча сила опору руху визначається як сума сил опору всіх ділянок конвеєра. Враховуючи, що силу опору руху повинен долати приводний елемент, при усталеному русі конвеєра статичне навантаження привода можна визначити як різницю натягів стрічки на приводному барабані:

$$F_{СТ} = T_{нбi} - T_{збi} .$$

Припустимо, що відомий натяг в точці збігання приводного барабана  $T_{зб}$ , тоді шляхом послідовного розрахунку натягу стрічки на кожній ділянці конвеєра за наведеними вище формулами можливо визначити величину  $T_{нб}$ .

$$\begin{aligned}
 T_{нб} &= T_{нб3} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П4} = T_{зб2} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П3} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П4} = \\
 &= T_{нб2} k_{\epsilon 2} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П3} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П4} = \\
 &= T_{зб1} k_{\epsilon 2} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П2} k_{\epsilon 2} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П3} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П4} = \\
 &= T_{нб1} k_{\epsilon 1} k_{\epsilon 2} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П2} k_{\epsilon 2} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П3} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П4} = \\
 &= T_{зб1} k_{\epsilon 1} k_{\epsilon 2} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П1} k_{\epsilon 1} k_{\epsilon 2} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П2} k_{\epsilon 2} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П3} k_{\epsilon 3} + \Delta F_{П4} .
 \end{aligned}$$

Отриманий вираз для  $T_{нб}$  в згорнутій формі має вигляд:

$$T_{нб} = T_{зб} K_{\epsilon} + F_{П} .$$

де  $K_{\epsilon} = \prod_{i=1}^{n-1} k_{\epsilon i}$  — результуючий коефіцієнт збільшення натягу від всіх ділянок вигину стрічки;

$$F_{II} = \sum_{i=1}^{n-1} \left( \Delta F_{IIi} \prod_{i=1}^{n-1} k_{\epsilon i} \right) + \Delta F_{IIl} \quad \text{— результуюча сила опору руху на}$$
 прямолінійних ділянках.

Об'єднуючи наведені вирази, отримаємо статичне навантаження приводу:

$$F_{CT} = (K_{\epsilon} - 1) T_{зб} + F_n.$$

Значення  $T_{зб}$  заздалегідь невідоме і має бути визначене з додаткових умов.

За умовами роботи конвеєра регламентовані максимально допустимий провис стрічки і максимально можливе відношення  $T_{НБ}/T_{зб}$  для тягового органу, фрикційно з'єданого з приводним барабаном. Для виконання цих умов у тяговому органі (стрічці) за допомогою натяжного пристрою має бути забезпечений певний попередній натяг  $T_0$ .

Для стрічкових і канатних конвеєрів на  $T_{НБ}$  і  $T_{СБ}$  накладається умова Ейлера, що виключає пробуксовування тягового елемента щодо приводного барабана:

$$\frac{T_{НБ}}{T_{зб}} < e^{\mu\alpha_{II}},$$

де  $\alpha_{II}$  — кут обхвату стрічкою конвеєра приводного барабана, [рад];  
 $\mu$  — коефіцієнт тертя між стрічкою і приводним барабаном,  $\mu=0,1\dots0,3$ ).  
 Підставляючи в цю умову вираз для  $T_{НБ}$ , отримаємо:

$$T_{зб} < \frac{F_{II}}{e^{\mu\alpha_{II}} - K_{\epsilon}}.$$

Оптимальним місцем розташування натяжної станції є точка з мінімальним натягом стрічки  $T_0$ . У цьому випадку від натяжної станції потрібне мінімальне зусилля  $G$ .

Для заданої кінематичної схеми конвеєра мінімальний натяг стрічки  $T_0$  дорівнює натягненню стрічки в точці набігання натяжного барабана:

$$T_0 = T_{нб1} = T_{зб} + F_{II1}.$$

Щоб створити такий попередній натяг стрічки, необхідно використовувати вантаж, вага якого визначається як геометрична сума натягів стрічки в точці, що набігає та в точці, що збігає натяжного барабана:

$$G = T_0 \sqrt{1 + k_{\epsilon 1}^2 - 2k_{\epsilon 1} \cos \alpha_H}, \text{ [Н]}.$$

де  $\alpha_H$  — кут обхвату стрічкою конвеєра натяжного барабана.

