



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

mgr inż. Piotr Kasza

PRACA DOKTORSKA

**WPŁYW WYBRANYCH PARAMETRÓW
NA OPORY RUCHU PRZENOŚNIKA
ZGRZEBŁOWEGO RUROWEGO**

Promotor:

dr hab. inż. Kazimierz Furmanik

Kraków, 2008 r.

*Składam serdeczne podziękowania
Panu dr hab. inż. Kazimierzowi Furmanikowi
za wielką życzliwość, cenne uwagi
oraz okazaną pomoc podczas realizacji pracy*

Autor

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	4
1. Wstęp	5
2. Cel, teza i zakres pracy	8
3. Ogólna charakterystyka przenośników zgrzeblowych rurowych	10
4. Podstawy teoretyczne pracy przenośników zgrzeblowych rurowych	16
4.1. Opory ruchu warstwy materiału sypkiego w rurowej rynnie	17
4.2. Opory ruchu przenośnika na odcinku prostym	21
4.3. Opory ruchu przenośnika na łukach	22
4.3.1. Opory ruchu przenośnika na łukach poziomych.....	23
4.3.2. Opory ruchu przenośnika na łukach pionowych.....	29
5. Analiza wpływu wybranych parametrów na opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego	41
5.1. Wpływ wybranych parametrów na opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego na odcinku prostym	42
5.2. Wpływ wybranych parametrów na opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego na łukach.....	48
5.2.1. Łuki poziome	48
5.2.2. Łuki pionowe	56
6. Zagadnienie podobieństwa w badaniach oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego	61
7. Badania doświadczalne oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego	66
7.1. Badania pomocnicze	66
7.2. Badania zasadnicze	71
8. Badania na przemysłowym przenośniku zgrzeblowym rurowym.....	77
9. Analiza porównawcza wyników badań teoretycznych i doświadczalnych	88
10. Zagadnienie racjonalnego doboru wartości parametrów h i D przenośnika zgrzeblowego rurowego.....	96
11. Metoda doboru podstawowych parametrów i obliczeń oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego.....	108
12. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	112
Literatura.....	114
Spis rysunków i tabel.....	116

Wykaz ważniejszych oznaczeń

D – średnica wewnętrzna rurowej rynny [m],

d – średnica cięgna roboczego [m],

h – odstęp między zgrzeblami [m],

g_z – grubość zgrzebła [m],

R – promień łuku rurowej rynny [m],

α – kąt nachylenia rynny na odcinku prostym [°],

β – kąt łuku [°],

α_{gr} – kąt graniczny nachylenia rynny [°],

α_{grp} – kąt graniczny nachylenia przenośnika [°],

μ – współczynnik tarcia materiału transportowanego o rynnę,

μ_l – współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę,

γ_m – ciężar nasypowy transportowanego materiału [N/m³],

k – współczynnik bocznego parcia aktywnego, $k = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$,

φ – kąt tarcia wewnętrznego materiału [°],

q – ciężar jednostkowy cięgna ze zgrzeblami [N/m],

q_l – jednostkowy ciężar cięgna [N/m],

q_z – jednostkowy ciężar zgrzebeł [N/m],

v – prędkość cięgna [m/s],

Q – wydajność objętościowa przenośnika [m³/h],

n – liczba zgrzebeł znajdujących się na łuku,

i – numery kolejnych zgrzebeł na łuku,

S_0 – siła napięcia wstępnego cięgna [N],

S_i, S_i' – siły w cięgnię na łuku [N] (rys. 4.5),

w – opór przemieszczania warstwy materiału zawartej między dwoma zgrzeblami [N],

W_c – całkowity opór ruchu przenośnika [N],

Pozostałe oznaczenia objaśniono w tekście pracy.

1. Wstęp

Transport stanowi ważne i niezbędne ogniwo w wielu zakładach przemysłowych gospodarki narodowej. W obrębie przedsiębiorstwa szczególne znaczenie ma transport wewnątrzzakładowy, który musi zapewnić, na odpowiednim poziomie, przepływ surowców, półwyrobów czy gotowych produktów przez wszystkie stanowiska produkcyjne, kontrolne i magazynowe [1, 13, 14].

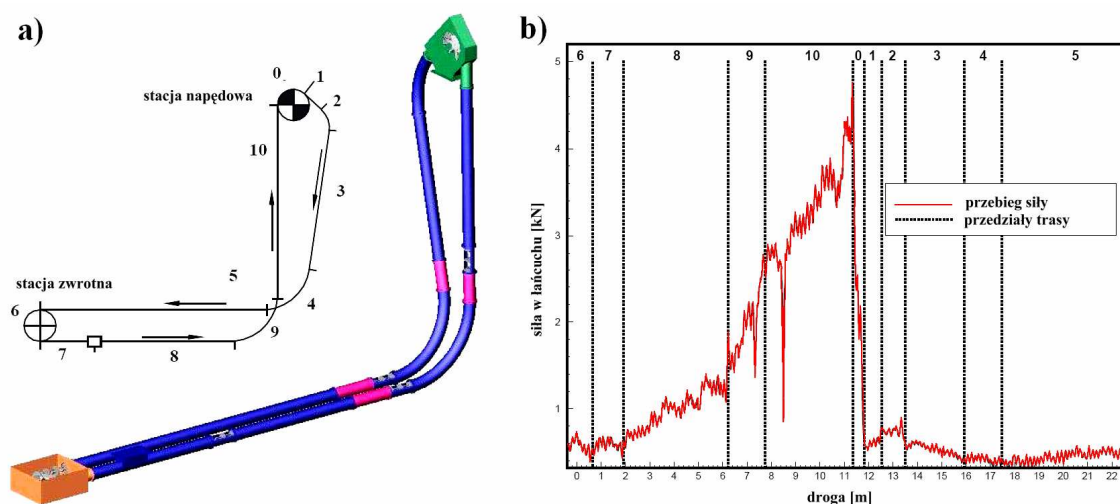
Rosną również wymagania związane z ochroną środowiska oraz bezpieczeństwem i higieną pracy. Zmuszają one do stosowania coraz bardziej przyjaznych środowisku i człowiekowi procesów produkcyjnych, w tym wewnątrzzakładowego transportu materiałów. To powoduje, że w przedsiębiorstwie na dobór i zastosowanie środków tego transportu mają wpływ nie tylko charakter produkcji, ale również przepisy związane z ochroną środowiska i BHP. Problem ten jest bardzo istotny jeżeli chodzi o gałęzie przemysłu, w których mamy do czynienia z wszelkiego rodzaju materiałami sypkimi, pylistymi i drobnoziarnistymi, często aktywnymi chemicznie i szkodliwymi dla otoczenia; są to min: przemysł chemiczny, ceramiczny, aluminiowy, cementownie, elektrownie, koksownie, huty. Transport takich materiałów jest utrudniony, ze względu na duże pylenie podczas ich przemieszczania, a co za tym idzie szkodliwość dla człowieka i otoczenia. Do transportu tego rodzaju materiałów są stosowane coraz częściej przenośniki cięgnowe, w tym zwłaszcza przenośniki zgrzebłowe rurowe, jako alternatywa dla innych przenośników; na przykład ślimakowych, kubełkowych czy taśmowych rurowych. Przenośniki zgrzebłowe rurowe są doskonałymi środkami transportu materiałów sypkich i pylistych dzięki, między innymi, takim zaletom jak: prosta budowa i obsługa, możliwość transportowania tych materiałów w pełnej izolacji od otoczenia, uzyskania pyłoszczelności, wodoszczelności, a nawet gazoszczelności oraz łatwość konfigurowania tras [6, 13, 14, 16].

Należy podkreślić, że pomimo coraz szerszego stosowania przenośników zgrzebłowych rurowych, nie ma opracowanych zadowalających podstaw teoretycznych projektowania takich przenośników, które pozwoliłyby na racjonalny dobór ich parametrów konstrukcyjno-geometrycznych. Istotnym problemem w tym zakresie jest określanie oporów ruchu tych przenośników. Literatura przedmiotowa [14] podaje, że można stosować metodę obliczania oporów jak dla konwencjonalnych przenośników zgrzebłowych z rynną otwartą, z tym jednak, że należy przyjmować wartości współczynnika tarcia materiału o rynnę z zakresu $\mu = 2,0 - 3,0$!. Konstruktorzy

i producenci tych przenośników, z braku odpowiedniej metody, bazują na wiedzy uzyskanej z wieloletniej praktyki ich projektowania, wdrażania i eksploatacji.

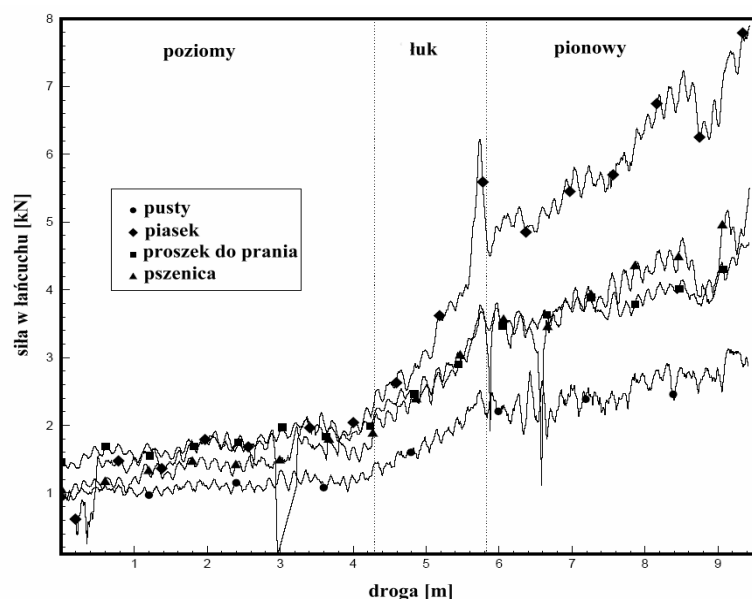
Dotychczasowe badania doświadczalne prowadzone na przenośnikach zgrzebłowych rurowych obejmowały pomiary oporów ruchu na przenośniku przemysłowym [18 – 20] oraz pomiary mocy na przenośniku do podawania pasz [22].

W pracach [18 – 20] wyznaczono zależności teoretyczne na opory ruchu przenośnika zgrzebłowego rurowego na odcinku prostym, nachylonym i na łuku pionowym. Badania doświadczalne przeprowadzono na przenośniku przemysłowym z ciągnem łańcuchowym. Wynikiem tych badań były wartości siły zmierzonej w ciągnie [18, 20] na długości trasy dla przenośnika nieobciążonego oraz obciążonego różnymi materiałami (rysunki 1.1 i 1.2).



Rys. 1.1. Schemat badanego przenośnika [18] - a) oraz uzyskane z badań wyniki pomiaru siły w łańcuchu przy transporcie pszenicy - b)

Wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych przeprowadzone w pracach [18 – 20] wykazały, zdaniem autorów, ich dobrą zgodność. Stwierdzono też, że siła w ciągnie roboczym przenośnika zależy od właściwości transportowanego materiału jak i stopnia wypełnienia rynny, natomiast prędkość ciągu nie ma większego wpływu. Nie podano jednak, w wyżej wymienionych pracach, ogólnych wzorów na obliczanie oporów ruchu przenośnika o dowolnej konfiguracji trasy, jak również wytycznych doboru podstawowych parametrów przenośnika, a zaproponowane zależności teoretyczne odnoszą się jedynie do przenośnika, na którym przeprowadzono badania (rys. 1.1a).



Rys. 1.2. Przebieg siły w łańcuchu dla przenośnika próżnego i przy transporcie różnych materiałów; prędkość ciągu $v = 0,3$ [m/s] [18]

Celem badań przedstawionych w pracy [22] było doświadczalne określenie wpływu stopnia napełnienia przenośnika i prędkości ciągu na energochłonność podawania pasz. Badania przeprowadzono na przenośniku o średnicy wewnętrznej rurowej rynny $D = 0,046$ [m]. Jako wynik, autor uzyskał jednostkową energochłonność tj. energochłonność odniesioną do 1 [kg] przetransportowanej paszy - E_e [Wh/kg], w zależności od prędkości ciągu i stopnia wypełnienia rynny. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości ciągu rośnie liniowo jednostkowa energochłonność transportu, natomiast ze zwiększeniem stopnia wypełnienia rynny obserwuje się jej obniżenie. W tej pracy brak było analizy teoretycznej, jak również metody obliczeń oporów ruchu przenośnika.

W dotychczas przeprowadzonych, w określonych warunkach, badaniach doświadczalnych przenośników zgrzebłowych rurowych, stwierdzono wpływ rodzaju transportowanego materiału, konfiguracji trasy przenośnika, stopnia wypełnienia czy prędkości transportowania na opory ruchu i energochłonność przenośników zgrzebłowych rurowych, ale nie zaproponowano zadowalającej metody obliczania oporów ich ruchu. Istnieje zatem potrzeba opracowania podstaw teoretycznych obliczania przenośników zgrzebłowych rurowych, w tym zwłaszcza określania oporów ich ruchu. Stanowiło to dla autora przesłankę dla podjęcia tego tematu w ramach niniejszej pracy.

2. Cel, teza i zakres pracy

Celem pracy jest określenie, na podstawie badań teoretycznych i doświadczalnych, wpływu wybranych parametrów przenośnika zgrzeblowego rurowego (oraz transportowanego materiału) na opory ruchu, dla opracowania zadowalającej metody jego projektowania. Przez odpowiedni dobór wartości średnicy wewnętrznej rurowej rynny D i odstęp między zgrzeblami h można zminimalizować opory ruchu przenośnika, a przez to ograniczyć zużycie ściernie jego rynien i zgrzebeł.

W związku z powyższym postawiono następującą tezę pracy:

Istnieje możliwość doboru takich wartości średnicy wewnętrznej rurowej rynny D i odstęp między zgrzeblami h przenośnika zgrzeblowego rurowego, przy których uzyskuje się minimalne jego opory ruchu.

Zakres pracy obejmuje badania teoretyczne i doświadczalne oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego celem określenia wpływu na nie wybranych, następujących parametrów:

- konstrukcyjno – geometrycznych przenośnika: h , D , α , μ_l ,
- materiału transportowanego: μ , k , γ_m .

W realizacji podjętej problematyki, na początku, przedstawiono ogólną charakterystykę, budowę i zastosowania przenośników zgrzeblowych rurowych.

Następnie przeprowadzono analizę teoretyczną oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego. Wykorzystując zależności dotyczące materiałów sypkich [5, 11, 12, 21] przeanalizowano najpierw opory przemieszczania warstwy materiału sypkiego wewnątrz rurowej rynny przenośnika. Wyprowadzone zależności w postaci ogólnej, opisują opory przemieszczania materiału w rynnie o dowolnym jej nachyleniu względem poziomu. W dalszej części pracy przeprowadzono analizę teoretyczną oporów ruchu przenośnika na odcinkach prostych oraz na łukach poziomych i pionowych, w wyniku której otrzymano odpowiednie zależności.

W kolejnej części pracy, wykorzystując uzyskane zależności teoretyczne przeanalizowano wpływ wybranych parametrów konstrukcyjno – geometrycznych przenośnika (h , D , α , μ_l) oraz transportowanego materiału (μ , k , γ_m) na opory ruchu przenośnika. Wpływ ten przedstawiono w postaci wykresów.

W dalszej kolejności przedstawiono zagadnienia podobieństwa w badaniach oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego. Wykorzystując metodę analizy wymiarowej, wyznaczono liczby kryterialne ujmujące parametry konstrukcyjno – geometryczne przenośnika zgrzeblowego rurowego i transportowanego materiału, które mogą być przydatne w budowie jego modelu fizycznego, w badaniach doświadczalnych oporów ruchu oraz przy uogólnieniu wyników tych badań.

Następnie przedstawiono plan i zakres badań doświadczalnych oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego umożliwiających weryfikację uzyskanych zależności teoretycznych. Przedstawiono stanowisko badawcze, jego system pomiarowy i akwizycji danych, przebieg i wyniki badań zasadniczych oraz pomocniczych związanych z właściwościami transportowanych materiałów sypkich.

Po zrealizowaniu badań teoretycznych i doświadczalnych przeprowadzono analizę porównawczą wyników badań teoretycznych i doświadczalnych. Ze względu na dużą liczbę danych pomiarowych, w pracy ograniczono się do zaprezentowania tylko wybranych wyników badań doświadczalnych.

W dalszej kolejności przedstawiono przebieg i wyniki pomiarów mocy czynnej przeprowadzonych na przemysłowym przenośniku zgrzeblowym rurowym firmy *Ferind*. Następnie porównano otrzymane wyniki badań doświadczalnych z wynikami badań teoretycznych.

Kolejna część pracy obejmuje zagadnienie racjonalnego doboru wartości parametrów D i h przenośnika, przy których uzyskuje się minimalne jego opory ruchu. Uzyskane wyniki potwierdziły słuszność przyjętej w pracy tezy.

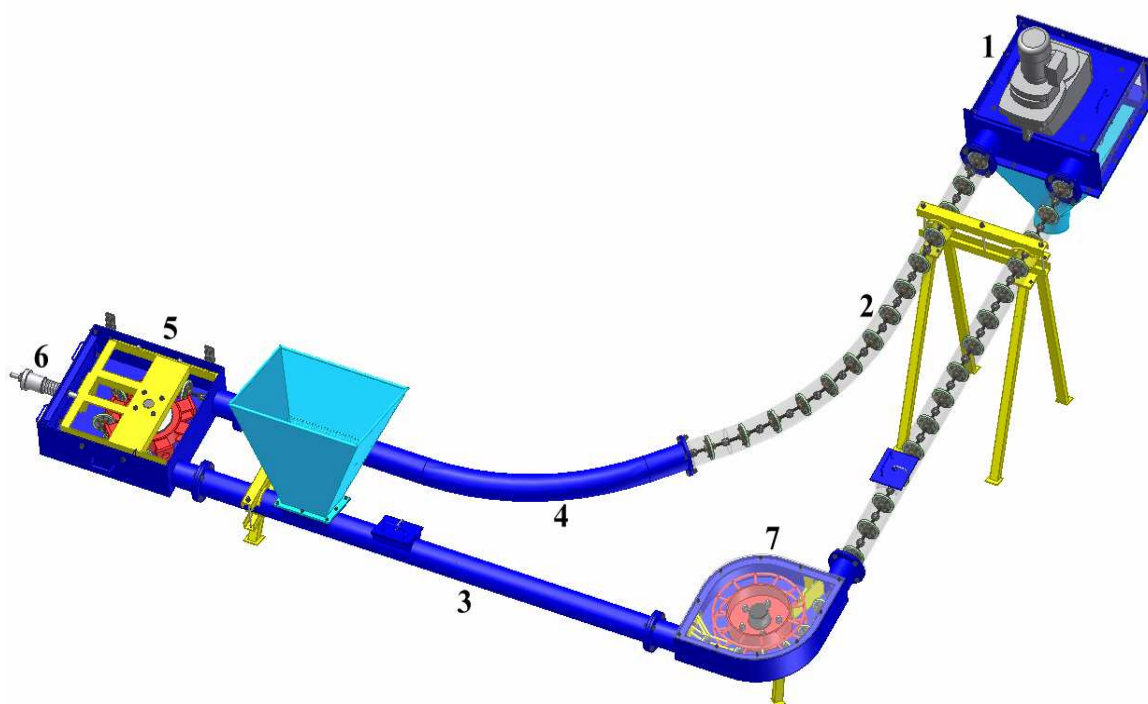
Następnie, na podstawie uzyskanych wyników badań teoretycznych i doświadczalnych, zaproponowano, w postaci schematu blokowego, metodę racjonalnego projektowania przenośników zgrzeblowych rurowych.

W zakończeniu przedstawiono podsumowanie oraz, wynikające z przeprowadzonych w pracy badań, wnioski końcowe dotyczące aspektów poznawczych i praktycznych; wskazano także kierunki dalszych badań.

3. Ogólna charakterystyka przenośników zgrzeblowych rurowych

Z uwagi na stosowanie przenośników zgrzeblowych rurowych do transportu szerokiej gamy materiałów sypkich, przenośniki te mają różne rozwiązania konstrukcyjne, bowiem istnieje wiele zadań transportowych wynikających ze specyficznych procesów technologicznych oraz wymagań w zakresie bezpieczeństwa i ochrony środowiska. Mogą one w sposób hermetyczny odbierać, dozować lub transportować pyły, materiały sypkie i drobnoziarniste w różnych gałęziach przemysłu takich jak: przemysł aluminiowy, cementownie, elektrownie, koksownie, przemysł chemiczny, przemysł ceramiczny, przemysł rolno-spożywczy, cukrownie, elektrociepłownie, huty [5, 6, 7, 14, 16, 28, 29, 30].

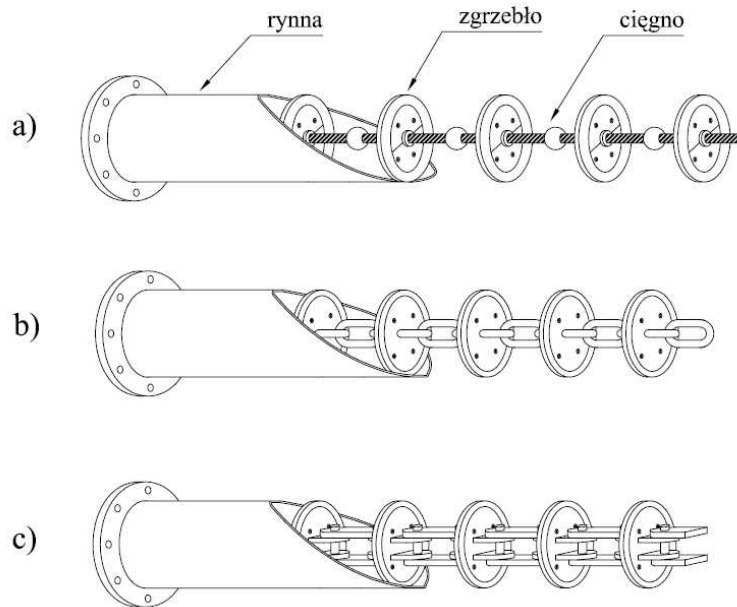
Budowę typowego przenośnika zgrzeblowego rurowego z ciągnem linowym przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Budowa przenośnika zgrzeblowego rurowego: 1 – stacja napędowa, 2 – ciągnę ze zgrzeblami, 3 – rynna prosta, 4 – rynna łukowa, 5 – stacja zwrotna, 6 – urządzenie napinające ciągnę, 7 – stacja kierunkowa

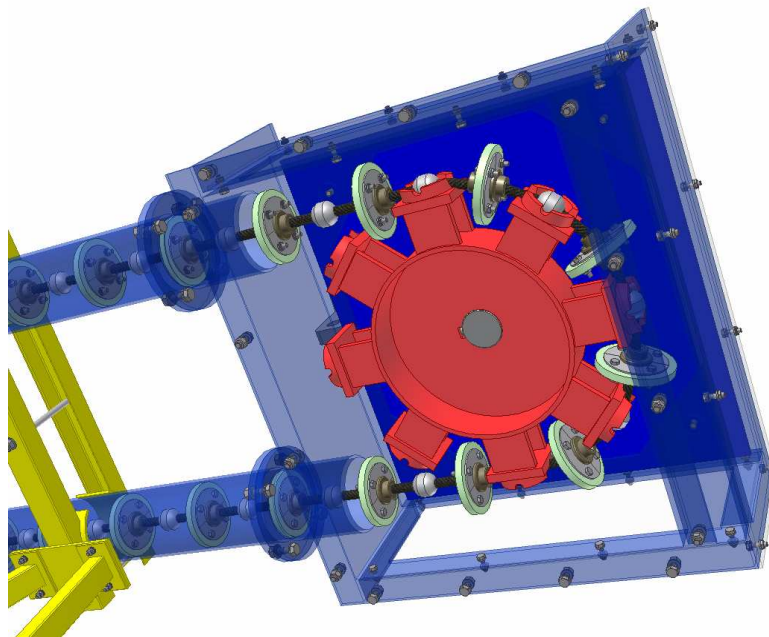
Trasę stanowią stalowe rurowe rynny, wewnątrz których jest przemieszczane ciągnę robocze w postaci liny stalowej lub łańcucha (ogniwowego lub płytkowego) (rys. 3.2) pracujące w zamkniętej pętli. Na ciągnie, w równych odstępach są zamocowane

zgrzebła w postaci tarcz kołowych (rys. 3.2), które przesuwają wewnątrz rynny transportowany materiał. Napęd z gwiazdy napędowej jest przekazywany na ciągną dzięki ich sprzężeniu kształtowemu (rys. 3.3).



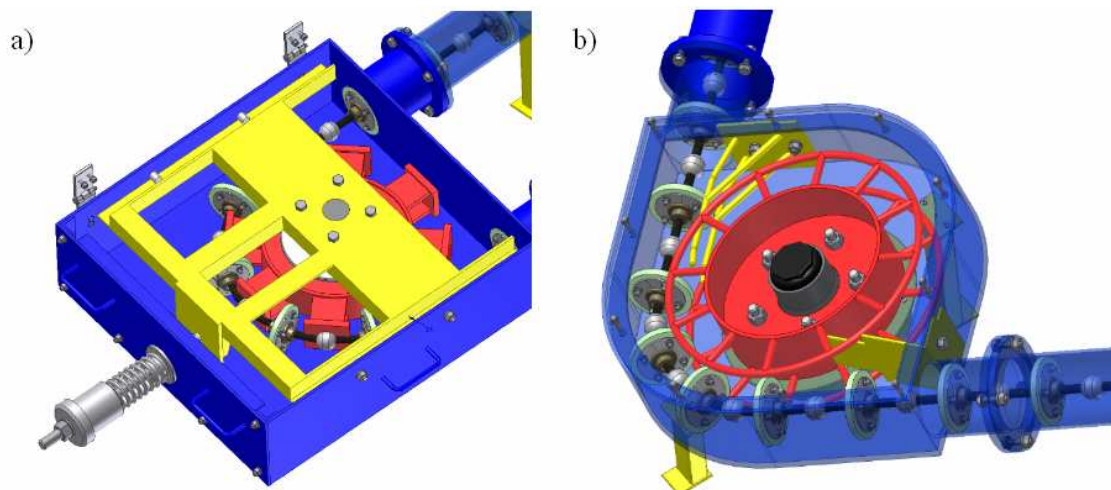
Rys. 3.2. Rodzaje ciągów stosowanych przez firmy: a) – Ferind, b) – Schrage, c) – Dynamet [29]

Na rys. 3.3 przedstawiono stację napędową przenośnika z ciągnem linowym. Do napędu tych przenośników stosowane są silniki elektryczne.



Rys. 3.3. Widok ciągu linowego ze zgrzeblami współpracującego z gwiazdą napędową

Na przeciwnym krańcu przenośnika znajduje się stacja zwrotna z urządzeniem napinającym (rys. 3.4a), zapewniającym odpowiedni naciąg cięgna. W przenośnikach zgrzebłowych rurowych są stosowane również stacje kierunkowe (rys. 3.4b), które umożliwiają zmianę kierunku cięgna na małym promieniu, szczególnie na odcinkach obciążonych materiałem transportowanym.



Rys. 3.4. Widok: a) stacji zwrotnej z urządzeniem napinającym, b) stacji kierunkowej

Podstawowe dane techniczne przenośników zgrzebłowych rurowych są następujące:

- wydajność $0,45 - 60 \text{ [m}^3/\text{h]}$
- średnica wewnętrzna rynny $88 - 270 \text{ [mm]}$
- moc napędu $\text{do } \sim 15 \text{ [kW]}$
- prędkości cięgna $0,02 - 0,45 \text{ [m/s]}$
- długość:

na odcinkach poziomych do 80 [m]

na odcinkach pionowych do 30 [m]

Zaletami przenośników zgrzebłowych rurowych są:

- możliwość transportowania materiałów w pełnej izolacji od otoczenia,
- prosta konstrukcja, zabudowa i obsługa,
- cicha praca,
- łatwość konfigurowania tras o dużych krzywiznach i dowolnym nachyleniu,
- małe wymiary przekroju poprzecznego,

- możliwość uzyskania pyłoszczelności, wodoszczelności, a nawet gazoszczelności niezależnie od nadciśnienia czy podciśnienia,
- dowolna liczba punktów załadowniczych i wyładowniczych umieszczonych w dowolnym miejscu trasy,
- możliwość podgrzewania lub chłodzenia materiału w czasie transportu,
- możliwość transportu pulpy oraz pracy w układzie rewersyjnym.

Wadami tych przenośników są:

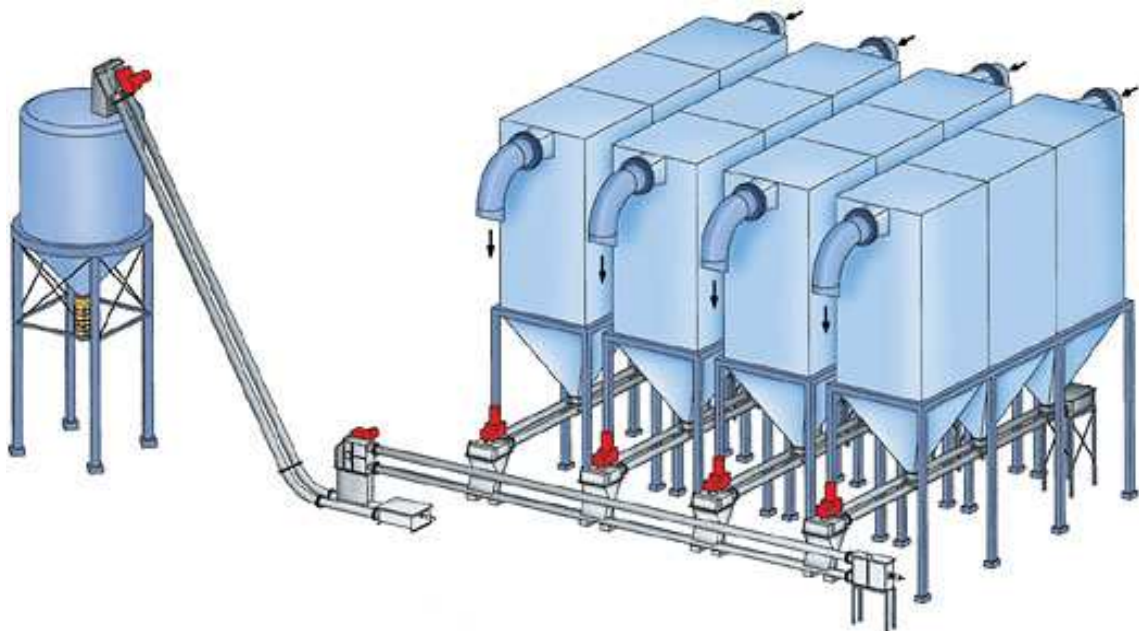
- duże opory ruchu,
- znaczne zużycie ściernie rynien i zgrzebeł,
- mała prędkość ruchu,
- ograniczona wydajność i długość,
- wydłużanie się cięgien podczas pracy,
- konieczność wykonywania z dużą dokładnością kół napędowych, zwrotnych, cięgien i rur zwłaszcza na łukach,
- trudności w czasie usuwania awarii spowodowane zamkniętą budową przenośnika.

Przenośniki zgrzeblowe rurowe mają szerokie zastosowanie w transporcie wszelkiego rodzaju materiałów sypkich. Tymi przenośnikami są transportowane z powodzeniem między innymi [32]:

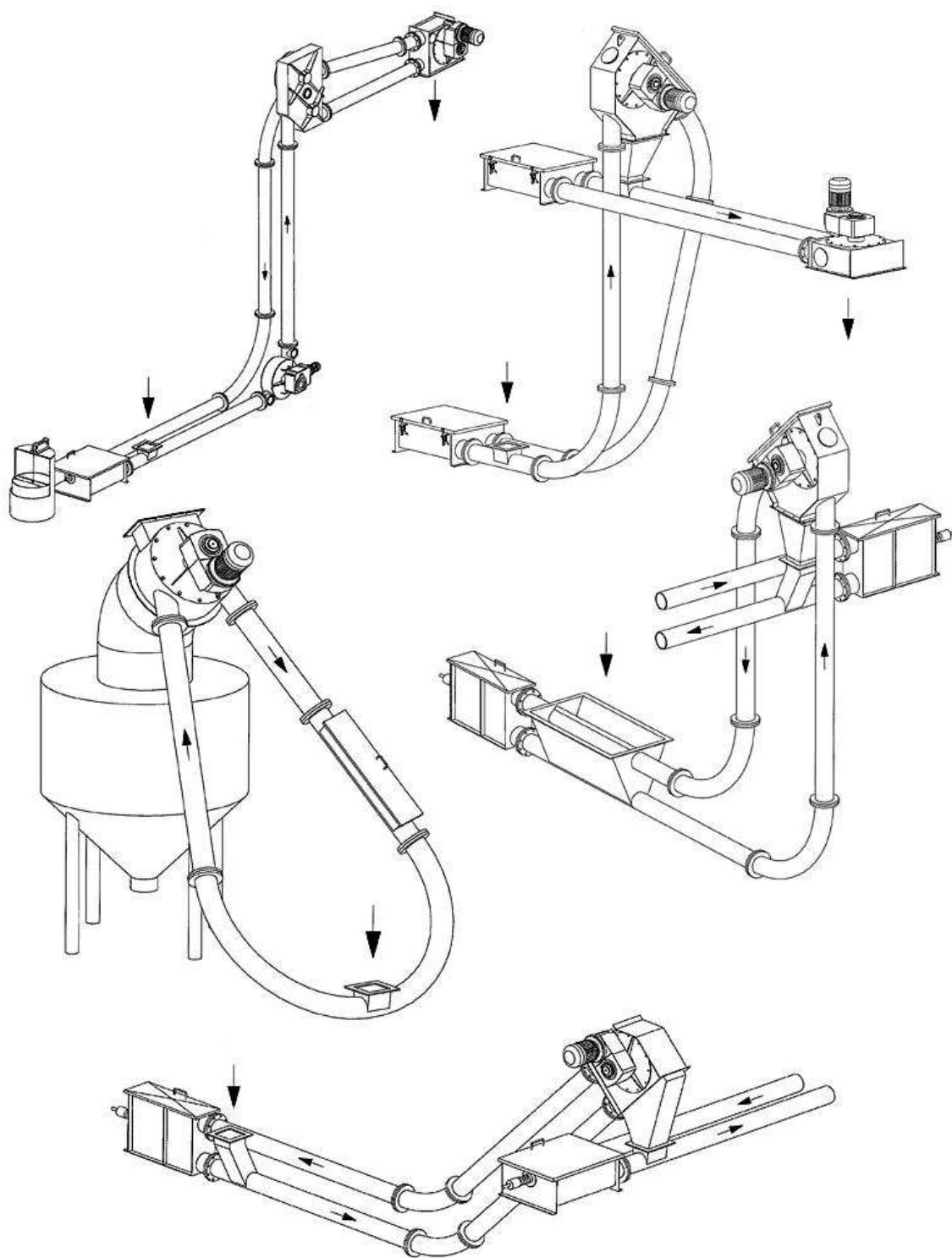
- cement 250, 350, cement 550 na bazie zmielonego żużla wielkopiecowego,
- wapno hydratyzowane i wapno zmielone, wodorotlenek sodu – sypki i granulowany, gips,
- ziemia okrzemkowa, krzemionka, pyły spieku rudy żelaza, mikrokrzemionka,
- sorbenty granulowane,
- uwodnione pyły szkła po szlifowaniu, pyły szkła z odpylacza workowego,
- pyły metaliczne (80%) z elektrofiltra,
- pyły cynku, płatki grafitu, ferryt baru, nadboran sodu, kwaśny pirofosforan pylisty,
- roztwór pyłu węglowego z wodą, pyły kamienne, pyły wytwórni asfaltu,
- rozdrobnione kawałki odpadów drewnianych, mieszanina piasku z trocinami,
- herbata liściasta i granulowana,
- pokruszony żużel, pyły koksu, sadza,

- produkty spożywcze (wykonanie specjalne),
- węgiel w postaci miazgi,
- wszelkie pyły z odpylaczy w kotłowniach i elektrociepłowniach, pyły i odpady z instalacji odsiarczania
- masa formierska,
- pasze.

Przenośniki zgrzebłowe rurowe ze względu na swoje zalety są coraz szerzej stosowane w transporcie wewnątrzzakładowym. Możliwości konfigurowania tras przenośników oraz zastosowanie przedstawiono przykładowo na rysunkach 3.5 i 3.6.



Rys. 3.5. Zastosowanie przenośników zgrzebłowych rurowych do opróżniania elektrofiltrów [33]



Rys. 3.6. Przykładowe konfiguracje tras przenośników zgrzeblowych rurowych [33]

4. Podstawy teoretyczne pracy przenośników zgrzeblowych rurowych

Zasada pracy przenośnika zgrzeblowego rurowego polega na przemieszczaniu wewnątrz rurowej rynny materiału sypkiego za pomocą zgrzebeł zamocowanych na ciągnie roboczym o konturze zamkniętym. W odróżnieniu od klasycznych przenośników zgrzeblowych z rynną otwartą, w przenośnikach zgrzeblowych rurowych materiał jest transportowany w rynnie o profilu zamkniętym. Z tego względu, w wyniku działania sił grawitacji i tarcia materiał ulega „kompresji” (rozpiera się w rynnie wywołując ciśnienie na kierunku prostopadłym do kierunku ruchu tzw. parcie boczne), co powoduje, że opory ruchu są większe niż w klasycznym przenośniku zgrzeblowym z rynną otwartą [1, 2, 5].

Analiza teoretyczna oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego dotyczy w pierwszym rzędzie oporów przemieszczania warstwy materiału o grubości h w rurowej rynnie.

Materiał sypki znajdujący się w zamkniętym, pionowym naczyniu cylindrycznym (rys. 4.1) może znajdować się w aktywnym lub biernym stanie naprężeń wywołując aktywne lub bierne parcie boczne. Są to tzw. stany graniczne Rankine’a [21]. Mając na uwadze, że transportowany materiał znajduje się wewnątrz stalowej sztywnej, nieodkształcalnej rynny, przyjęto do dalszych rozważań, że materiał ten znajduje się w aktywnym stanie naprężeń. Wówczas współczynnik bocznego parcia aktywnego opisuje zależność [11, 12, 21]:

$$\frac{p_b}{p} = k = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (4.1)$$

gdzie:

p – ciśnienie materiału na kierunku ruchu,

p_b – ciśnienie materiału na kierunku prostopadłym (parcie boczne na ścianki),

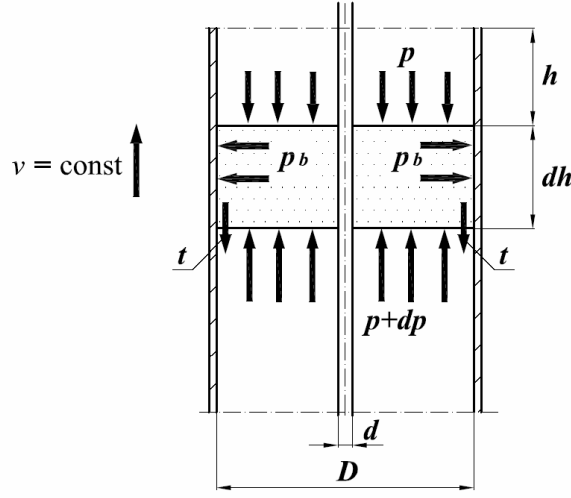
φ – kąt tarcia wewnętrznego materiału.

Analizę oporów przemieszczania warstwy materiału wewnątrz rurowej rynny będzie przeprowadzono przy założeniu, że współczynnik tarcia μ między nimi ma wartość stałą, zależną tylko od rodzaju przemieszczanego materiału.

W następnym podrozdziale rozważono różne przypadki przemieszczania warstwy materiału: w rynnie pionowej, w rynnie poziomej oraz w rynnie nachylonej względem poziomu, zakładając pełne wypełnienie materiałem przekroju rurowej rynny.

4.1. Opory ruchu warstwy materiału sypkiego w rurowej rynnie

Przypadek przemieszczania materiału w rynnie pionowej (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Schemat sił działających na warstwę materiału przemieszczanej pionowo „w górę” [5]

Równanie równowagi sił działających na warstwę materiału o grubości dh (jak na rys. 4.1) ma postać [5]:

$$F(p + dp) - Fp - t\pi Ddh - \gamma_m Fdh = 0, \quad (4.2)$$

gdzie: $F = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$ - pole przekroju poprzecznego warstwy materiału,

$t = \mu \cdot p_b$ - siła tarcia materiału o ściankę rynny.

Po uwzględnieniu powyższego i przekształceniu równanie (4.2) przyjmuje postać [5]:

$$\frac{dp}{\mu k \frac{4D}{D^2 - d^2} p + \gamma_m} = dh, \quad (4.3)$$

a po jego scałkowaniu i wyznaczeniu stałej całkowania dla warunków brzegowych:

$p = 0$ przy $h = 0$ otrzymano [5]:

$$p = \frac{\gamma_m (D^2 - d^2)}{4\mu k D} \left(e^{\frac{4\mu k h D}{D^2 - d^2}} - 1 \right), \quad (4.4)$$

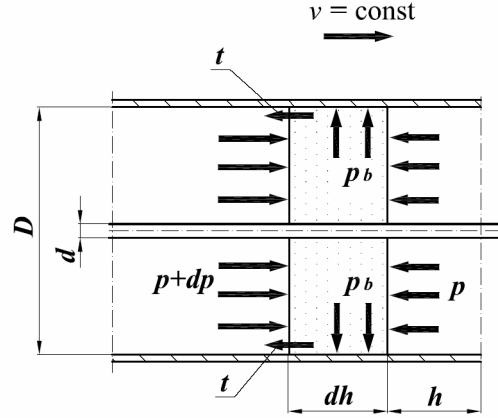
Uwzględniając zależności (4.1) i (4.4) otrzymujemy:

$$p_b = kp = \frac{\gamma_m (D^2 - d^2)}{4\mu D} \left(e^{\frac{4\mu k h D}{D^2 - d^2}} - 1 \right). \quad (4.5)$$

Opory przemieszczania pionowo „do góry” warstwy materiału o grubości h wyraża zależność [5]:

$$w_{vg} = \mu p_b \pi D h + \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m h = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m h e^{\frac{4\mu k h D}{D^2 - d^2}}. \quad (4.6)$$

Przypadek przemieszczania materiału w poziomej rynn timerowej (rys. 4.2).