### Розрахунок динамічних навантажень

У процесі пуску конвеєра виникають додаткові динамічні навантаження привода, обумовлені рухомими масами самого конвеєра і його приводної станції.

На кожній прямолінійній ділянці конвеєра при пуску додатково збільшується натяг стрічки відповідно до формули:

$$T_{збi} = T_{нбi} + \Delta F_{\epsilon i} + m_i a_{\Pi}, \quad m_i = \frac{q_i L_i + 4 J_P}{g D_P^2},$$

де  $m_i$  — рухома маса однієї прямолінійної ділянки спільно з масою попередньої ділянки вигину, [кг]

$a_{\Pi}$  — допустиме прискорення конвеєра при пуску, [м/с<sup>2</sup>];

$J_P$  — момент інерції одного ролика (катка), [кг·м<sup>2</sup>];

$D_P$  — діаметр одного ролика (катка), [м];

$g$  — прискорення вільного падіння,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>.

При розрахунку слід врахувати, що момент інерції приводного барабана не впливає на збільшення натягу стрічки конвеєра:

$$m_i = \frac{q_i L_i}{g}$$

Отже, результуючий натяг стрічки в точці, що набігає, приводного барабана при пуску збільшиться порівняно зі статичним режимом роботи конвеєра:

$$T_{нб} = T_{зб} K_{\epsilon} + F_{\Pi} + m_{\Sigma} a_{\Pi},$$

$$m_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n-1} \left( m_i \prod_{j=1}^{n-1} k_{\epsilon j} \right) + m_n,$$

де  $m_{\Sigma}$  — розрахункова сумарна маса, [кг]

Отже, умова Ейлера має бути скоригована таким чином:

$$T_{зб} > \frac{F_{\Pi}}{e^{\mu a_{\Pi}}} + m_{\Sigma} a_{\Pi} K_{\epsilon}$$

Таким чином, динамічні навантаження при пуску конвеєра можуть істотно підвищити як максимальний натяг стрічки, так і необхідне значення попереднього натягу  $T_0$ . Щоб виключити високий рівень  $T_0$ , в сталому режимі для великих конвеєрів застосовують допоміжну станцію натягу, який створює додатковий натяг тільки на період пуску конвеєра.

### Визначення потужності. Місце розташування приводної станції

Потужність приводної станції конвеєра для тривалого режиму роботи  $P_C$  визначається відповідно до розрахованого статичного навантаження  $F_{CT}$  і заданою швидкістю руху конвеєра  $V$ .

$$P_C = k_3 \frac{F_{CT} V}{\eta_p}, [\text{Вт}]$$

де  $k_3$  — коефіцієнт запасу, враховує неточності розрахунку сили опору руху,  $k_3=1,1-1,3$ ;

$V$  — швидкість руху конвеєра, [м/с]

$\eta_p$  — ККД редуктора приводної станції,  $\eta_p=0,88-0,92$ .

Номинальна потужність двигунів вибирається з умови:

$$P_{ном} \geq P_C.$$

Приводну станцію доцільно розташовувати в такій точці траси конвеєра, яка забезпечувала б мінімум натягу стрічки як максимального, так і середнього по всьому контуру. Ця умова відповідає також мінімально можливому перетину стрічки і найменшому статичному навантаженню приводу. Таке розташування приводної станції вважається оптимальним.

Для загального випадку конвеєрної траси зі складною конфігурацією визначити заздалегідь однозначно оптимальне місце розташування приводу не вдається. У цьому випадку розглядається декілька варіантів розташування приводної станції і приймається той з них, для якого натяг стрічки виявиться найменшими.