Rys.4.2. Schemat sił działających na warstwę materiału przemieszczanej w poziomej rynn timerowej [5]

Dla tego przypadku równanie równowagi sił działających na warstwę materiału o grubości dh ma postać [5]:

$$F(p + dp) - Fp - t\pi D dh = 0, \quad (4.7)$$

$$\text{gdzie: } t = \mu p_b = \mu \left(kp + \frac{\pi(D^2 - d^2) \gamma_m dh}{4\pi D dh} \right) = \mu \left(kp + \frac{(D^2 - d^2) \gamma_m}{4D} \right)$$

a po przekształceniach otrzymujemy zależność:

$$\frac{dp}{\frac{4D\mu k}{D^2 - d^2} p + \mu \gamma_m} = dh \quad (4.8)$$

Po scałkowaniu równania (4.8) i wyznaczeniu stałej całkowania ($p = 0$ przy $h = 0$) otrzymujemy [5]:

$$p = \frac{\gamma_m (D^2 - d^2)}{4kD} \left(e^{\frac{4\mu k h D}{D^2 - d^2}} - 1 \right) \quad (4.9)$$

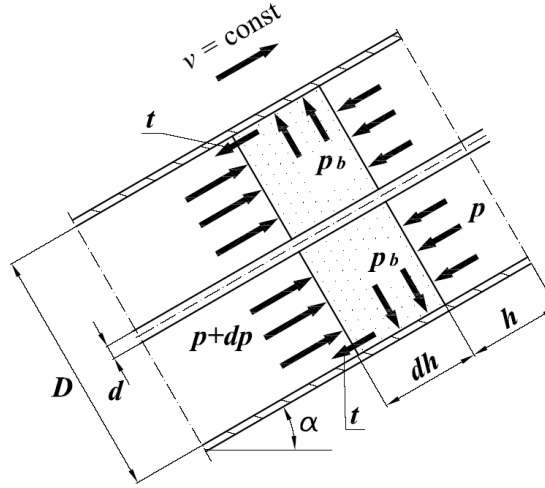
a następnie po uwzględnieniu zależności (4.1) i (4.9) otrzymano [5]:

$$p_b = kp + \frac{(D^2 - d^2) \gamma_m}{4D} = \frac{\gamma_m (D^2 - d^2)}{4D} e^{\frac{4\mu k h D}{D^2 - d^2}}. \quad (4.10)$$

Opory przemieszczania warstwy materiału o grubości h w poziomej rurowej rynnie wyraża zależność [5]:

$$w_h = \mu p_b \pi D h = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \mu \gamma_m h e^{\frac{4\mu k h D}{D^2 - d^2}} \quad (4.11)$$

Przypadek przemieszczania „w górę” warstwy materiału w rurowej rynnie nachylonej względem poziomu pod kątem α (rys. 4.3).



Rys.4.3. Schemat sił działających na warstwę materiału przemieszczanej „w górę” w rurze nachylonej [5]

Równanie równowagi sił w tym wypadku ma postać [5]:

$$F(p + dp) - Fp - t\pi D dh - \gamma_m F \sin \alpha \cdot dh = 0, \quad (4.12)$$

$$\text{gdzie: } t = \mu p_b = \mu \left(kp + \frac{(D^2 - d^2)}{4D} \gamma_m \cos \alpha \right).$$

Po przekształceniu z powyższych zależności otrzymuje się równanie [5]:

$$\frac{dp}{\mu \left(\frac{4Dk}{D^2 - d^2} p + \gamma_m \cos \alpha \right)} = dh, \quad (4.13)$$

a po jego scałkowaniu i wyznaczeniu stałej całkowania ($p = 0$ przy $h = 0$) otrzymujemy:

$$p = \frac{\gamma_m (D^2 - d^2) (\mu \cos \alpha + \sin \alpha)}{4\mu k D} \left(e^{\frac{4\mu k D h}{D^2 - d^2}} - 1 \right) \quad (4.14)$$

Po uwzględnieniu zależności (4.1) i (4.14) otrzymano [5]:

$$p_b = kp + \frac{(D^2 - d^2)}{4D} \gamma_m \cos \alpha = \frac{\gamma_m (D^2 - d^2) (\mu \cos \alpha + \sin \alpha)}{4\mu D} \left(e^{\frac{4\mu k D h}{D^2 - d^2}} - 1 \right) + \frac{(D^2 - d^2)}{4D} \gamma_m \cos \alpha \quad (4.15)$$

Opory przemieszczania „w górę” warstwy materiału o grubości h w rurowej rynnie nachylonej względem poziomu pod kątem α wyraża zależność [5]:

$$w_{ag} = \mu p_b \pi D h + \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m h \sin \alpha = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m h (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot e^{\frac{4\mu k D h}{D^2 - d^2}} \quad (4.16)$$

Przypadki wcześniej rozpatrywane są przypadkami szczególnymi przemieszczania materiału na kierunku nachylonym względem poziomu pod kątem α . Podstawiając do zależności (4.16) kolejno $\alpha = 0^\circ$ i $\alpha = 90^\circ$ otrzymujemy odpowiednio $w_{ag} = w_h$ oraz $w_{ag} = w_{vg}$.

Przemieszczanie warstwy materiału „w dół” w rurze nachylonej pod kątem α względem poziomu można podzielić na dwa przypadki:

- 1) gdy warstwa materiału musi być pchana „w dół” i wtedy opory przemieszczania jej są dodatnie,
- 2) gdy warstwa materiału zsuwa się pod własnym ciężarem i wtedy opory jej przemieszczania są ujemne.

Dla przypadku 1) opory przemieszczania warstwy materiału wynoszą [5]:

$$w_{ad} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m h (\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \cdot e^{\frac{4\mu k D h}{D^2 - d^2}} \quad (4.17)$$

Z powyższej zależności można wyznaczyć kąt $\alpha = \alpha_{gr}$ ($\alpha_{gr} < 0$) granicznego nachylenia rurowej rynny, przy którym opór przemieszczania warstwy materiału będzie równy zero ($w_{ad} = 0$). Przyrównując zależność (4.17) do zera otrzymuje się wartość kąta granicznego [5]:

$$\alpha_{gr} = -\arctg \mu \quad (4.18)$$

Dla przypadku 2) opory przemieszczania warstwy materiału w rurowej rynnie nachylonej pod kątem większym od kąta granicznego wynoszą [5]:

$$w_{ad} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m h (\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \cdot e^{\frac{4\mu k D h}{D^2 - d^2}} \quad (4.19)$$

Zależności opisujące opory przemieszczania warstwy materiału o grubości h wewnątrz rurowej rynny można wyrazić w następującej postaci ogólnej [5]:

$$w = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m h (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot e^{\frac{4\mu k D h}{D^2 - d^2} \operatorname{sgn}(\alpha - \alpha_{gr})} \quad (4.20)$$

gdzie: kąt α nachylenia rurowej rynny ma znak „+” przy ruchu warstwy materiału „w górę”, a znak „-” przy ruchu warstwy materiału „w dół”.

4.2. Opory ruchu przenośnika na odcinku prostym

W przeprowadzonych w pracy obliczeniach oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego, jak również w badaniach doświadczalnych, przyjęto pełne wypełnienie materiałem transportowanym jego rynny.

Opory ruchu tylko ciągną ze zgrzeblami mają taką samą postać jak dla konwencjonalnego przenośnika zgrzeblowego, tj. z rynną otwartą [1, 14]:

$$w_c = q(\mu_l \cos \alpha + \sin \alpha), \quad (4.21)$$

gdzie: q – ciężar jednostkowy ciągną ze zgrzeblami [N/m],

μ_l – współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę.

Opory ruchu gałęzi ładowej przenośnika zgrzeblowego rurowego o długości L mają postać [5]:

$$W_L = L\left(\frac{w}{h} + w_c\right) = L\left[\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot e^{\frac{4\mu k D h}{D^2 - d^2} \operatorname{sgn}(\alpha - \alpha_{grp})} + q(\mu_l \cos \alpha + \sin \alpha)\right] \quad (4.22)$$

Opory ruchu gałęzi próżnej:

$$W_p = Lq(\mu_l \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (4.23)$$

Zatem całkowite opory ruchu prostoliniowego przenośnika zgrzeblowego rurowego, przy pomijalnie małych oporach przeginalania ciągną na gwiazdach napędowych i zwrotnych, mają postać [5]:

$$W = W_L + W_p = L\left[\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot e^{\frac{4\mu k D h}{D^2 - d^2} \operatorname{sgn}(\alpha - \alpha_{grp})} + 2q\mu_l \cos \alpha\right] \quad (4.24a)$$

gdzie, przy $W = 0$ $\alpha = \alpha_{grp} < 0$:

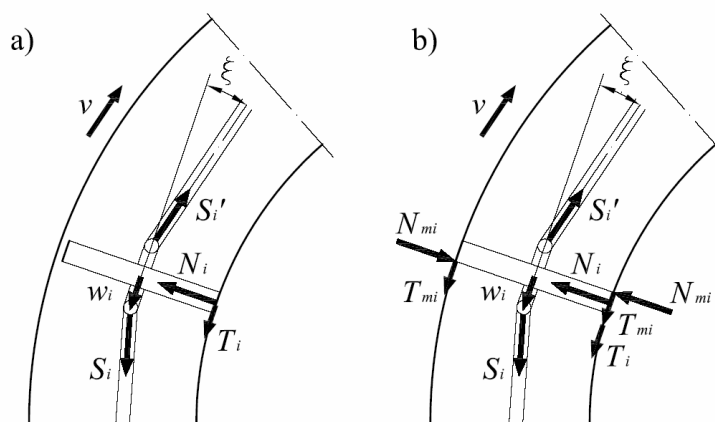
$$\alpha_{grp} = -\arctg \left(\frac{\pi(d^2 - D^2) \gamma_m \mu \cdot \exp\left(\frac{-4\mu k h D}{d^2 - D^2}\right) - 8q\mu_l}{\pi(d^2 - D^2) \gamma_m \cdot \exp\left(\frac{-4\mu k h D}{d^2 - D^2}\right)} \right) \quad (4.24b)$$

4.3. Opory ruchu przenośnika na łukach

Jedną z istotnych zalet przenośników zgrzeblowych rurowych jest łatwość przestrzennego konfigurowania ich tras, na których oprócz odcinków prostych, istnieją także łuki, które powodują dodatkowe opory ruchu oraz zwiększone zużycie ściernie rynien i zgrzebeł. W projektowaniu tych przenośników, istotna jest znajomość oporów ich ruchu zwłaszcza na łukach, aby przez właściwy dobór parametrów konstrukcyjnych przenośników i łuków można było opory te, i powodowane nimi zużycie, ograniczyć.

W niniejszym rozdziale przeprowadzono analizę oporów ruchu przenośnika na łukach poziomych i pionowych. Dla łuków poziomych i pionowych rozpatrzono dwa przypadki:

- 1) gdy zgrzebła mają w rynnie znaczny luz taki, że nie występują na ich krańcach dodatkowe siły reakcji (rys. 4.4a),
- 2) gdy zgrzebła współpracują z rynną z minimalnym luzem zapewniającym szczelność i wtedy wskutek wymuszonego prowadzenia zgrzebeł w rynnie powstają na ich krawędziach dodatkowe siły reakcji (rys. 4.4b).



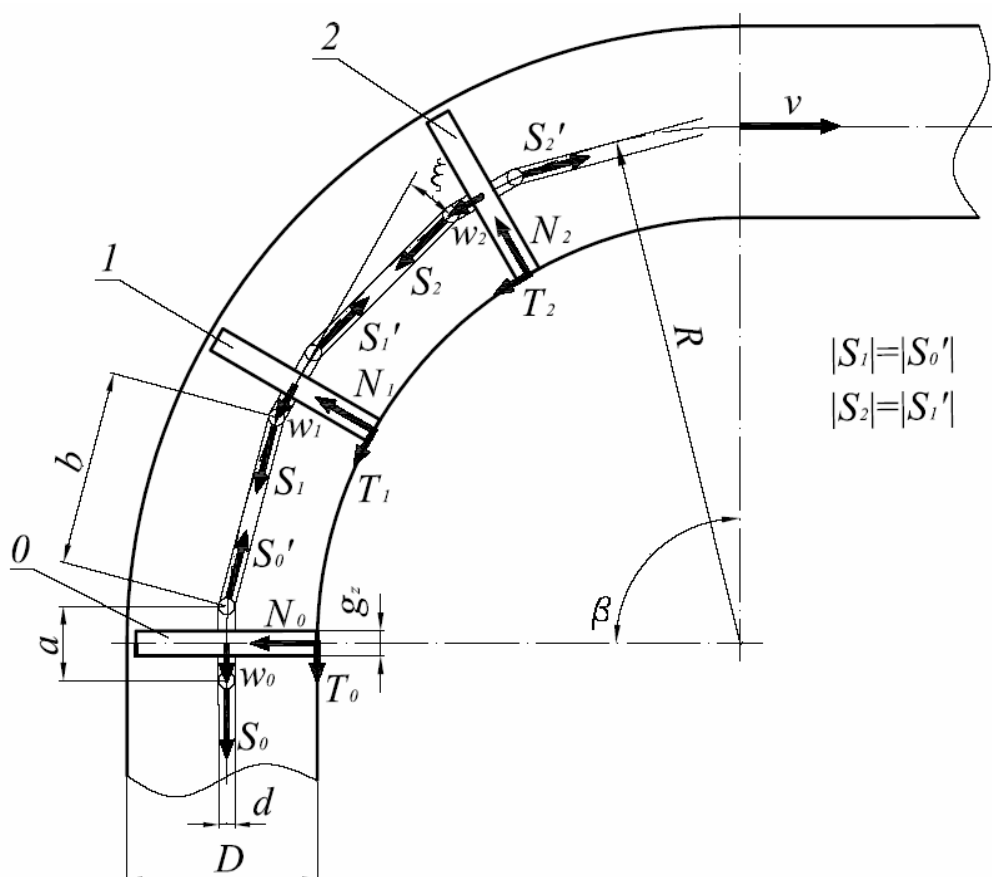
Rys. 4.4. Układ sił działających na zgrzebło na łuku w przenośniku pracującym: a) ze znacznym luzem, b) z minimalnym luzem

W analizie oporów na łukach, z uwagi na małe prędkości ciągną, pominięto działanie siły odśrodkowej na ciągną ze zgrzeblami i na materiał. Zakładając odpowiednio duże siły wstępnego napięcia ciągną roboczego, w stosunku do sił tarcia zgrzebeł na łuku o rynnę, przyjęto upraszczając, że zgrzebła te mają układ radialny (dla przyjętych danych odchylenie zgrzebła od położenia radialnego wynosiło około $1,5^\circ$). W analizie przyjęto również, że współczynniki tarcia materiału transportowanego i zgrzebeł o rynny mają wartości stałe.

4.3.1. Opory ruchu przenośnika na łukach poziomych

Na poziomych łukach trasy przenośnika występują dodatkowe opory ruchu ciągną ze zgrzeblami związane z dodatkowymi ich naciskami na rynnę, a także dodatkowe opory ruchu materiału związane z jego translokacją podczas „wchodzenia” w łuk i „wychodzenia” z łuku zgrzebla. Założono, że ciężar zgrzebla i odcinka ciągną między zgrzeblami na łuku jest pomijalnie mały w porównaniu z napięciem tego ciągną (przez co pominięto opór tarcia wywołany tym ciężarem), a także, że układ zgrzebeł jest radialny. Te założenia pozwalają na potraktowanie rozważanego układu sił (rys. 4.5) jako płaski.

Dodatkowe opory tarcia ciągną ze zgrzeblami na łuku wyznaczono z warunków równowagi statycznej układu, korzystając ze schematu przedstawionego na rys. 4.5.



Rys. 4.5. Schemat sił do wyznaczenia oporów ruchu przenośnika na łuku poziomym

Na rys. 4.5 oznaczono:

a, b – wymiary charakterystyczne ciągną [m],

$h = a + b$ – odstęp między zgrzeblami [m],

g_z – grubość zgrzebla [m],

R – promień łuku rurowej rynny [m],

β – kąt łuku [°],

ξ – kąt odchylenia cięgna od płaszczyzny zgrzebła [°],

S_i, S'_i – siły napięcia w cięgnię roboczym [N],

N_i – siły reakcji normalnych [N],

$T_i = \mu_l \cdot N_i$ – siły tarcia [N],

w_i – opór ruchu warstwy materiału zawartej między dwoma zgrzeblami [N].

Powyższe oznaczenia przyjęte w analizie oporów ruchu na łuku poziomym będą obowiązywać również w analizie oporów ruchu na łukach pionowych.

Równania równowagi statycznej zgrzebła „0” wchodzącego w łuk (rys. 4.5) mają postać [9]:

$$\begin{aligned} S'_0 \sin \xi - N_0 &= 0 \\ S'_0 \cos \xi - S_0 - w - T_0 &= 0 \\ (S_0 - S'_0) \cos \xi \cdot \frac{D}{2} + w \cdot \frac{D}{2} - S'_0 \sin \xi \cdot \frac{a}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Wykorzystując schemat z rys. 4.5 otrzymano następujące zależności geometryczne:

$$\xi = \frac{a+b}{2R} = \frac{h}{2R} \quad (4.26)$$

Opór przemieszczania warstwy materiału o grubości h wynosi [9]:

$$w_0 = w_1 = w_2 = w = \frac{1}{4} \cdot \mu \pi (D^2 - d^2) \gamma_m (a+b) \cdot e^{\frac{4\mu k D(a+b)}{D^2 - d^2}} \quad (4.27)$$

gdzie: γ_m [N/m³] – ciężar nasypowy materiału, μ – współczynnik tarcia materiału

o rynnę, $k = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$, φ – kąt tarcia wewnętrznego materiału.

Liczba n – zgrzebeł będących na łuku, przy zadanej wartości kąta β i promienia R łuku wynosi [9]:

$$n = \frac{\beta \cdot R \cdot \pi}{h \cdot 180} - 1 \quad (4.28)$$

Z układu równań (4.25) otrzymano:

$$S'_0 = \frac{S_0 + w}{\cos \xi - \mu_l \sin \xi}; \quad (4.29)$$

$$N_0 = S'_0 \sin \xi; \quad (4.30)$$

zatem opór ruchu zgrzebla „0” (rys. 4.5) wraz z materiałem wynosi:

$$W_0 = T_0 + w = \mu_l N_0 + w = \mu_l \frac{S_0 + w}{\operatorname{ctg} \xi - \mu_l} + w \quad (4.31)$$

Postępując analogicznie, równania równowagi statycznej zgrzebla „1” mają postać [9]:

$$\begin{aligned} (S'_1 + S_1) \sin \xi - N_1 &= 0 \\ (S'_1 - S_1) \cos \xi - w - T_1 &= 0 \\ (S_1 - S'_1) \sin \xi \cdot \frac{a}{2} + (S_1 - S'_1) \cos \xi \cdot \frac{D}{2} + w \cdot \frac{D}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.32)$$

i z układu równań (4.32) otrzymano [9]:

$$N_1 = S_1 \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{w \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \quad (4.33)$$

$$S'_1 = S_1 \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + \frac{w}{(1 - \mu_l \tan \xi) \cos \xi} \quad (4.34)$$

Opór ruchu zgrzebla „1” wraz z materiałem wynosi [9]:

$$W_1 = T_1 + w = \mu_l N_1 + w = \mu_l \left[S_1 \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{w \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right] + w, \quad (4.35)$$

gdzie: $|S_1| = |S'_1|$.

W analogiczny sposób wyznaczono opory ruchu zgrzebla „2” wraz z materiałem otrzymując [9]:

$$W_2 = T_2 + w = \mu_l N_2 + w = \mu_l \left[S_2 \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{w \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right] + w, \quad (4.36)$$

gdzie: $|S_2| = |S'_1|$.

Dla zgrzebel „1” i „2” znajdujących się na łuku iloraz ich oporów ruchu wynosi [9]:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\mu_l \left[S'_1 \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{w \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right] + w}{\mu_l \left[S'_0 \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{w \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right] + w} = q_w = \text{const} \quad (4.37)$$

Zatem opór ruchu n – tego zgrzebla wraz z materiałem znajdującego się na łuku poziomym zmienia się w postępie geometrycznym i wynosi:

$$W_i = W_1 \cdot q_w^{n-1} = \left(\mu_l \left[S'_0 \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{w \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right] + w \right) \cdot q_w^{n-1} \quad (4.38)$$

a łączny opór ruchu n – zgrzebeł będących na łuku poziomym przenośnika wyniesie [9]:

$$W_{0n} = W_0 + W_1 \frac{q_w^n - 1}{q_w - 1} = \mu_l \frac{S_0 + w}{\text{ctg} \xi - \mu_l} + w + \left(\mu_l \left[S_0' \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{w \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right] + w \right) \cdot \frac{q_w^n - 1}{q_w - 1} \quad (4.39)$$

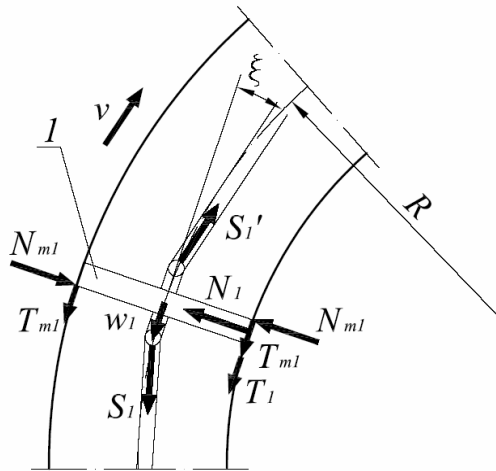
W zależności (4.39) uwzględniono opory ruchu transportowanego materiału tak jakby był on przemieszczany w rurze prostej, tj. nie uwzględniono faktu, że materiał „wchodząc” w łuk i „wychodząc” z niego doznaje częściowej translokacji. Te przemieszczenia materiału wymagają pokonania oporów tarcia wewnętrznego materiału i powodują dodatkowe opory ruchu przenośnika na łuku, których w pracy nie analizowano.

Całkowity opór ruchu przenośnika wraz z materiałem na łuku poziomym ostatecznie wynosi [9]:

$$W = \mu_l \frac{S_0 + w}{\text{ctg} \xi - \mu_l} + w + \left(\mu_l \left[S_0' \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{w \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right] + w \right) \cdot \frac{q_w^n - 1}{q_w - 1} \quad (4.40)$$

Otrzymana zależność (4.40) dotyczy oporów ruchu przenośnika pracującego ze znacznym luzem pomiędzy zgrzeblami, a rynną na łuku poziomym.

W dalszej części pracy rozpatrzono opory ruchu przenośnika pracującego z minimalnym luzem pomiędzy zgrzeblem a rynną. Wskutek wymuszonego prowadzenia zgrzebla w rynnie, ma ono układ radialny, a występujący wtedy moment wywołuje dodatkowe siły reakcji N_m , zwiększające opory ruchu zgrzebla na łuku o dodatkowe siły tarcia T_m (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Układ sił działających na zgrzebło „1” w łuku poziomym, przy minimalnym luzie między zgrzeblem a rynną

Dla tego przypadku równania równowagi statycznej zgrzebła „0” (rys. 4.5) wraz z materiałem wchodzącego w łuk poziomy mają postać [9]:

$$\begin{aligned} S'_0 \sin \xi - N_0 &= 0 \\ S'_0 \cos \xi - S_0 - w - T_0 - 2 \cdot T_{m0} &= 0 \\ N_{m0} \cdot \frac{g_z}{2} + N_{m0} \cdot \frac{g_z}{2} - S'_0 \sin \xi \cdot \frac{a}{2} - T_0 \cdot \frac{D}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.41)$$

gdzie: N_m – siła reakcji normalnej, $T_m = \mu N_m$ – dodatkowa siła tarcia.

Z układu równań (4.41) otrzymano [9]:

$$S'_0 = \frac{S_0 + w}{\cos \xi - \mu_l \sin \xi - \frac{\mu_l \sin \xi \cdot (a + \mu_l D)}{g_z}} \quad (4.42)$$

$$N_{m0} = \frac{S'_0 \sin \xi \cdot (a + \mu_l D)}{2 \cdot g_z} \quad (4.43)$$

$$N_0 = S'_0 \sin \xi \quad (4.44)$$

Opór ruchu zgrzebła „0” wraz z materiałem wynosi [9]:

$$\begin{aligned} W_0 &= T_0 + 2 \cdot T_{m0} + w = \mu_l N_0 + 2 \cdot \mu_l N_{m0} + w \\ W_0 &= \frac{g_z \cdot \mu_l (S_0 + w)}{g_z (\operatorname{ctg} \xi - \mu_l) - \mu_l (a + \mu_l D)} + \frac{\mu_l \sin \xi \cdot (S_0 + w)(a + \mu_l D)}{g_z (\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi (a + \mu_l D)} + w \end{aligned} \quad (4.45)$$

Postępując analogicznie równania równowagi statycznej zgrzebła „1” wraz z materiałem mają postać [9]:

$$\begin{aligned} (S'_1 + S_1) \sin \xi - N_1 &= 0 \\ (S'_1 - S_1) \cos \xi - w - T_1 - 2 \cdot T_{m1} &= 0 \\ N_{m1} \cdot \frac{g_z}{2} + N_{m1} \cdot \frac{g_z}{2} + (S_1 - S'_1) \sin \xi \cdot \frac{a}{2} - T_1 \cdot \frac{D}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.46)$$

Z układu równań (4.46) otrzymano:

$$S'_1 = \frac{g_z (S_1 \cos \xi + \mu_l \sin \xi \cdot S_1 + w) - \mu_l \sin \xi \cdot S_1 (a - \mu_l D)}{g_z (\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi (a + \mu_l D)} \quad (4.47)$$

$$N_{m1} = \frac{\sin \xi \cdot a (S'_1 - S_1) + \mu_l \sin \xi \cdot D (S'_1 + S_1)}{2 \cdot g_z} \quad (4.48)$$

$$N_1 = (S'_1 + S_1) \sin \xi \quad (4.49)$$

Opór ruchu zgrzebła „1” wraz z materiałem wynosi [9]:

$$\begin{aligned} W_1 &= T_1 + 2 \cdot T_{m1} + w = \mu_l N_1 + 2 \cdot \mu_l N_{m1} + w \\ W_1 &= \mu_l \sin \xi (S'_1 + S_1) + \mu_l \cdot \frac{\sin \xi \cdot a (S'_1 - S_1) + \mu_l \sin \xi \cdot D (S'_1 + S_1)}{g_z} + w, \end{aligned} \quad (4.50)$$

gdzie: $|S_1| = |S_0|$.

Dla zgrzebla „2”, postępując analogicznie otrzymano zależność:

$$S_2' = \frac{g_z(S_2 \cos \xi + \mu_l \sin \xi \cdot S_2 + w) - \mu_l \sin \xi \cdot S_2(a - \mu_l D)}{g_z(\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi(a + \mu_l D)} \quad (4.51)$$

$$\begin{aligned} W_2 &= T_2 + 2 \cdot T_{m2} + w = \mu_l N_2 + 2 \cdot \mu_l N_{m2} + w \\ W_2 &= \mu_l \sin \xi (S_2' + S_2) + \mu_l \cdot \frac{\sin \xi \cdot a(S_2' - S_2) + \mu_l \sin \xi \cdot D(S_2' + S_2)}{g_z} + w \end{aligned} \quad (4.52)$$

gdzie: $|S_2| = |S_1|$.

Dla zgrzebel „1” i „2” znajdujących się na łuku iloraz ich oporów ruchu wynosi [9]:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\mu_l \sin \xi (S_2' + S_2) + \mu_l \cdot \frac{\sin \xi \cdot a(S_2' - S_2) + \mu_l \sin \xi \cdot D(S_2' + S_2)}{g_z} + w}{\mu_l \sin \xi (S_1' + S_1) + \mu_l \cdot \frac{\sin \xi \cdot a(S_1' - S_1) + \mu_l \sin \xi \cdot D(S_1' + S_1)}{g_z} + w} = q_w = \text{const} \quad (4.53)$$

a łączny opór ruchu przenośnika na łuku poziomym wyniesie [9]:

$$\begin{aligned} W &= W_0 + W_1 \frac{q_w^n - 1}{q_w - 1} = \\ &= \frac{g_z \cdot \mu_l (S_0 + w)}{g_z(\text{ctg} \xi - \mu_l) - \mu_l(a + \mu_l D)} + \frac{\mu_l \sin \xi \cdot (S_0 + w)(a + \mu_l D)}{g_z(\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi(a + \mu_l D)} + w + \\ &+ \left(\mu_l \sin \xi (S_1' + S_1) + \mu_l \cdot \frac{\sin \xi \cdot a(S_1' - S_1) + \mu_l \sin \xi \cdot D(S_1' + S_1)}{g_z} + w \right) \cdot \frac{q_w^n - 1}{q_w - 1} \end{aligned} \quad (4.54)$$

W zależności (4.54) należy uwzględnić, że $|S_1| = |S_0|$; dotyczy ona oporów ruchu przenośnika pracującego minimalnym luzem pomiędzy zgrzeblami, a rynną na łuku poziomym.

4.3.2. Opory ruchu przenośnika na łukach pionowych

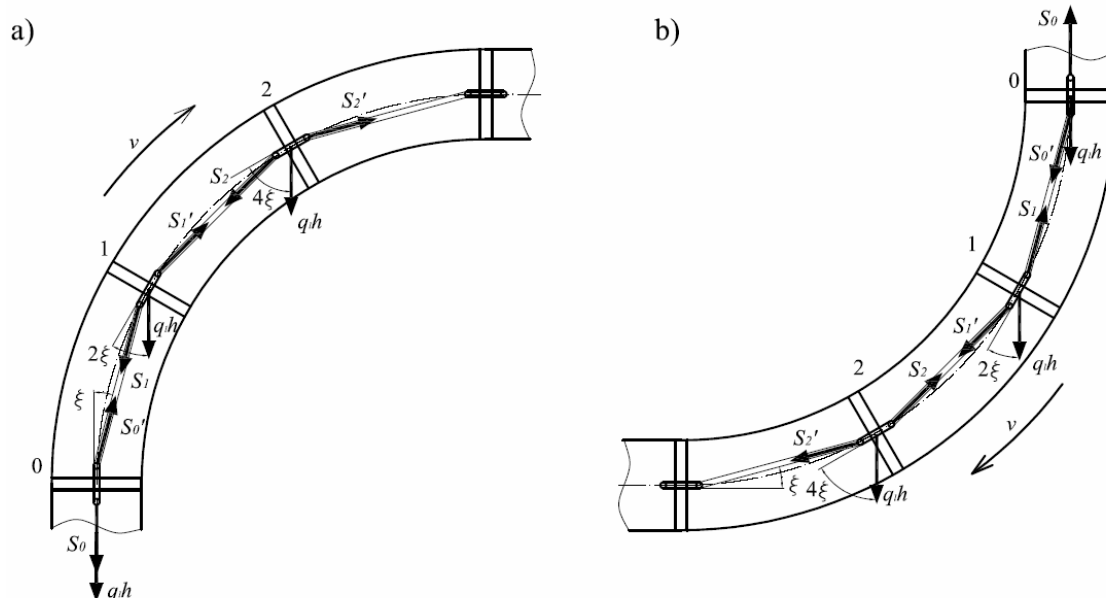
Na pionowych łukach trasy występują opory tarcia ciągną ze zgrzeblami związane z ich naciskami na rynnę, jak również powodowane składową pionową ich ciężaru oraz transportowanego materiału. Łuki pionowe w przenośniku zgrzeblowym rurowym mogą mieć cztery konfiguracje w zależności od kierunku ruchu ciągną oraz ukształtowania łuku. W pracy rozpatrzono je w następującej kolejności (rys. 4.7 i 4.8):

1. łuk pionowy wypukły przy ruchu ciągną „w górę” – W_{yg} (rys. 4.7a),
2. łuk pionowy wklęsły przy ruchu ciągną „w dół” – W_{kd} (rys. 4.7b),
3. łuk pionowy wklęsły przy ruchu ciągną „w górę” – W_{kg} (rys. 4.8a),
4. łuk pionowy wypukły przy ruchu ciągną „w dół” – W_{yd} (rys. 4.8b).

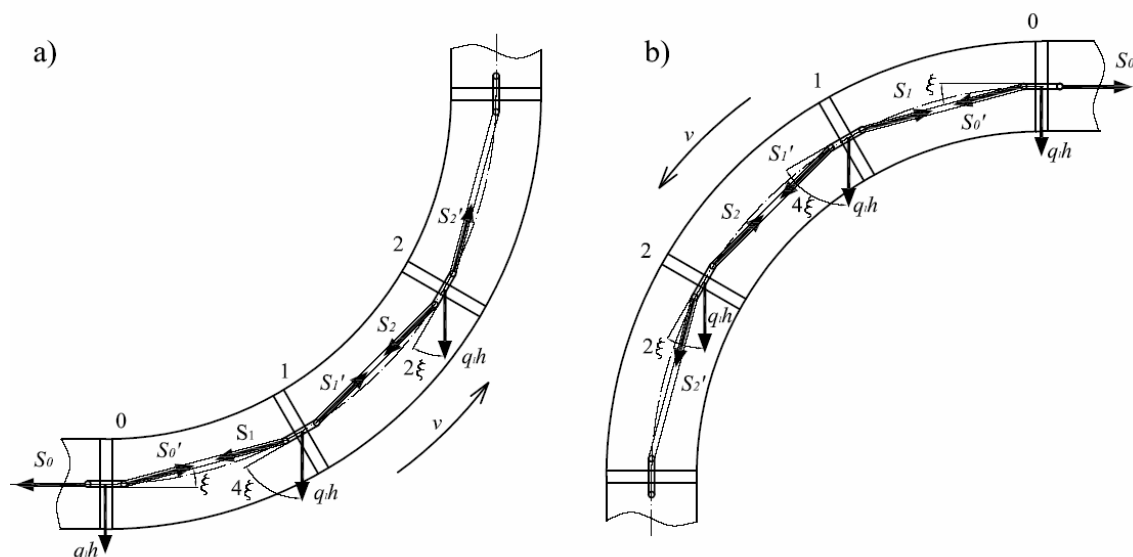
Wymienione wyżej konfiguracje łuku pionowego, podobnie jak przy łuku poziomym, będą analizowane dla pracy przenośnika:

- a) ze znacznym luzem pomiędzy zgrzeblami a rynną,
- b) z minimalnym luzem pomiędzy zgrzeblami a rynną.

Przyjęto, że współczynniki tarcia transportowanego materiału i zgrzebeł o rynnę mają wartości stałe. Zakładając odpowiednio duże siły napięcia ciągną w stosunku do sił tarcia zgrzebeł o rynnę na łuku, przyjęto upraszczając, że zgrzebła te mają układ radialny.



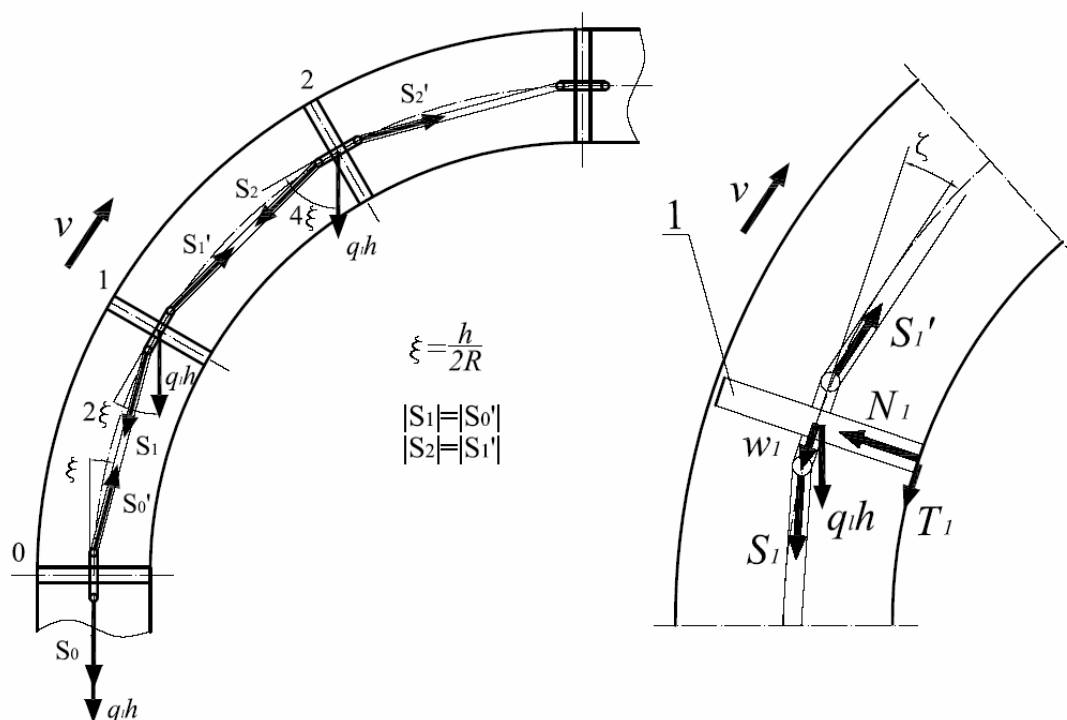
Rys. 4.7. Schematy sił dla łuku pionowego: a) wypukłego i b) wklęsłego



Rys. 4.8. Schematy sił dla łuku pionowego: a) wklęsłego i b) wypukłego

Najpierw rozpatrzono opory ruchu przenośnika ze znacznym luzem pomiędzy zgrzeblami a rynną. Ze względu na dużą liczbę i złożoność przekształceń matematycznych, szczegółowo przedstawiono tylko pierwszy z rozpatrywanych przypadków (rys. 4.9), a dla pozostałych – podano jedynie wyniki końcowe.

1a) Opór ruchu przenośnika wraz z materiałem na łuku pionowym wypukłym - „ruch w górę” (rys. 4.9).



Rys. 4.9. Schematy do wyznaczenia oporów ruchu na łuku pionowym wypukłym przy ruchu cięgna „w górę”

Równania równowagi zgrzebla „0” (rys. 4.5) mają postać [10]:

$$\begin{aligned} S'_0 \sin \xi - N_0 &= 0 \\ S'_0 \cos \xi - S_0 - w_0 - q_l h - T_0 &= 0 \\ S_0 \cdot \frac{D}{2} + w_0 \cdot \frac{D}{2} + q_l h \cdot \frac{D}{2} - S'_0 \cos \xi \cdot \frac{D}{2} - S'_0 \sin \xi \cdot \frac{a}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.55)$$

skąd:

$$S'_0 = \frac{S_0 + w_0 + q_l h}{\cos \xi - \mu_l \sin \xi} \quad (4.56)$$

Opór zgrzebla na wejściu w łuk wynosi:

$$\begin{aligned} W_0 &= T_0 + w_0 + q_l h = \mu_l N_0 + w_0 + q_l h \\ W_0 &= \mu_l \frac{S_0 + w_0 + q_l h}{\operatorname{ctg} \xi - \mu_l} + w_0 + q_l h \end{aligned} \quad (4.57)$$

Opór przemieszczania materiału przez zgrzeblo „0” wynosi [10]:

$$w_0 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot \gamma_m h \left(\mu \cos \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) + \sin \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \right) \cdot e^{\frac{4\mu k D}{D^2 - d^2} \cdot h \cdot \operatorname{sgn} \left(\left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) - \alpha_{gr} \right)} \quad (4.58)$$

Równania równowagi zgrzebla „1” na łuku mają postać [10]:

$$\begin{aligned} S'_1 \sin \xi + S_1 \sin \xi + q_l h \sin 2\xi - N_1 &= 0 \\ S'_1 \cos \xi - S_1 \cos \xi - q_l h \cos 2\xi - w_1 - T_1 &= 0 \\ S_1 \cos \xi \cdot \frac{D}{2} + S_1 \sin \xi \cdot \frac{a}{2} + q_l h \cos 2\xi \cdot \frac{D}{2} + w_1 \cdot \frac{D}{2} - S'_1 \sin \xi \cdot \frac{a}{2} - S'_1 \cos \xi \cdot \frac{D}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.59)$$

skąd:

$$\begin{aligned} S'_1 &= S_1 \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + \frac{w_1 + q_l h (\cos 2\xi + \mu_l \sin 2\xi)}{(1 - \mu_l \tan \xi) \cos \xi} \\ N_1 &= S_1 \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{(w_1 + q_l h (\cos 2\xi + \mu_l \sin 2\xi)) \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + q_l h \sin 2\xi \end{aligned} \quad (4.60)$$

Opór przemieszczania zgrzebla „1” wynosi [10]:

$$\begin{aligned} W_1 &= T_1 + w_1 + q_l h \cos 2\xi = \mu_l N_1 + w_1 + q_l h \cos 2\xi \\ W_1 &= \mu_l \left[S'_1 \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{(w_1 + q_l h (\cos 2\xi + \mu_l \sin 2\xi)) \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + q_l h \sin 2\xi \right] + \\ &+ w_1 + q_l h \cos 2\xi \end{aligned} \quad (4.61)$$

Opór przemieszczania materiału przez zgrzeblo „1” wyraża zależność [10]:

$$w_1 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot \gamma_m h \left(\mu \cos \left(\frac{\pi}{2} - 3\xi \right) + \sin \left(\frac{\pi}{2} - 3\xi \right) \right) \cdot e^{\frac{4\mu k D}{D^2 - d^2} \cdot h \cdot \operatorname{sgn} \left(\left(\frac{\pi}{2} - 3\xi \right) - \alpha_{gr} \right)} \quad (4.62)$$