Правила вибору місця розташування приводної станції

1. В односекційному конвеєрі (складається з однієї робочої і однієї холостої гілки) привод розташовується в кінці робочої ділянки;
2. В односекційному конвеєрі, який працює на спуск вантажу, станція розташовується на початку робочої ділянки;
3. Якщо в конвеєрі кілька робочих ділянок, станція розташовується або в кінці найбільш важкої ділянки, або на початку найдовшої холостої гілки.

Для конвеєрів значної протяжності і з великою кількістю важких робочих ділянок може виявитися, що навіть оптимальне розташування приводної станції на трасі не забезпечує зниження максимального натягу до допустимого рівня. У такому випадку односекційний конвеєр замінюють багатосекційним або встановлюють декілька приводних станцій.

Порядок розрахунку з декількома приводними станціями:

1. Визначаємо сили опору руху на кожній з ділянок.
2. Знаходимо значення  $T_{ЗБ}$ ,  $T_{НБ}$ ,  $F_{CT}$ .
3. Визначаємо натяг на кожній ділянці конвеєра.

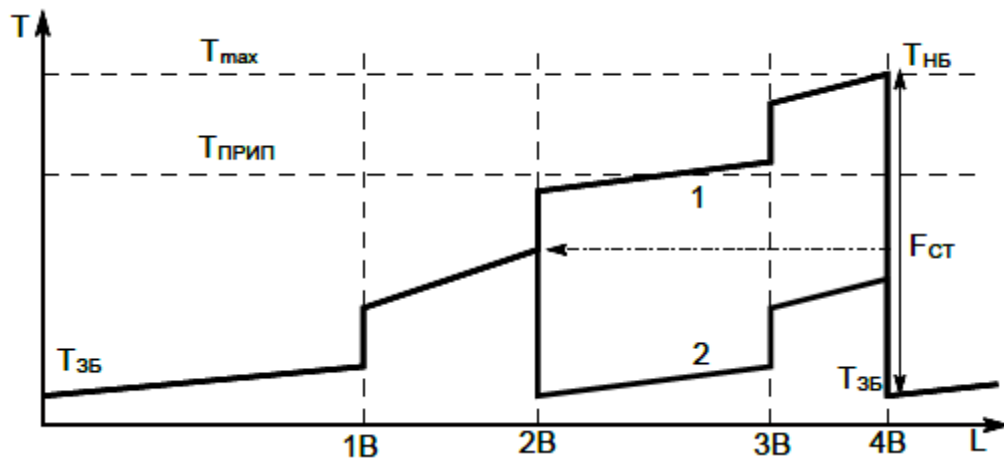


Рис. 5. Діаграма зусиль за кінематичною схемою конвеєра

4. Будуємо діаграму натягу стрічки вздовж траси конвеєра для випадку з однією приводною станцією (залежність 1 на рис.5)

5. Так як  $T_{max} > T_{прип}$ , то для зниження значення  $T_{max}$  замість однієї приводної станції застосуємо кілька, число яких визначимо так:

$$n \geq \frac{F_{СТ}}{T_{прип} - T_{зб}}$$

6. Припускаємо, що приводи строго ідентичні, і кожен з них розвиває зусилля  $F_{СТ}/n$ .

7. Нові приводи повинні бути рознесені трасою конвеєра так, щоб максимальний натяг стрічки обмежувався значенням:

$$T_{max} = T_{зб} + \frac{F_{СТ}}{n} \leq T_{прип}$$

8. Це завдання вирішується графічним шляхом. Відрізок  $F_{СТ}$  ділиться на  $n$  рівних частин, і через точки поділу відрізка проводяться прямі, паралельні осі абсцис, до перетину з діаграмою натягу. Точкам перетину на осі абсцис відповідають місця розташування нових приводних станцій (на рис. 5 точка 2В).

9. Проводять перевірочний перерахунок діаграми натягу стрічки із збільшеною кількістю приводних станцій (крива 2 на рис. 5).

Зазвичай місця розташування приводних станцій заздалегідь визначають з виробничо-конструктивних міркувань і погоджують із передбаченими на трасі ділянками вигину. Розрахунок діаграми натягу при цьому носить перевірочний характер з метою визначення максимального натягу.

## Приклад розрахунку Конвеєра.

### Вхідні дані проектування:

Довжина ділянок за розрахунковою схемою, м

$$L1 := 15 \quad L2 := 6 \quad L3 := 10 \quad L4 := 7$$

Кут нахилу ділянок за розрахунковою схемою, рад

$$\beta_0 := \frac{\pi}{180} \quad \text{Параметр переводу кута у радіани}$$

$$\beta_1 := 0 \quad \beta_2 := 78.5 \cdot \beta_0 \quad \beta_3 := 5 \cdot \beta_0 \quad \beta_4 := 57.1 \cdot \beta_0$$

$m_c := 10$  Маса метра стрічки, кг

$m_b := 48$  Маса вантажу на метрі стрічки, кг

$V := 1$  Швидкість руху стрічки, м/с

$a := 0.25$  Прискорення руху стрічки, м/с<sup>2</sup>

$D_p := 0.3$  Діаметр роликів та барабанів, м

$J_p := 1.2$  Момент інерції роликів, кг м<sup>2</sup>

$g := 9.8$  прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>

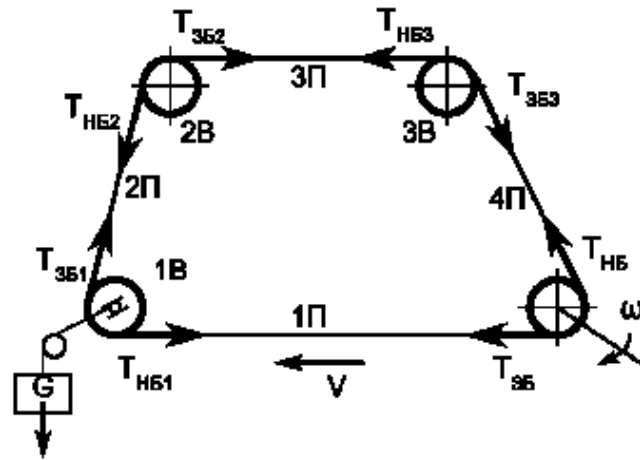


Рис.1. Розрахункова кінематична схема

$C_{\pi} := 0.02$  Коефіцієнт опору лінійної ділянки

$C_b := 0.05$  Коефіцієнт опору ділянки вигину

$\mu := 0.2$  Коефіцієнт тертя між робочими поверхнями

$\eta := 0.9$  ККД редуктора

### 1. Зусилля опору руху на лінійних ділянках руху.

$$\Delta F_{\pi 1} := m_c \cdot g \cdot L1 \cdot (C_{\pi} \cos(\beta_1) - \sin(\beta_1)) \quad \Delta F_{\pi 1} = 29.4 \quad \text{Н}$$

$$\Delta F_{\pi 2} := m_c \cdot g \cdot L2 \cdot (C_{\pi} \cos(\beta_2) + \sin(\beta_2)) \quad \Delta F_{\pi 2} = 578.54 \quad \text{Н}$$

$$\Delta F_{\pi 3} := (m_c + m_b) \cdot g \cdot L3 \cdot (C_{\pi} \cos(\beta_3) + \sin(\beta_3)) \quad \Delta F_{\pi 3} = 608.641 \quad \text{Н}$$

$$\Delta F_{\pi 4} := (m_c) \cdot g \cdot L4 \cdot (C_{\pi} \cos(\beta_4) - \sin(\beta_4)) \quad \Delta F_{\pi 4} = -568.527 \quad \text{Н}$$

### 2. Коефіцієнт збільшення натягу усіх ділянок вигину.

$$K_{b1} := 1 + C_b \quad K_{b1} = 1.05$$

$$K_{b2} := K_{b1} \quad K_{b3} := K_{b1}$$

### Інтегральний коефіцієнт збільшення натягу ділянок вигину.

$$K_b := K_{b1} \cdot K_{b2} \cdot K_{b3} \quad K_b = 1.158$$

### 3. Інтегральне зусилля опору лінійних ділянок.

$$F_{\pi} := \Delta F_{\pi 1} \cdot K_{b1} \cdot K_{b2} \cdot K_{b3} + \Delta F_{\pi 2} \cdot K_{b2} \cdot K_{b3} + \Delta F_{\pi 3} \cdot K_{b3} + \Delta F_{\pi 4} \quad F_{\pi} = 742.421 \quad \text{Н}$$