Równania równowagi zgrzebla „2” na łuku mają postać:

$$\begin{aligned} S_2' \sin \xi + S_2 \sin \xi + q_l h \sin 4\xi - N_2 &= 0 \\ S_2' \cos \xi - S_2 \cos \xi - q_l h \cos 4\xi - w_2 - T_2 &= 0 \\ S_2 \cos \xi \cdot \frac{D}{2} + S_2 \sin \xi \cdot \frac{a}{2} + q_l h \cos 4\xi \cdot \frac{D}{2} + w_2 \cdot \frac{D}{2} - S_2' \sin \xi \cdot \frac{a}{2} - S_2' \cos \xi \cdot \frac{D}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.63)$$

skąd:

$$\begin{aligned} S_2' &= S_2 \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + \frac{w_2 + q_l h (\cos 4\xi + \mu_l \sin 4\xi)}{(1 - \mu_l \tan \xi) \cos \xi} \\ N_2 &= S_2 \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{(w_2 + q_l h (\cos 4\xi + \mu_l \sin 4\xi)) \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + q_l h \sin 4\xi \end{aligned} \quad (4.64)$$

Opór obciążający zgrzeblo „2” wynosi [10]:

$$\begin{aligned} W_2 &= T_2 + w_2 + q_l h \cos 4\xi = \mu_l N_2 + w_2 + q_l h \cos 4\xi \\ W_2 &= \mu_l \left[S_2' \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{(w_2 + q_l h (\cos 4\xi + \mu_l \sin 4\xi)) \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + q_l h \sin 4\xi \right] + \\ &+ w_2 + q_l h \cos 4\xi \end{aligned} \quad (4.65)$$

Opór przemieszczania materiału przez zgrzeblo „2” wynosi [10]:

$$w_2 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot \gamma_m \cdot h \cdot \left(\mu \cos \left(\frac{\pi}{2} - 5\xi \right) + \sin \left(\frac{\pi}{2} - 5\xi \right) \right) \cdot e^{\frac{4 \cdot \mu \cdot k \cdot D}{D^2 - d^2} \cdot h \cdot \operatorname{sgn} \left(\left(\frac{\pi}{2} - 5\xi \right) - \alpha_{gr} \right)} \quad (4.66)$$

Otrzymane zależności (4.57, 4.61, 4.62) na opory ruchu zgrzebeł i materiału znajdujących się na łuku można przedstawić w ogólniejszej postaci. Opór ruchu i -tego zgrzebla na łuku wynosi [10]:

$$\begin{aligned} W_i &= \mu_l \left[S_{i-1}' \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{(w_i + q_l h (\cos(2i \cdot \xi) + \mu_l \sin(2i \cdot \xi))) \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + q_l h \sin(2i \cdot \xi) \right] + \\ &+ w_i + q_l h \cos(2i \cdot \xi) \end{aligned} \quad (4.67)$$

gdzie:

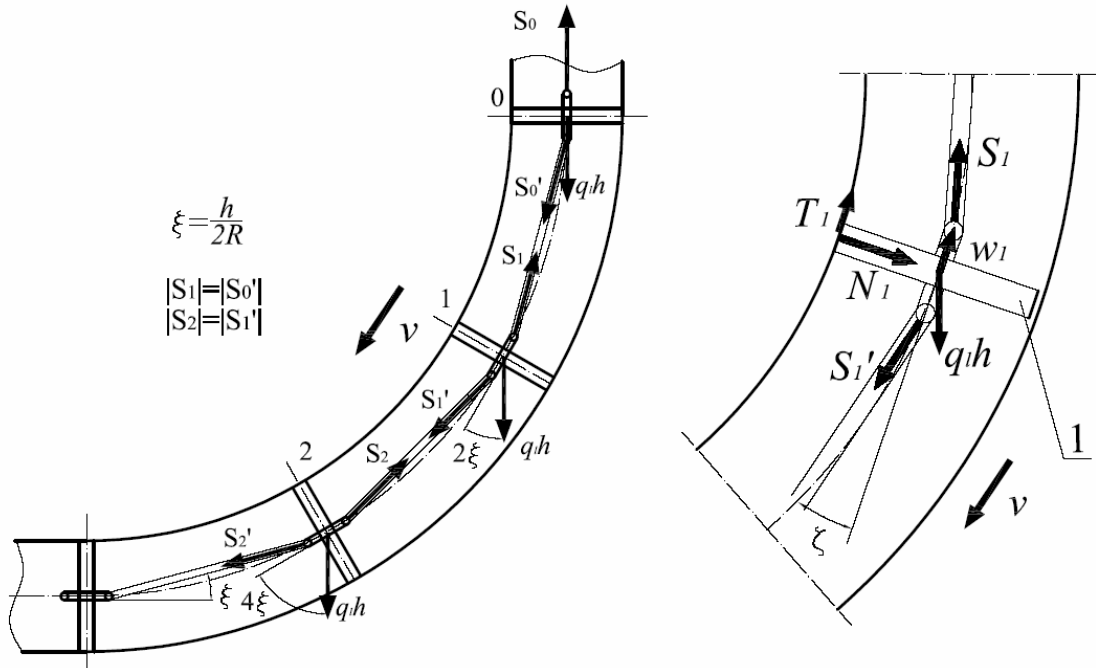
$$S_i' = S_{i-1}' \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + \frac{w_i + q_l h (\cos(2i \cdot \xi) + \mu_l \sin(2i \cdot \xi))}{(1 - \mu_l \tan \xi) \cos \xi}, \quad (4.68)$$

Opór ruchu i -tej porcji materiału na łuku opisuje zależność [10]:

$$w_i = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot \gamma_m h \left(\mu \cos \left(\frac{\pi}{2} - (2i+1)\xi \right) + \sin \left(\frac{\pi}{2} - (2i+1)\xi \right) \right) \cdot e^{\frac{4 \mu k D}{D^2 - d^2} \cdot h \cdot \operatorname{sgn} \left(\left(\frac{\pi}{2} - (2i+1)\xi \right) - \alpha_{gr} \right)} \quad (4.69)$$

gdzie: i – numery kolejnych zgrzebeł na łuku ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

2a) Opór ruchu przenośnika wraz z materiałem na łuku pionowym wklęsłym - ruch „w dół” (rys. 4.10).



Rys. 4.10. Schematy sił do wyznaczenia oporów ruchu na łuku pionowym wklęsłym przy ruchu ciężna „w dół”

Z równań równowagi dla zgrzebla „0” (rys. 4.5) otrzymano:

$$S_0' = \frac{S_0 + w_i - q_l h}{\cos \xi - \mu_l \sin \xi} \quad (4.70)$$

Opór zgrzebla „0” na wejściu w łuk opisuje zależność [10]:

$$W_0 = \mu_l \frac{S_0 + w_0 - q_l h}{\operatorname{ctg} \xi - \mu_l} + w_0 - q_l h \quad (4.71)$$

Opór ruchu i - tego zgrzebla na łuku ma postać [10]:

$$W_i = \mu_l \left[S_{i-1}' \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{(w_i - q_l h (\cos(2i \cdot \xi) + \mu_l \sin(2i \cdot \xi))) \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} - q_l h \sin(2i \cdot \xi) \right] + w_i - q_l h \cos(2i \cdot \xi) \quad (4.72)$$

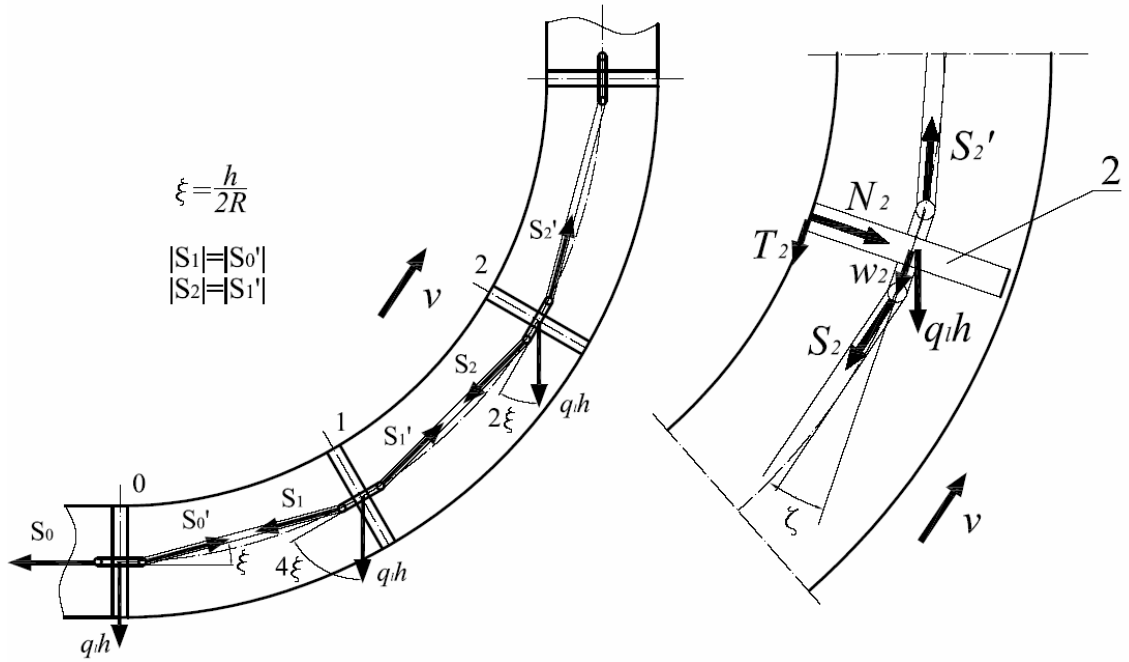
gdzie:

$$S_i' = S_{i-1}' \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + \frac{w_i - q_l h (\cos(2i \cdot \xi) + \mu_l \sin(2i \cdot \xi))}{(1 - \mu_l \tan \xi) \cos \xi} \quad (4.73)$$

Opór ruchu i - tej porcji materiału, znajdującej się na jak na rys. 4.10, ma postać [10]:

$$w_i = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot \gamma_m h \left(\mu \cos\left(-\frac{\pi}{2} + (2i+1)\xi\right) + \sin\left(-\frac{\pi}{2} + (2i+1)\xi\right) \right) \cdot e^{\frac{4\mu k D}{D^2 - d^2} h \cdot \operatorname{sgn}\left(\left(-\frac{\pi}{2} + (2i+1)\xi\right) - \alpha_{gr}\right)} \quad (4.74)$$

3a) Opór ruchu przenośnika wraz z materiałem na łuku pionowym wklęsłym - ruch „w górę” (rys. 4.11).



Rys. 4.11. Schematy sił do wyznaczenia oporów ruchu na łuku pionowym wklęsłym przy ruchu cięgna „w górę”

Z równań równowagi dla zgrzebla „0” (rys. 4.5) otrzymano:

$$S'_0 = \frac{S_0 + w_0 - q_l \mu_l h}{\cos \xi - \mu_l \sin \xi} \quad (4.75)$$

Opór ruchu zgrzebla „0” na wejściu w łuk:

$$W_0 = \mu_l \left(\frac{S_0 + w_0 - q_l \mu_l h}{\operatorname{ctg} \xi - \mu_l} - q_l h \right) + w \quad (4.76)$$

Opór ruchu i - tego zgrzebla na łuku wyraża zależność [10]:

$$W_i = \mu_l \left[S'_{i-1} \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{(w_i + q_l h (\cos(2(n-i+1) \cdot \xi) - \mu_l \sin(2(n-i+1) \cdot \xi))) \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} - q_l h \sin(2(n-i+1) \cdot \xi) \right] + w_i + q_l h \cos(2(n-i+1) \cdot \xi) \quad (4.77)$$

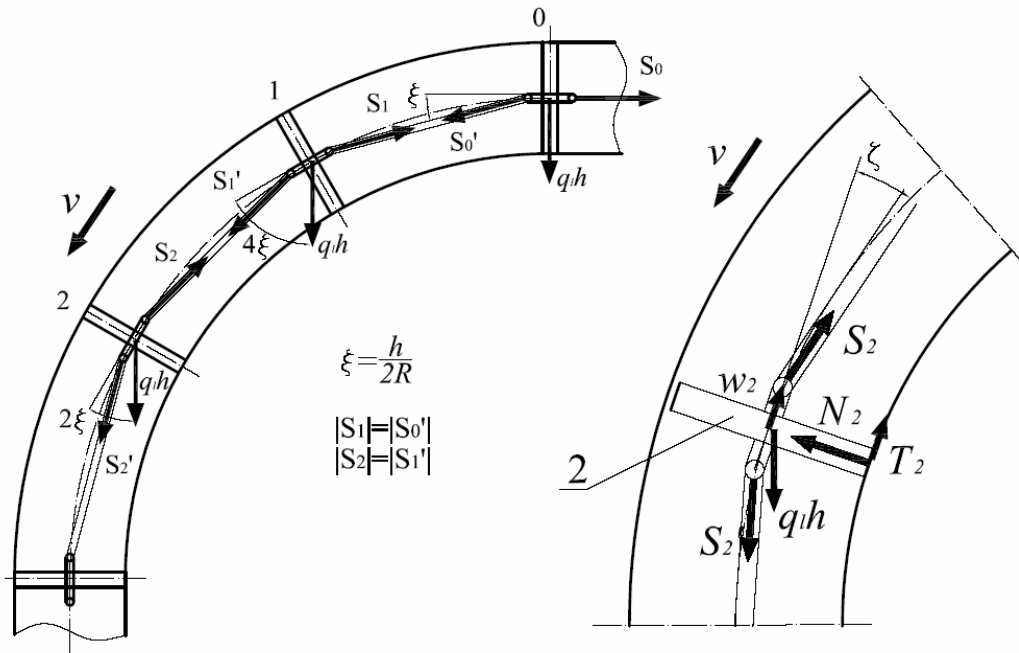
gdzie:

$$S'_i = S'_{i-1} \frac{1 + \mu_i \tan \xi}{1 - \mu_i \tan \xi} + \frac{w_i + q_i h (\cos(2(n-i+1) \cdot \xi) - \mu_i \sin(2(n-i+1) \cdot \xi))}{(1 - \mu_i \tan \xi) \cos \xi} \quad (4.78)$$

Opór ruchu i -tej porcji materiału znajdującej się na łuku (jak na rys. 4.11) ma postać [10]:

$$w_i = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot \gamma_m h (\mu \cos((2i+1)\xi) + \sin((2i+1)\xi)) \cdot e^{\frac{4\mu k D}{D^2 - d^2} h \cdot \text{sgn}(((2i+1)\xi) - \alpha_{gr})} \quad (4.79)$$

4a) Opór ruchu przenośnika wraz z materiałem na łuku pionowym wypukłym - ruch „w dół” (rys. 4.12).



Rys. 4.12. Schematy sił do wyznaczenia oporów ruchu na łuku pionowym wypukłym przy ruchu cięga „w dół”

Z równań równowagi dla zgrzebła „0” (rys. 4.5) otrzymano:

$$S'_0 = \frac{S_0 + w_0 + q_l \mu_l h}{\cos \xi - \mu_l \sin \xi} \quad (4.80)$$

Opór ruchu zgrzebła „0” na wejściu w łuk ma postać [10]:

$$W_0 = \mu_l \left(\frac{S_0 + w_0 + q_l \mu_l h}{\text{ctg} \xi - \mu_l} + q_l h \right) + w_0 \quad (4.81)$$

Opór ruchu i - tego zgrzebła na łuku opisuje zależność [10]:

$$W_i = \mu_l \left[S'_{i-1} \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi + \frac{(w_i - q_l h (\cos(2(n-i+1) \cdot \xi) - \mu_l \sin(2(n-i+1) \cdot \xi))) \cdot \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + \right. \\ \left. + q_l h \sin(2(n-i+1) \cdot \xi) \right] + w_i - q_l h \cos(2(n-i+1) \cdot \xi) \quad (4.82)$$

gdzie:

$$S'_i = S'_{i-1} \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} + \frac{w_i - q_l h (\cos(2(n-i+1) \cdot \xi) - \mu_l \sin(2(n-i+1) \cdot \xi))}{(1 - \mu_l \tan \xi) \cos \xi} \quad (4.83)$$

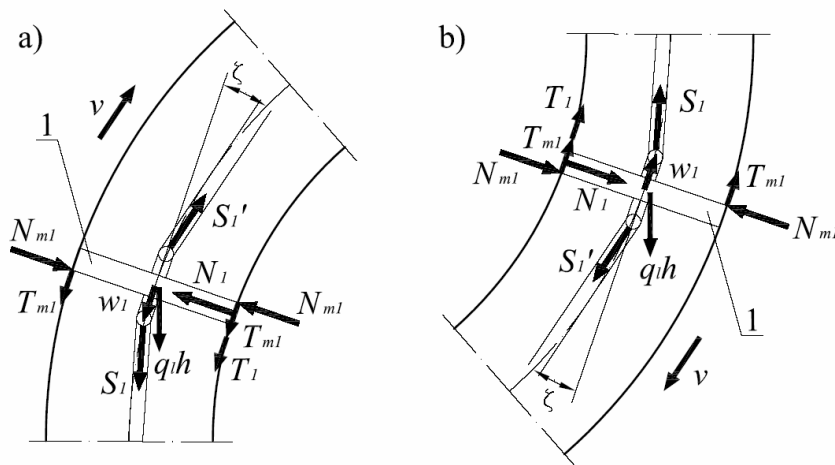
Opór ruchu i - tej porcji materiału znajdującej się na łuku (jak na rys. 4.12) opisuje zależność [10]:

$$w_i = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot \gamma_m h (\mu \cos(-(2i+1)\xi) + \sin(-(2i+1)\xi)) \cdot e^{\frac{4\mu k D}{D^2 - d^2} h \cdot \text{sgn}((-2i+1)\xi) - \alpha_{gr}} \quad (4.84)$$

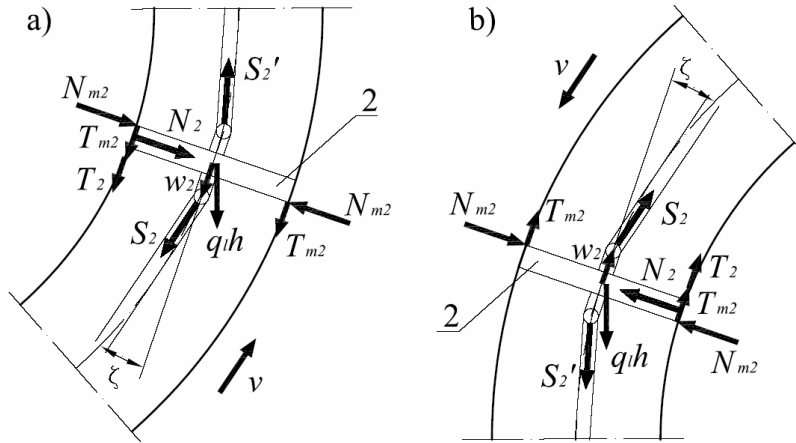
Dla przypadków jak na rysunkach 4.9 – 4.12 całkowity opór ruchu na łuku pionowym jest sumą oporów przemieszczania zgrzebła na wejściu w łuk oraz znajdujących się w łuku wraz z materiałem i wyraża się zależnością:

$$W = W_0 + \sum_{i=1}^n W_i \quad (4.85)$$

W sposób podobny wyznaczono opory ruchu przenośnika pracującego z minimalnym luzem pomiędzy zgrzeblami a rynną. Poszczególne przypadki rozpatrywano w identycznej kolejności jak przy pracy przenośnika ze znacznym luzem pomiędzy zgrzeblami a rynną (rysunki 4.13 i 4.14).



Rys. 4.13. Schemat sił do wyznaczenia oporów ruchu na łuku pionowym:
a) wypukłym i b) wklęsłym



Rys. 4.14. Schemat sił do wyznaczenia oporów ruchu na łuku pionowym:
a) wklęsłym i b) wypukłym

1b) Opór ruchu przenośnika wraz z materiałem na łuku pionowym wypukłym - ruch „w górę” (rys. 4.13a).

Równania równowagi zgrzebła „0” (rys. 4.5) na wejściu w łuk mają postać [10]:

$$\begin{aligned} S'_0 \sin \xi - N_0 &= 0 \\ S'_0 \cos \xi - S_0 - w_0 - q_l h - T_0 - 2 \cdot T_{m0} &= 0 \\ N_{m0} \cdot g_z - S'_0 \sin \xi \cdot \frac{a}{2} - T_0 \cdot \frac{D}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.86)$$

skąd siły obciążające zgrzebło „0” wynoszą:

$$\begin{aligned} S'_0 &= \frac{S_0 + w_0 + q_l h}{\cos \xi - \mu_l \sin \xi - \frac{\mu_l \cdot \sin \xi (a + \mu_l \cdot D)}{g_z}} \\ N_{m0} &= \frac{S'_0 \sin \xi (a + \mu_l \cdot D)}{2 \cdot g_z} \end{aligned} \quad (4.87)$$

Opór obciążający zgrzebło „0” wynosi:

$$\begin{aligned} W_0 &= T_0 + 2 \cdot T_{m0} + w_0 + q_l h = \mu_l N_0 + 2 \cdot N_{m0} + w_0 + q_l h \\ W_0 &= \frac{\mu_l (S_0 + w_0 + q_l h)}{\cos \xi - \mu_l \sin \xi - \frac{\mu_l \cdot \sin \xi (a + \mu_l \cdot D)}{g_z}} + \frac{(S_0 + w_0 + q_l h) \cdot \mu_l \cdot \sin \xi \cdot (a + \mu_l \cdot D)}{g_z \cdot (\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \cdot \sin \xi \cdot (a + \mu_l \cdot D)} + w_0 + q_l h \end{aligned} \quad (4.88)$$

Dla zgrzebła „1” na łuku równania równowagi sił mają postać [10]:

$$\begin{aligned} q_l h \sin 2\xi + S'_1 \sin \xi + S_1 \sin \xi - N_1 &= 0 \\ S'_1 \cos \xi - S_1 \cos \xi - q_l h \cos 2\xi - w_1 - T_1 - 2 \cdot T_{m1} &= 0 \\ S_1 \sin \xi \cdot \frac{a}{2} + N_{m1} \cdot g_z - S'_1 \sin \xi \cdot \frac{a}{2} - T_1 \cdot \frac{D}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.89)$$

skąd siły obciążające zgrzebło „1” wynoszą:

$$\begin{aligned}
 S_1' &= \frac{S_1(g_z(\cos \xi + \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi(a - \mu_l D)) + g_z(w_1 + q_l h(\cos 2\xi + \mu_l \sin 2\xi)) + q_l h \cdot D \cdot \mu_l^2 \cdot \sin 2\xi}{g_z(\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi(a + \mu_l D)} \\
 N_{m1} &= \frac{a \cdot (S_1' - S_1) \sin \xi + ((S_1' + S_1) \sin \xi + q_l h \cdot \sin 2\xi) \cdot \mu_l D}{2g_z} \\
 N_1 &= (S_1' + S_1) \sin \xi + q_l h \cdot \sin 2\xi
 \end{aligned} \tag{4.90}$$

Opór obciążający zgrzebło „1” wynosi:

$$\begin{aligned}
 W_1 &= T_1 + 2T_{m1} + w_1 + q_l h \cos 2\xi \\
 W_1 &= \mu_l \sin \xi (S_1' + S_0') + q_l h (\cos 2\xi + \mu_l \sin 2\xi) + \\
 &+ \mu_l \cdot \frac{a \cdot (S_1' - S_0') \sin \xi + ((S_1' + S_0') \sin \xi + q_l h \cdot \sin 2\xi) \cdot \mu_l D}{g_z} + w_1
 \end{aligned} \tag{4.91}$$

Dla zgrzebła „2” na łuku równania równowagi sił mają postać [10]:

$$\begin{aligned}
 q_l h \sin 4\xi + S_2' \sin \xi + S_2 \sin \xi - N_2 &= 0 \\
 S_2' \cos \xi - S_2 \cos \xi - q_l h \cos 4\xi - w_2 - T_2 - 2 \cdot T_{m2} &= 0 \\
 S_2 \sin \xi \cdot \frac{a}{2} + N_{m2} \cdot g_z - S_2' \sin \xi \cdot \frac{a}{2} - T_2 \cdot \frac{D}{2} &= 0
 \end{aligned} \tag{4.92}$$

skąd siły obciążające zgrzebło „2” wynoszą:

$$\begin{aligned}
 S_2' &= \frac{S_2(g_z(\cos \xi + \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi(a - \mu_l D)) + g_z(w_1 + q_l h(\cos 4\xi + \mu_l \sin 4\xi)) + q_l h \cdot D \cdot \mu_l^2 \cdot \sin 4\xi}{g_z(\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi(a + \mu_l D)} \\
 N_{m2} &= \frac{a \cdot (S_2' - S_2) \sin \xi + ((S_2' + S_2) \sin \xi + q_l h \cdot \sin 4\xi) \cdot \mu_l D}{2g_z} \\
 N_2 &= (S_2' + S_2) \sin \xi + q_l h \cdot \sin 4\xi
 \end{aligned} \tag{4.93}$$

Opór obciążający zgrzebło „2” wynosi:

$$\begin{aligned}
 W_2 &= T_2 + 2T_{m2} + w_2 + q_l h \cos 4\xi \\
 W_2 &= \mu_l \sin \xi (S_2' + S_1') + q_l h (\cos 4\xi + \mu_l \sin 4\xi) + \\
 &+ \mu_l \cdot \frac{a \cdot (S_2' - S_1') \sin \xi + ((S_2' + S_1') \sin \xi + q_l h \cdot \sin 4\xi) \cdot \mu_l D}{g_z} + w_2
 \end{aligned} \tag{4.94}$$

2b) Opór ruchu przenośnika wraz z materiałem na łuku pionowym wklęsłym - ruch „w dół” (rys. 4.13b).

Opór ruchu zgrzebla „0” (rys. 4.5) na wejściu w łuk opisuje zależność [10]:

$$W_0 = \frac{\mu_l (S_0 + w_0 - q_l h)}{\operatorname{ctg} \xi - \mu_l - \frac{\mu_l \cdot (a + \mu_l \cdot D)}{g_z}} + \frac{(S_0 + w_0 - q_l h) \cdot \mu_l \cdot \sin \xi \cdot (a + \mu_l \cdot D)}{g_z \cdot (\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \cdot \sin \xi \cdot (a + \mu_l \cdot D)} + w_0 - q_l h \quad (4.95)$$

gdzie:

$$S'_0 = \frac{S_0 + w_0 - q_l h}{\cos \xi - \mu_l \sin \xi - \frac{\mu_l \cdot \sin \xi (a + \mu_l \cdot D)}{g_z}} \quad (4.96)$$

Opór ruchu i - tego zgrzebla:

$$W_i = \mu_l \sin \xi (S'_i + S'_{i-1}) - q_l h (\cos(2i \cdot \xi) + \mu_l \sin(2i \cdot \xi)) + \mu_l \cdot \frac{a \cdot (S'_i - S'_{i-1}) \sin \xi + ((S'_i + S'_{i-1}) \sin \xi - q_l h \cdot \sin(2i \cdot \xi)) \cdot \mu_l D}{g_z} + w_i \quad (4.97)$$

gdzie:

$$S'_i = \frac{S'_{i-1} (g_z (\cos \xi + \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi (a - \mu_l D)) + g_z (w_1 - q_l h (\cos(2i \cdot \xi) + \mu_l \sin(2i \cdot \xi)))}{g_z (\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi (a + \mu_l D)} - \frac{q_l h \cdot D \cdot \mu_l^2 \cdot \sin(2i \cdot \xi)}{g_z (\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi (a + \mu_l D)} \quad (4.98)$$

3b) Opór ruchu przenośnika wraz z materiałem na łuku pionowym wklęsłym - ruch „w górę” (rys. 4.14a).

Opór ruchu zgrzebla „0” (rys. 4.5) na wejściu w łuk opisuje zależność [10]:

$$W_0 = \mu_l \left(S'_0 \sin \xi - q_l h + \frac{S'_0 \sin \xi (a + \mu_l D) - q_l h \cdot \mu_l D}{g_z} \right) + w_0 \quad (4.99)$$

gdzie:

$$S'_0 = \frac{g_z \cdot (S_0 + w_0 - q_l \mu_l h) - \mu_l^2 D \cdot q_l h}{g_z (\cos \xi - \mu_l \sin \xi) - \mu_l \sin \xi (a + \mu_l D)} \quad (4.100)$$

Opór ruchu i - tego zgrzebla na łuku wynosi [10]:

$$W_i = \mu_l \sin \xi (S'_i + S'_{i-1}) + q_l h (\cos(2(n-i+1) \cdot \xi) - \mu_l \sin(2(n-i+1) \cdot \xi)) + \mu_l \cdot \frac{a \cdot (S'_i - S'_{i-1}) \sin \xi + ((S'_i + S'_{i-1}) \sin \xi - q_l h \cdot \sin(2(n-i+1) \cdot \xi)) \cdot \mu_l D}{g_z} + w_i \quad (4.101)$$

gdzie:

$$S'_i = \frac{S'_{i-1}(g_z(\cos\xi + \mu_l \sin\xi) - \mu_l \sin\xi(a - \mu_l D)) + g_z(w_1 + q_l h(\cos 2(n-i+1) - \mu_l \sin 2(n-i+1)))}{g_z(\cos\xi - \mu_l \sin\xi) - \mu_l \sin\xi(a + \mu_l D)} - \frac{q_l h \cdot \mu_l^2 \cdot D \cdot \sin 2(n-i+1)}{g_z(\cos\xi - \mu_l \sin\xi) - \mu_l \sin\xi(a + \mu_l D)} \quad (4.102)$$

4b) Opór ruchu przenośnika wraz z materiałem na łuku pionowym wypukłym - ruch „w dół” (rys. 4.14b).

Opór ruchu zgrzeblą na wejściu w łuk opisuje zależność [10]:

$$W_0 = \mu_l \left(S'_0 \sin\xi + q_l h + \frac{S'_0 \sin\xi(a + \mu_l D) + q_l h \cdot \mu_l D}{g_z} \right) + w_0 \quad (4.103)$$

gdzie:

$$S'_0 = \frac{g_z \cdot (S_0 + w_0 + q_l \mu_l h) + \mu_l^2 D \cdot q_l h}{g_z(\cos\xi - \mu_l \sin\xi) - \mu_l \sin\xi(a + \mu_l D)} \quad (4.104)$$

Opór ruchu i - tego zgrzeblą na łuku wynosi [10]:

$$W_i = \mu_l \sin\xi(S'_i + S'_{i-1}) - q_l h(\cos(2(n-i+1) \cdot \xi) + \mu_l \sin(2(n-i+1) \cdot \xi)) + \mu_l \cdot \frac{a \cdot (S'_i - S'_{i-1}) \sin\xi + ((S'_i + S'_{i-1}) \sin\xi - q_l h \cdot \sin(2(n-i+1) \cdot \xi)) \cdot \mu_l D}{g_z} + w_i \quad (4.105)$$

gdzie:

$$S'_i = \frac{S'_{i-1}(g_z(\cos\xi + \mu_l \sin\xi) - \mu_l \sin\xi(a - \mu_l D)) + g_z(w_1 - q_l h(\cos 2(n-i+1) + \mu_l \sin 2(n-i+1)))}{g_z(\cos\xi - \mu_l \sin\xi) - \mu_l \sin\xi(a + \mu_l D)} + \frac{q_l h \cdot \mu_l^2 \cdot D \cdot \sin 2(n-i+1)}{g_z(\cos\xi - \mu_l \sin\xi) - \mu_l \sin\xi(a + \mu_l D)} \quad (4.106)$$

W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano zależności (4.40, 4.67, 4.72, 4.77, 4.82) pozwalające wyznaczyć opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego na łukach poziomych i pionowych. Przypadek, gdy przenośnik pracuje z minimalnym luzem pomiędzy rynną a zgrzeblą (przenośniki pyło-, gazo i wodoszczelne) został rozpatrzony w celu pokazania różnic ilościowych oporów ruchu w stosunku do przenośnika pracującego ze znacznym luzem. Na podstawie uzyskanych zależności można analizować wpływ wybranych parametrów na opory ruchu przenośnika na łukowych odcinkach trasy, będzie to przedmiotem następnego rozdziału pracy.

5. Analiza wpływu wybranych parametrów na opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego

Przeprowadzona w poprzednim rozdziale analiza teoretyczna oporów przemieszczania warstwy materiału sypkiego rurowej rynnie pozwoliła na uzyskanie zależności na opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego na odcinku prostym o dowolnym nachyleniu – oraz na odcinkach łukowych poziomych i pionowych. Otrzymane zależności pozwalają na analizowanie wpływu wybranych parametrów na opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego.

Otrzymana zależność (4.20) opisująca opory przemieszczania w rurowej rynnie warstwy materiału o grubości h ma postać:

$$w_r = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m h (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot e^{\frac{4\mu k D h}{D^2 - d^2} \operatorname{sgn}(\alpha - \alpha_{gr})} \quad (5.1)$$

i składa się ona z dwóch czynników:

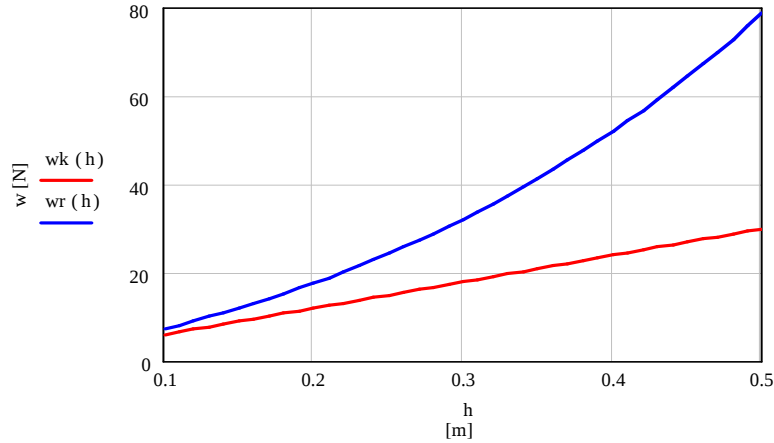
$$\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot \gamma_m \cdot h \cdot (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) = w_k \quad (5.2)$$

oraz:

$$e^{\frac{4\mu \cdot k \cdot D \cdot h}{D^2 - d^2} \operatorname{sgn}(\alpha - \alpha_{gr})} \quad (5.3)$$

Czynnik (5.2) opisuje opory przemieszczania materiału w konwencjonalnym przenośniku zgrzeblowym z rynną otwartą, natomiast czynnik (5.3) uwzględnia dodatkowe opory związane z „rozpierzaniem się” materiału w rurowej rynnie występujące w przenośnikach zgrzeblowych rurowych. Zatem opory przemieszczania

materiału w przenośniku zgrzeblowym rurowym (przy $\alpha > \alpha_{gr}$) są $e^{\frac{4\mu \cdot k \cdot D \cdot h}{D^2 - d^2}}$ - krotnie większe niż w konwencjonalnym przenośniku zgrzeblowym z rynną otwartą [1, 5]. Różnice oporów ruchu tych przenośników przedstawiono na rys. 5.1 (wykresy sporządzono w oparciu o zależności 5.1 i 5.2). Na rys. 5.1 widać, że wraz ze zwiększaniem grubości warstwy materiału h , opór rośnie liniowo w przenośniku z rynną otwartą (w_k), natomiast wykładniczo - w przenośniku zgrzeblowym rurowym (w_r). Opory przemieszczania materiału w przenośniku zgrzeblowym rurowym silnie zależą od grubości warstwy materiału h .



Rys. 5.1. Wpływ grubości h warstwy materiału na jej opory ruchu przy:

$\alpha = 0^\circ$; $k = 0,16$; $\gamma_m = 7\,600 \text{ N/m}^3$ (suchy popiół); $\mu = 0,45$; $D = 0,15 \text{ m}$, $d = 0,015 \text{ m}$,
 $w_r(h)$ - w przenośniku zgrzebłowym rurowym; $w_k(h)$ - w przenośniku konwencjonalnym

Warto zauważyć, że gdy w zależności (4.20) przyjmie się $k = 0$ ($k = 0$ dla $\varphi = 90^\circ$ - ciało stałe), to czynnik $e^{\frac{4 \cdot \mu \cdot k \cdot D \cdot h}{D^2 - d^2}} = 1$. Wtedy zależność (4.20) przyjmuje postać (5.2), czyli opisuje opory przemieszczania materiału w przenośniku z rynną otwartą. Można więc stwierdzić, że zależność opisująca opory ruchu konwencjonalnego przenośnika zgrzebłowego z rynną otwartą jest przypadkiem szczególnym zależności opisującej opory ruchu przenośnika zgrzebłowego rurowego.

5.1. Wpływ wybranych parametrów na opory ruchu przenośnika zgrzebłowego rurowego na odcinku prostym

Analizowano wpływ na opory ruchu przenośnika zgrzebłowego rurowego następujących parametrów:

- konstrukcyjno – geometrycznych przenośnika: h , D , α , μ_l ,
- charakteryzujących właściwości materiału transportowanego: μ , k , γ_m .

Opory jednostkowe ruchu przenośnika zgrzebłowego rurowego, czyli odniesione do jednostki długości przenośnika, wyrażają się zależnością:

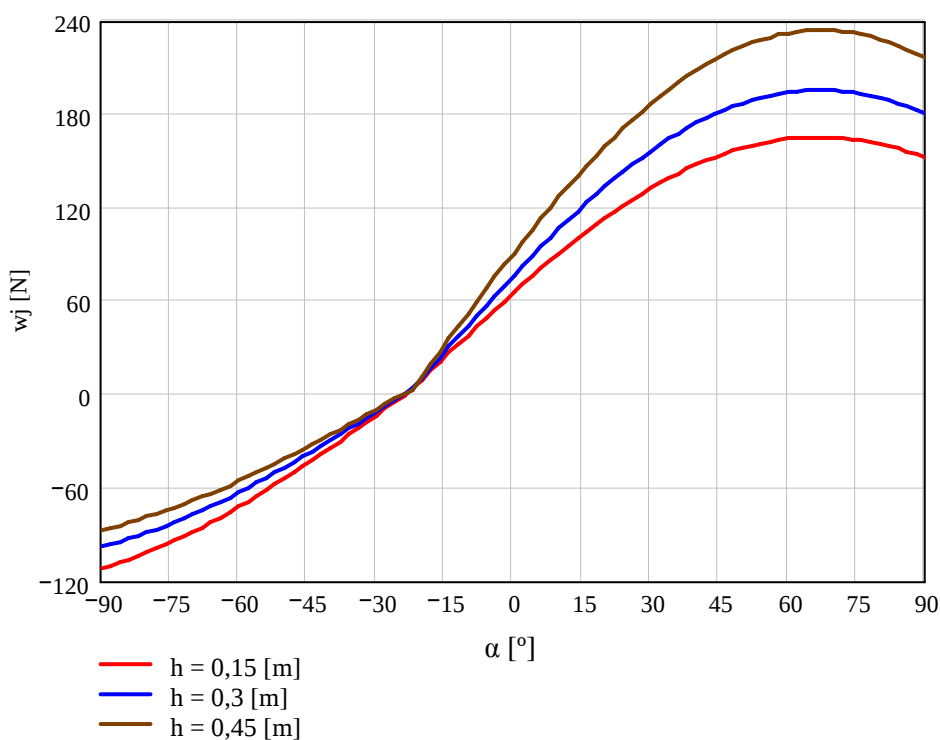
$$w_j = \frac{W_L + W_P}{L} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot e^{\frac{4 \cdot \mu \cdot k \cdot D \cdot h}{D^2 - d^2} \operatorname{sgn}(\alpha - \alpha_{grp})} + 2q\mu_l \cos \alpha \quad (5.4)$$

gdzie: α_{grp} opisuje zależność (4.24b).

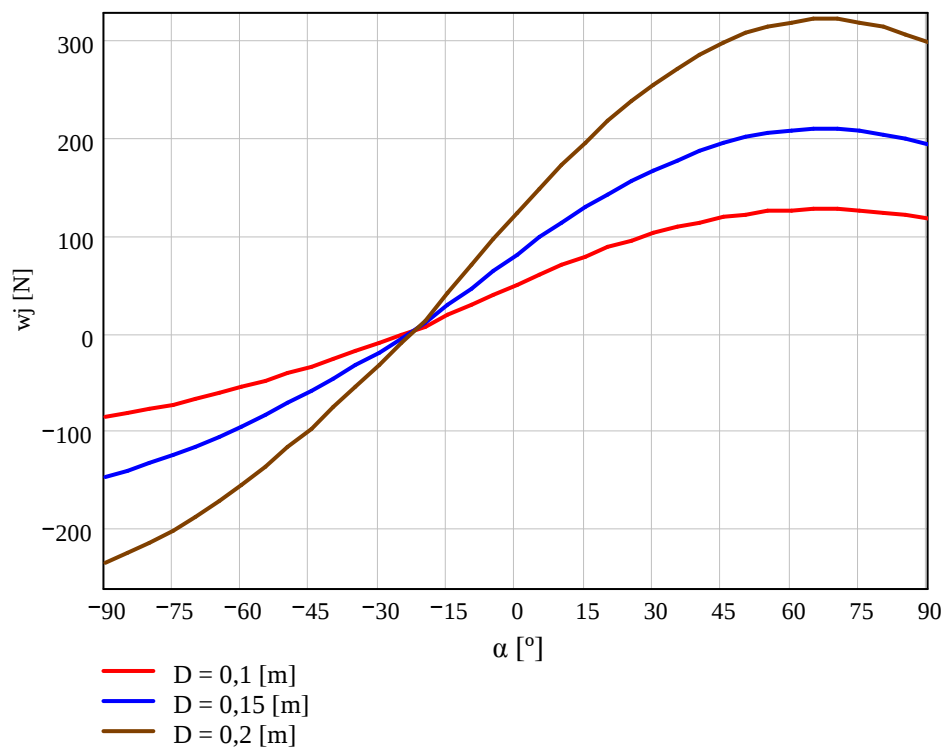
Wykorzystując zależności (5.4) i (4.24b) przeprowadzono przykładowe obliczenia oporów ruchu przenośnika na odcinku prostoliniowym przy następujących danych:

- średnica wewnętrzna rurowej rynny $D = 0,125$ [m],
- odstęp między zgrzeblami $h = 0,15$ [m],
- średnica cięgna $d = 0,014$ [m],
- współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę $\mu_l = 0,5$,
- ciężar jednostkowy cięgna ze zgrzeblami $q = 45$ [N/m],
- ciężar usypowy materiału transportowanego $\gamma_m = 7000$ [N/m³],
- współczynnik tarcia materiału o rynnę $\mu = 0,4$,
- współczynnik $k = 0,12$,
- kąt nachylenia rynny $\alpha = \pm 90$ [°].