### 4. Маса, які рухаються на лінійних ділянках.

$$m_1 := m_c \cdot L1 \quad m_1 = 150 \quad \text{кг}$$

Момент інерції привідного барабана не впливає на збільшення натягу стрічки



$$m2 := mc \cdot L2 + \frac{4 \cdot j\rho}{Dp^2} \quad m2 = 113.333 \quad \text{кг}$$

$$m3 := (mc + mв) \cdot L2 + \frac{4 \cdot j\rho}{Dp^2} \quad m3 = 401.333 \quad \text{кг}$$

$$m4 := mc \cdot L4 + \frac{4 \cdot j\rho}{Dp^2} \quad m4 = 123.333 \quad \text{кг}$$

**Сумарна вага.**

$$m\Sigma := m1 \cdot Kв1 \cdot Kв2 \cdot Kв3 + m2 \cdot Kв2 \cdot Kв3 + m3 \cdot Kв3 + m4 \quad m\Sigma = 843.327 \quad \text{Н}$$

**5. Кут охопту стрічкою привідного та натяжного барабанів.**

$$\alpha_{\text{п}} := (90 \cdot \beta_0 + \beta_4) \quad \alpha_{\text{п}} = 2.567 \quad \text{рад}$$

$$\alpha_{\text{н}} := (90 \cdot \beta_0 + \beta_2) \quad \alpha_{\text{н}} = 2.941 \quad \text{рад}$$

**6. Натяг стрічки в точці привідного барабану за умови прслизання Ейлера.**

$$Tзб := \frac{F_{\text{п}} + m\Sigma \cdot \alpha_{\text{п}}}{e^{\mu \cdot \alpha_{\text{п}} \cdot Kв}} \quad Tзб = 1503.007785 \quad \text{Н}$$

**Прийнято** 2000 Н  $Tзб := 2000$

$$Tнб := Tзб \cdot Kв + F_{\text{п}} \quad Tнб = 3057.671 \quad \text{Н}$$

**7. Визначення потужності приводу.**

$$F_{\text{сТ}} := Tнб - Tзб \quad \text{загальне зусилля опору} \quad F_{\text{сТ}} = 1057.671 \quad \text{Н}$$

$kз := 1.1$  коефіцієнт запасу потужності

$$P := kз \cdot \frac{F_{\text{сТ}} \cdot V}{\eta} \quad P = 1292.709 \quad \text{Вт}$$

**8. Визначення крапки встановлення та ваги станції натягу.**

$$Tнб1 := Tзб + \Delta F_{\text{п1}} \quad Tнб1 = 2029.4 \quad \text{Н}$$

$$T_0 := Tнб1 \quad T_0 = 2029.4 \quad \text{Н}$$

**натяжна противага**

$$G := T_0 \cdot \sqrt{1 + Kв1^2 - 2 \cdot Kв1 \cdot \cos(\alpha_{\text{п}})} \quad G = 3990.082 \quad \text{Н}$$

Побудова діаграми натягу стрічки

$$Tнб1 := Tзб + \Delta F_{\text{п1}} \quad Tнб1 = 2029.4$$

$$Tзб1 := Tнб1 \cdot Kв1 \quad Tзб1 = 2130.87$$

$$T_{H62} := T_{\varepsilon 61} + \Delta F_{\Pi 2} \quad T_{H62} = 2709.41$$

$$T_{\varepsilon 62} := T_{H62} \cdot K_{\varepsilon 2} \quad T_{\varepsilon 62} = 2844.881$$

$$T_{H63} := T_{\varepsilon 62} + \Delta F_{\Pi 3} \quad T_{H63} = 3453.521$$

$$T_{\varepsilon 63} := T_{H63} \cdot K_{\varepsilon 3} \quad T_{\varepsilon 63} = 3626.198$$