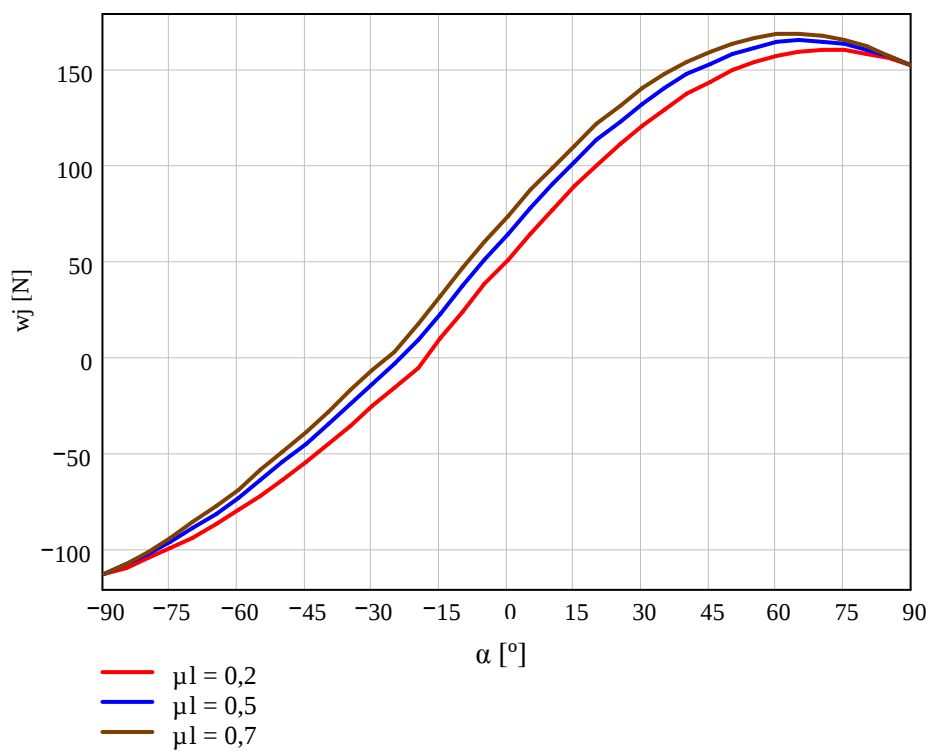
Wyniki przykładowych obliczeń przedstawiono na rysunkach 5.2 – 5.7. Wszystkie wykresy zostały sporządzone dla zakresu kąta nachylenia rynny $\alpha = \pm 90$ [°]. W tym zakresie analizowano wpływ poszczególnych parametrów na jednostkowe opory ruchu przenośnika.



Rys. 5.2. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy odstępach zgrzebeł $h = 0,15 - 0,3 - 0,45$ [m]



Rys. 5.3. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy średnicach rynny $D = 0,1 - 0,15 - 0,2$ [m]

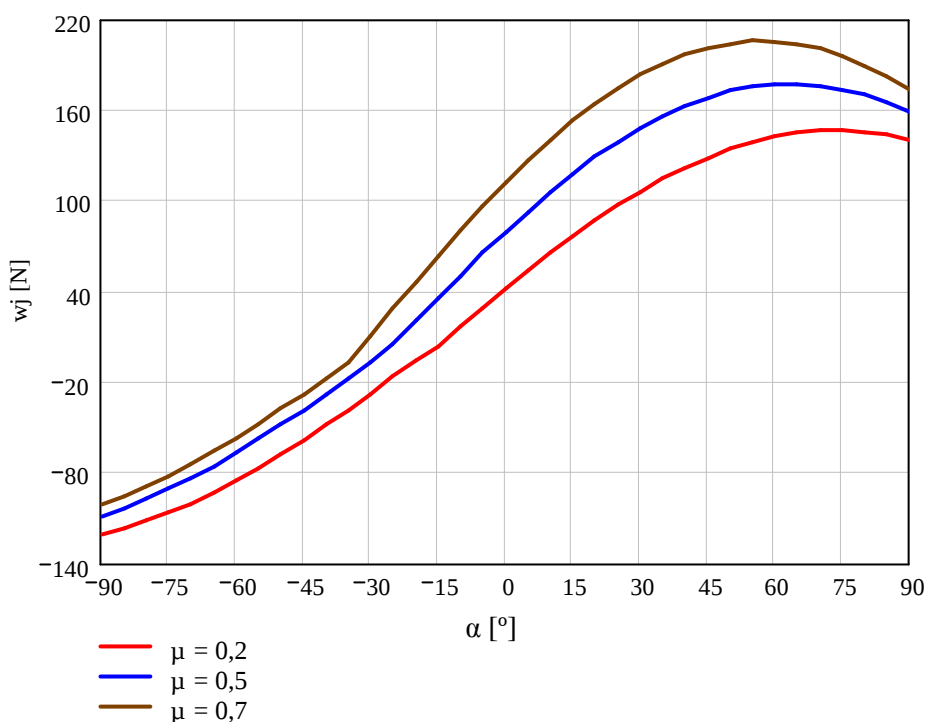


Rys. 5.4. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy współczynnikach tarcia $\mu_l = 0,2 - 0,5 - 0,7$

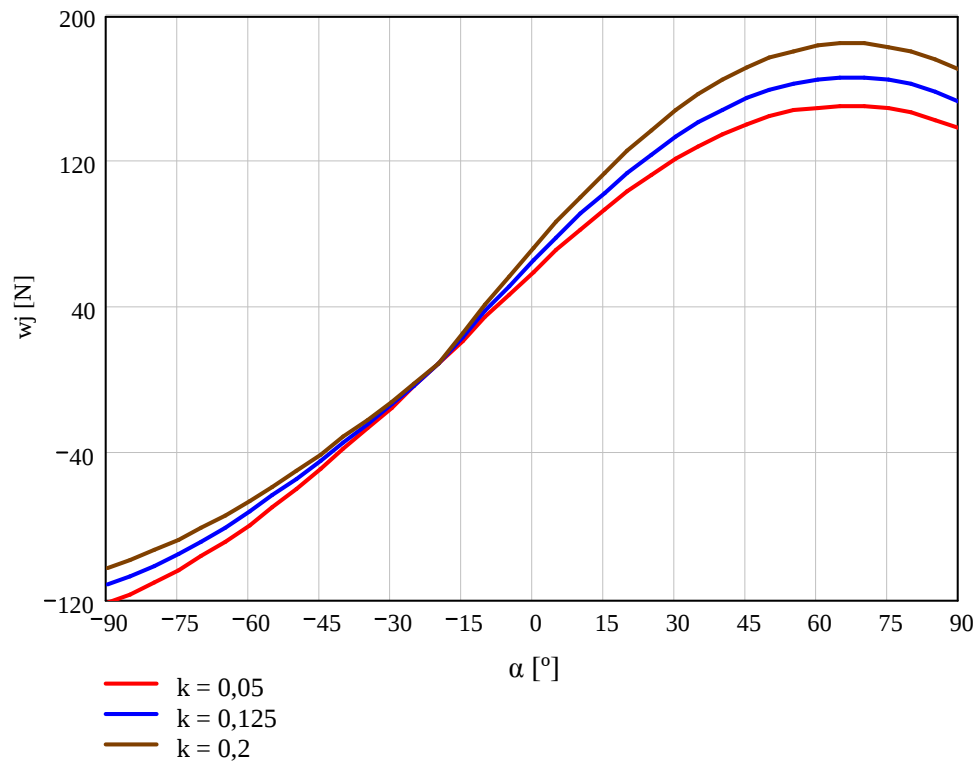
Na rysunkach 5.2 – 5.4 pokazano wpływ parametrów konstrukcyjno – geometrycznych przenośnika na jego opory ruchu. Jak wynika z rysunków 5.2 i 5.3 znaczący wpływ na opory ruchu przenośnika mają parametry h i D . Ze wzrostem h i D rosną opory ruchu przenośnika w zakresie wartości kąta $\alpha > \alpha_{gr}$. Natomiast wpływ ten ma inny charakter w zakresie ujemnych wartości kąta $\alpha < \alpha_{gr}$. Ze wzrostem odstępów h nieznacznie maleją opory przy ruchu przenośnika pionowo w dół. Spowodowane jest to większymi siłami tarcia materiału o rynnę. Z kolei wraz ze wzrostem średnicy rynny D silnie rosną opory ruchu przenośnika. Można zauważyć, że parametr D ma większy wpływ na opory ruchu niż parametr h .

Jak wynika z rysunku 5.4 współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l ma stosunkowo niewielki wpływ na opory ruchu przenośnika, a dla przenośnika pionowego - całkiem zanika. Spowodowane jest to tym, że przy pionowym kierunku ruchu ciężna roboczego brak jest siły nacisku zgrzebeł na rynnę, a przez to nie ma tarcia zgrzebeł o rynnę.

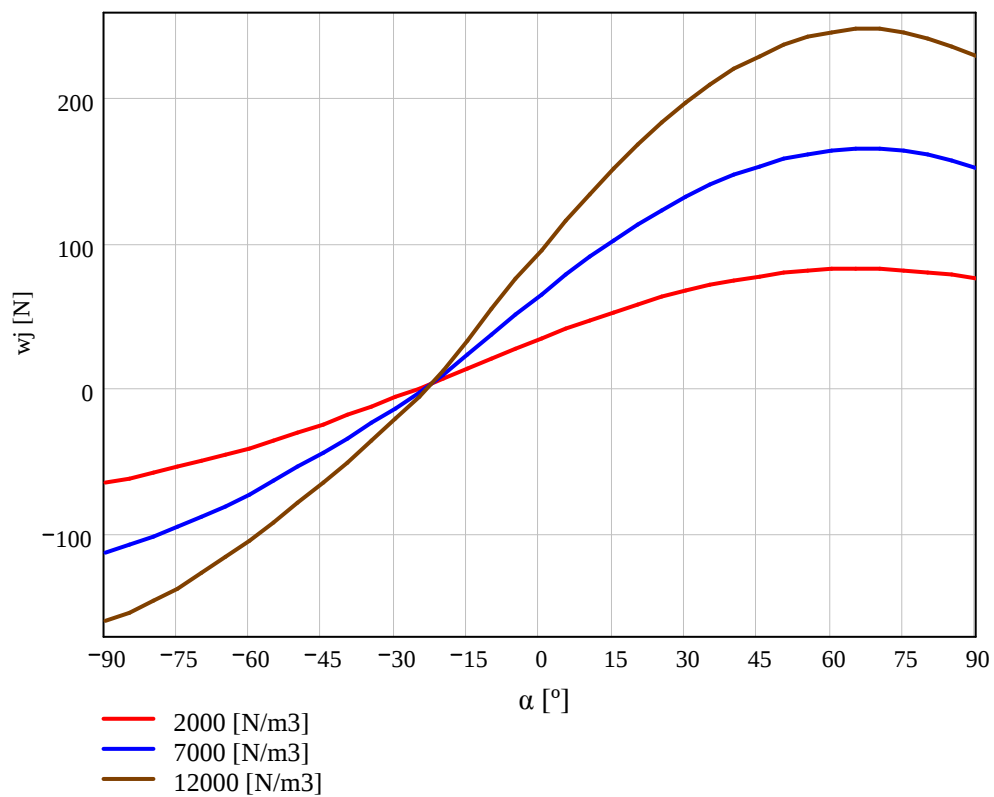
Kolejne rysunki 5.5 – 5.7 przedstawiają wpływ parametrów charakteryzujących materiał transportowany na opory ruchu przenośnika.



Rys. 5.5. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy współczynnikach tarcia $\mu = 0,2 - 0,5 - 0,7$



Rys. 5.6. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy współczynnikach $k = 0,05 - 0,125 - 0,2$



Rys. 5.7. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy dla ciężarach nasypowych $\gamma_m = 2000 - 7000 - 12000$ [N/m³]

Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 5.5 – 5.7 można zauważyć, że rodzaj transportowanego materiału ma również istotny wpływ na opory ruchu przenośnika. Największy wpływ na opory ruchu ma współczynnik tarcia materiału o rynnę μ (rys. 5.5) oraz ciężar nasypowy γ_m (rys. 5.7). W mniejszym stopniu uwidacznia się wpływ współczynnika k (rys. 5.6).

Należy zwrócić uwagę na fakt, że maksimum oporów ruchu przenośnika nie występuje dla przypadku transportu pionowego ($\alpha = 90^\circ$), lecz dla wartości kąta $\alpha < 90^\circ$; przy przyjętych danych $\alpha = 60 - 70^\circ$. Widać również, że opory ruchu przenośnika na kierunku pionowym „w górę” są w przybliżeniu dwa razy większe niż na kierunku poziomym.

Charakterystyczne jest także występowanie pewnej granicznej wartości kąta nachylenia rynny α_{grp} , przy której opory ruchu przenośnika są równe zeru. Na wartość tego kąta największy wpływ mają współczynniki tarcia μ i μ_l (rysunki 5.4 i 5.5).

5.2. Wpływ wybranych parametrów na opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego na łukach

Podobnie jak dla odcinków prostych przenośnika, dla odcinków łukowych analizowano wpływ parametrów konstrukcyjno – geometrycznych przenośnika oraz parametrów charakteryzujących materiał transportowany na opory ruchu.

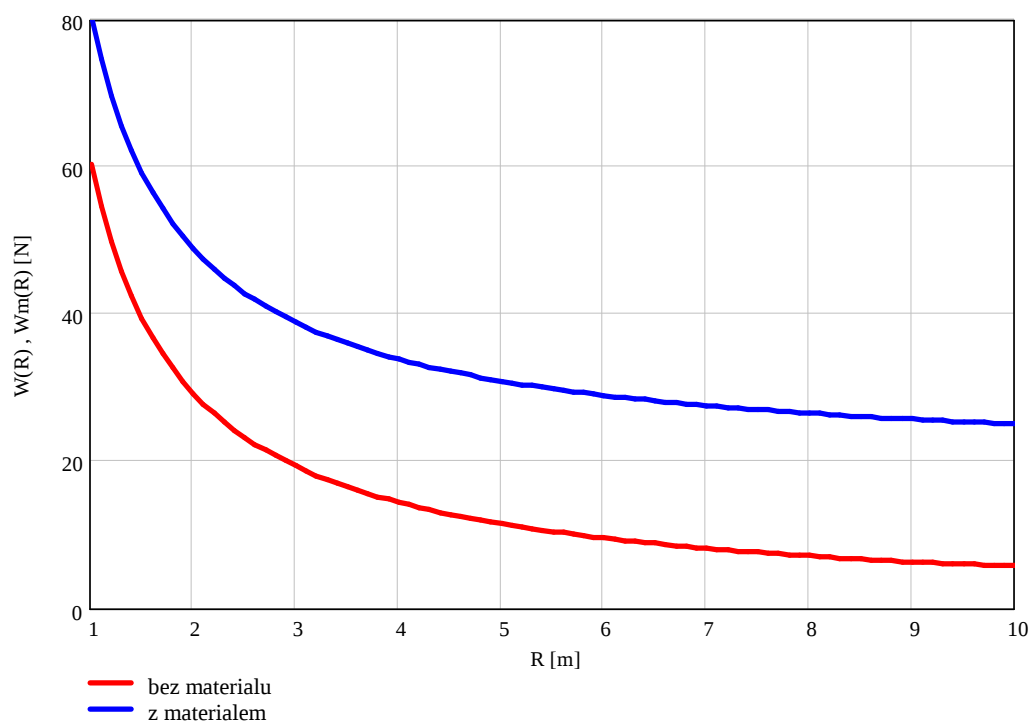
Dla łuków poziomych i pionowych przeprowadzono przykładowo analizę dla przypadku jak na rysunku 4.5, czyli gdy jedno zgrzebło jest na wejściu w łuk, a następne dwa zgrzebła są w łuku.

5.2.1. Łuki poziome

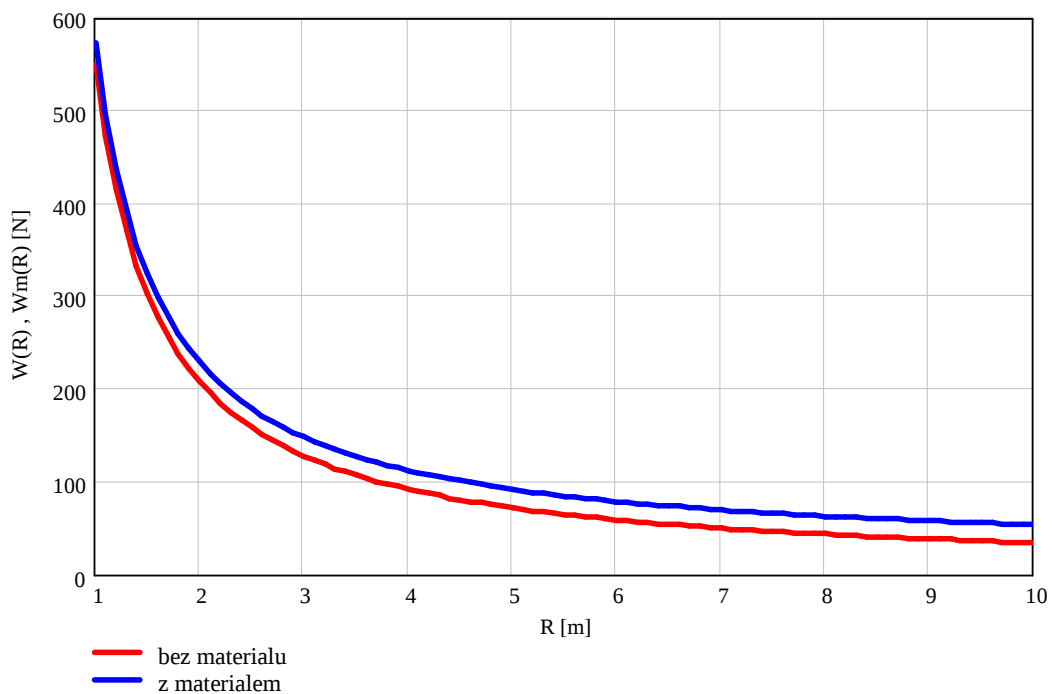
Opory ruchu przenośnika na poziomym łuku trasy wyrażają: zależność (4.40) dla przenośnika pracującego ze znacznym luzem oraz zależność (4.54) dla przenośnika pracującego z minimalnym luzem. Na podstawie tych zależności analizowano wpływ wybranych parametrów na opory ruchu na łuku poziomym przy danych:

- promień łuku rurowej rynny $R = 5$ [m],
- liczba zgrzebeł na łuku $n = 3$,
- średnica wewnętrzna rynny $D = 0,125$ [m],
- odstęp między zgrzeblami $h = 0,15$ [m],
- średnica cięgna $d = 0,014$ [m],
- grubość zgrzebła $g_z = 0,01$ [m],
- współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę $\mu_l = 0,3$,
- ciężar usypowy materiału transportowanego $\gamma_m = 7000$ [N/m³],
- współczynnik tarcia materiału o rynnę $\mu = 0,4$,
- współczynnik $k = 0,12$,
- siła naciągu wstępnego cięgna $S_0 = 500$ [N].

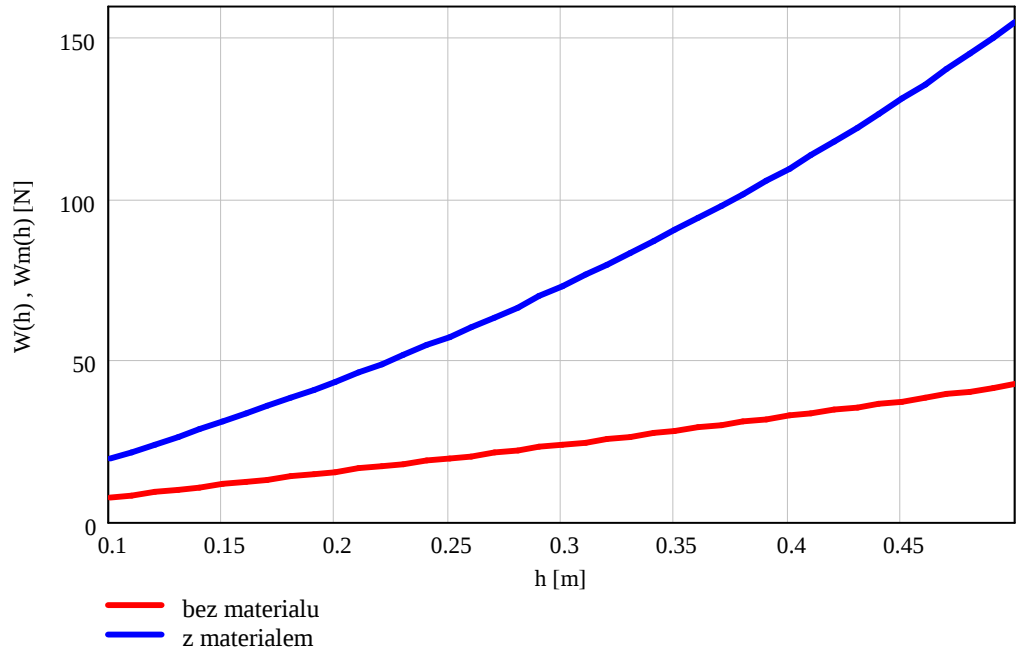
Na rysunkach 5.8 – 5.11 przedstawiono wykresy zależności oporów ruchu $W(R)$ i $W(h)$ wyróżniając opory ruchu cięgna ze zgrzeblami z materiałem transportowanym oraz opory ruchu samego cięgna ze zgrzeblami, dla przypadków pracy przenośnika ze znacznym i z minimalnym luzem pomiędzy zgrzeblami a rynną.