$$T_{H64} := T_{\varepsilon 63} + \Delta F_{\Pi 4} \quad T_{H64} = 3057.671$$

$$T_{\varepsilon 64} := T_{H64} - F_{cT} \quad T_{\varepsilon 64} = 2000$$

$T_0 := T_{\varepsilon 6}$	$T_0 = 2000$	$L_0 := 0$	
$T_1 := T_{H61}$	$T_1 = 2029.4$	$L_1 := L1$	$L_1 = 15$
$T_2 := T_{\varepsilon 61}$	$T_2 = 2130.87$	$L_2 := L1$	$L_2 = 15$
$T_3 := T_{H62}$	$T_3 = 2709.41$	$L_3 := L2 + L1$	$L_3 = 21$
$T_4 := T_{\varepsilon 62}$	$T_4 = 2844.881$	$L_4 := L2 + L1$	$L_4 = 21$
$T_5 := T_{H63}$	$T_5 = 3453.521$	$L_5 := L3 + L4$	$L_5 = 31$
$T_6 := T_{\varepsilon 63}$	$T_6 = 3626.198$	$L_6 := L3 + L4$	$L_6 = 31$
$T_7 := T_{H6}$	$T_7 = 3057.671$	$L_7 := L_5 + L4$	$L_6 = 31$
$T_8 := T_{\varepsilon 64}$	$T_8 = 2000$	$L_8 := L_5 + L4$	$L_8 = 38$

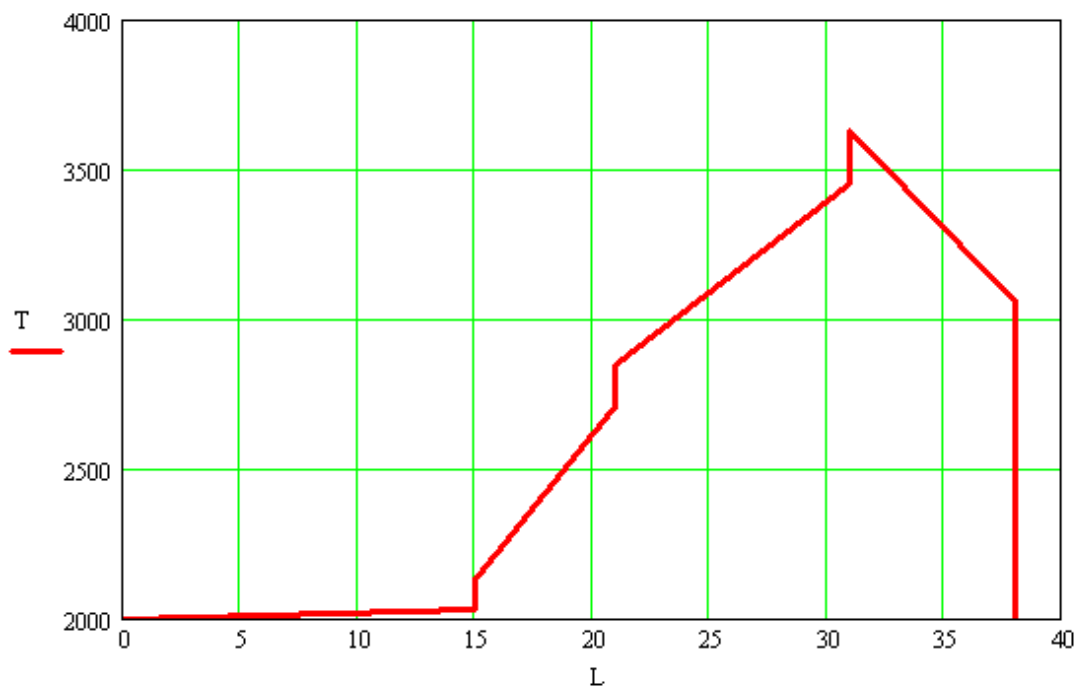


Рис.2. Залежність тягового зусилля протягом довжини конвеєра