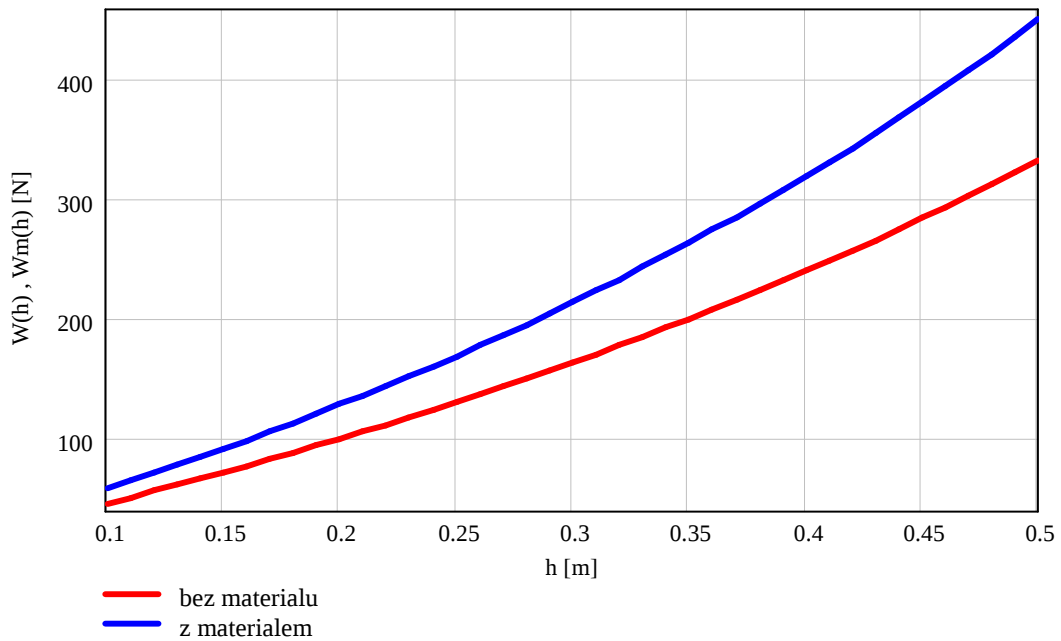
Rys. 5.8. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika ze znacznym luzem



Rys. 5.9. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika z minimalnym luzem



Rys. 5.10. Wykres zależności $W(h)$ na łuku poziomym dla przenośnika ze znacznym luzem

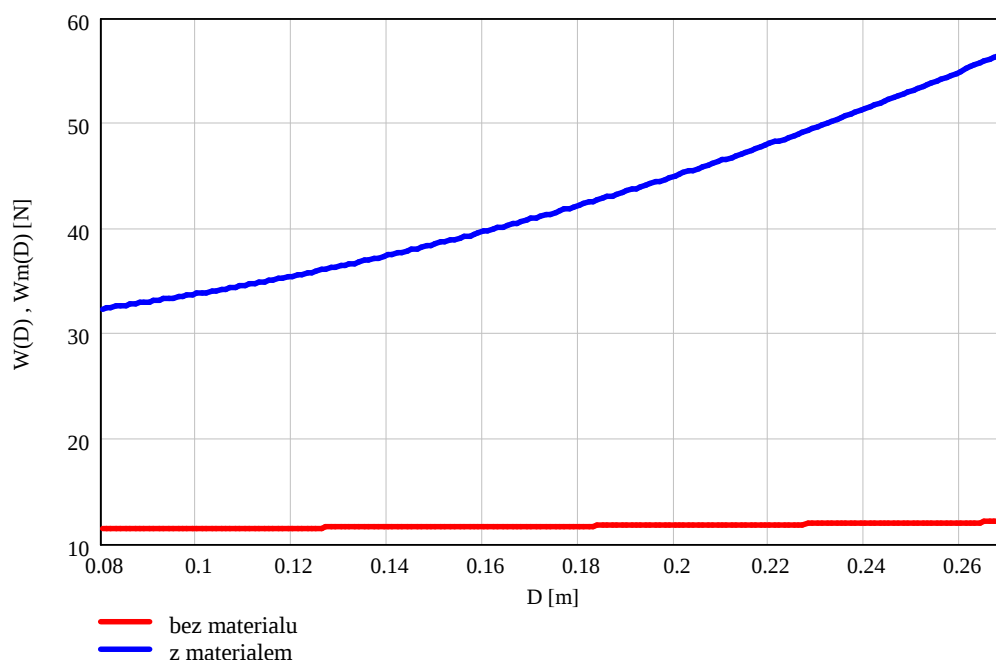


Rys. 5.11. Wykres zależności $W(h)$ na łuku poziomym dla przenośnika z minimalnym luzem

Powyższe wykresy wskazują na istotny wpływ parametrów R i h na opory ruchu oraz duże różnice wartości oporów ruchu samych zgrzebeł i zgrzebeł z materiałem transportowanym. Na rysunkach 5.8 i 5.9 widać, że istnieje pewien zakres wartości

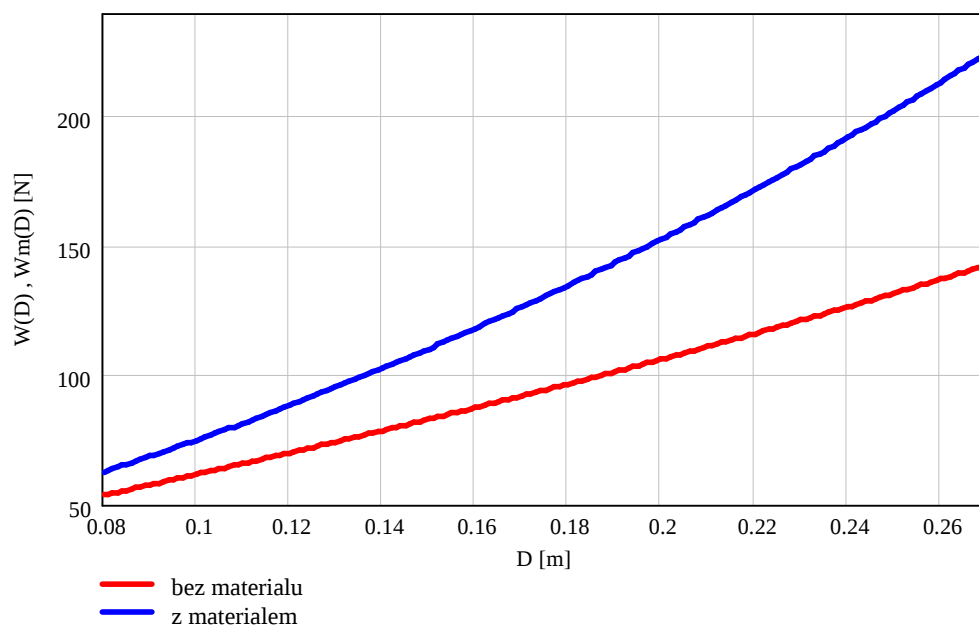
promienia łuku R ($R = 1 - 4$ [m]), w którym opory ruchu silnie się zmieniają. Opory ruchu materiału nie zależą od promienia R , natomiast silnie zależą od grubości warstwy materiału h między zgrzeblami (rys. 5.10). Dla przenośnika pracującego z minimalnym luzem opory ruchu samego cięgna silnie zależą od odstępów zgrzebeł h (rys. 5.11).

Na kolejnych rysunkach 5.12 i 5.13 przedstawiono wpływ średnicy wewnętrznej D rurowej rynny na opory ruchu.



Rys. 5.12. Wykres zależności $W(D)$ na łuku poziomym dla przenośnika ze znacznym luzem

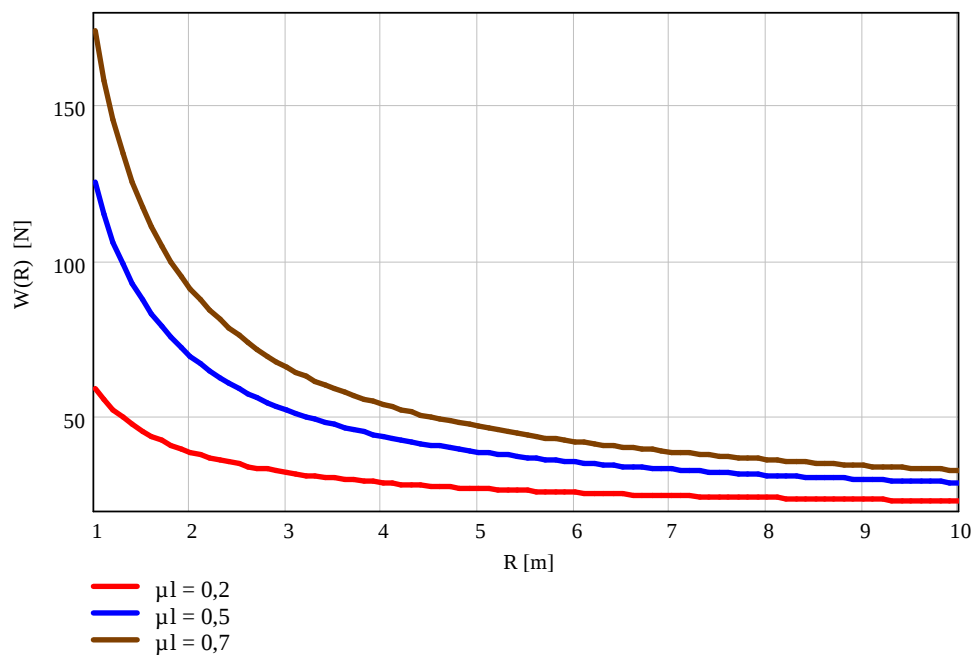
Można zauważyć, że wpływ ten jest istotny, zarówno dla przenośnika pracującego ze znacznym (rys. 5.12) jak i z minimalnym luzem (rys. 5.13). W przypadku przenośnika bez materiału pracującego ze znacznym luzem, nieznaczny wpływ na opory ruchu na łuku poziomym ma średnica wewnętrzna rynny D - w przypadku przenośnika z materiałem wpływ ten jest istotny (rys. 5.12). Natomiast dla przenośnika pracującego z minimalnym luzem wpływ ten jest istotny zarówno dla przenośnika próżnego jak i obciążonego (rys. 5.13).



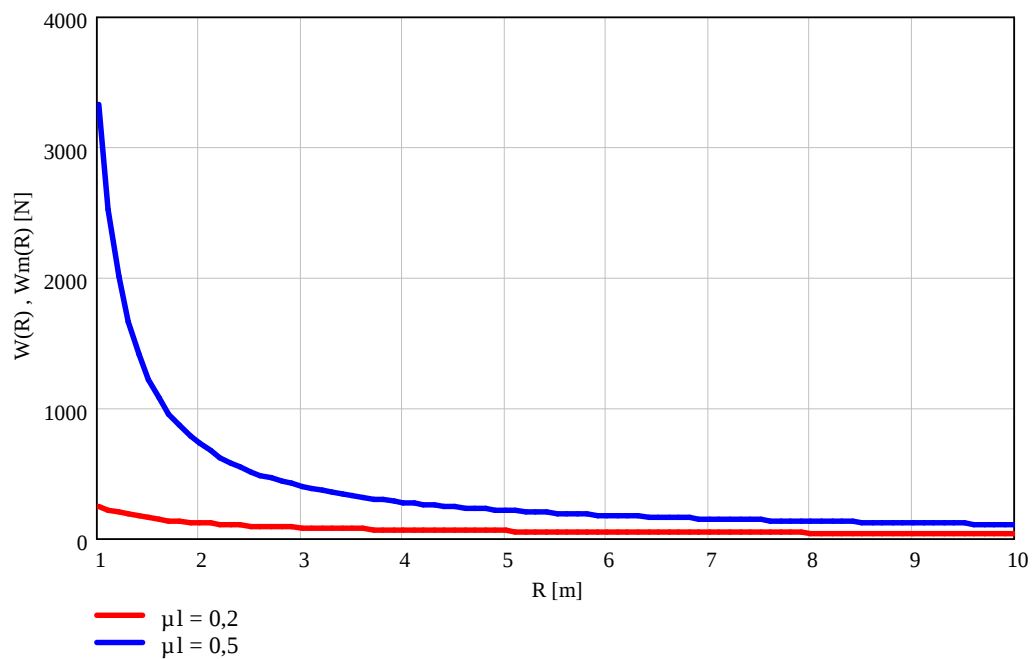
Rys. 5.13. Wykres zależności $W(D)$ na łuku poziomym dla przenośnika z minimalnym luzem

Jak wynika z wykresów przedstawionych na rysunkach 5.8 – 5.13 istotny wpływ na opory ruchu przenośnika na łuku poziomym mają parametry h i D oraz R .

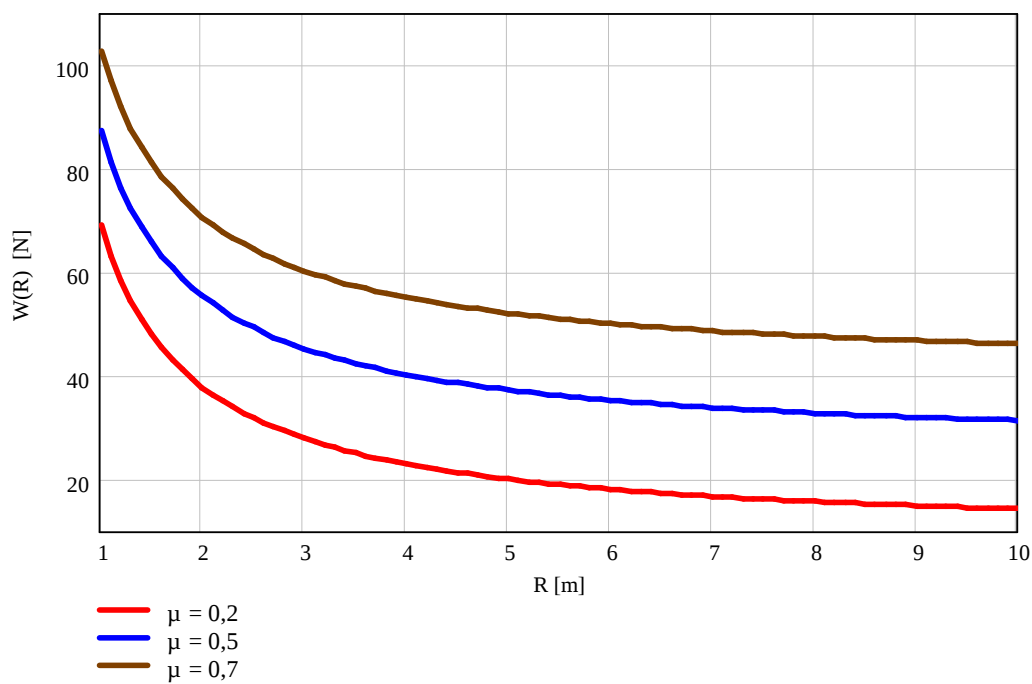
Na kolejnych wykresach (rys. 5.14 – 5.17) przedstawiono wpływ współczynników tarcia μ i μ_l na opory ruchu przenośnika.



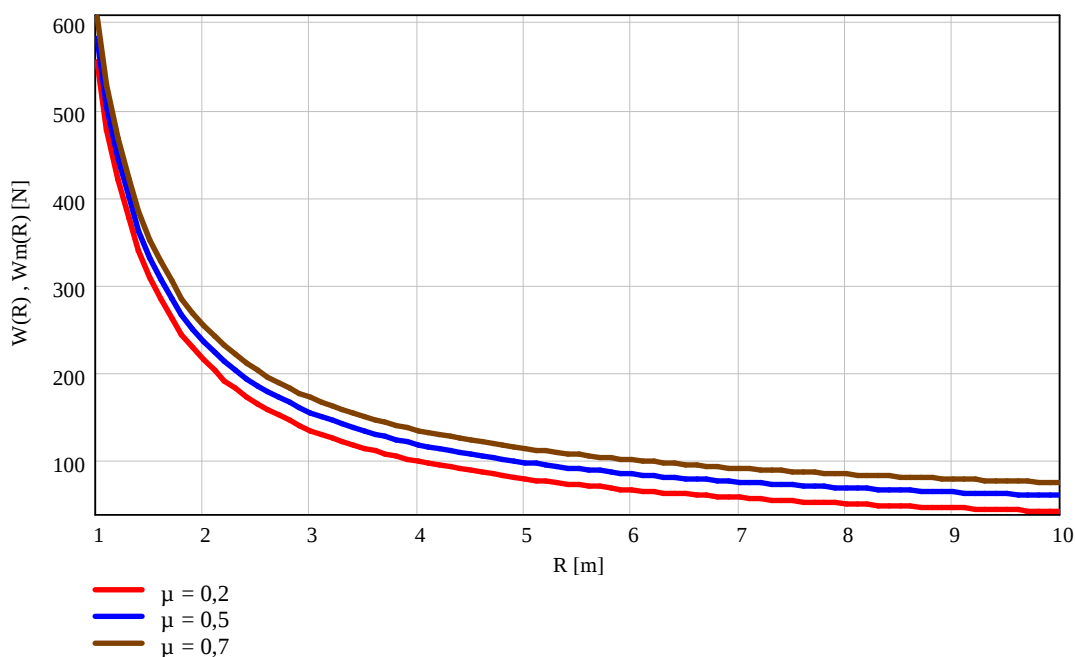
Rys. 5.14. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika ze znacznym luzem przy $\mu_l = 0,2 - 0,5 - 0,7$



Rys. 5.15. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika z minimalnym przy $\mu_l = 0,2 - 0,5$



Rys. 5.16. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika ze znacznym luzem przy $\mu = 0,2 - 0,5 - 0,7$



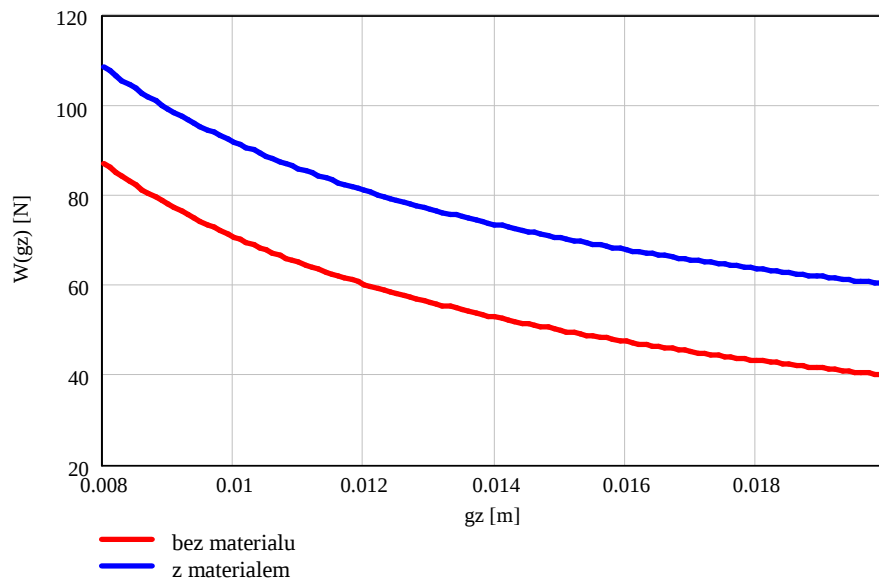
Rys. 5.17. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika z minimalnym luzem przy $\mu = 0,2 - 0,5 - 0,7$

Z wykresów przedstawionych na rysunkach 5.14 i 5.15 widać, że dla przenośnika pracującego ze znacznym i z minimalnym luzem, zaznacza się silny wpływ na opory ruchu współczynnika tarcia zgrzebeł rynną μ_l dla zakresu promienia łuku $R = 1 - 4$ [m]. Natomiast dla promienia $R > 4$ [m] wpływ ten stopniowo maleje. Jeżeli chodzi o wpływ współczynnika tarcia materiału o rynną μ , to jest on odmienny niż współczynnika μ_l . Ze wzrostem promienia łuku R nieznacznie wzrasta wpływ współczynnika μ zarówno dla przenośnika ze znacznym i z minimalnym luzem (rys. 5.16 i 5.17).

Z wykresów przedstawionych na rysunkach 5.8 – 5.13 zauważa się istotne różnice oporów ruchu $W(R)$, wynikające z wymuszonego, zapewniającego szczelność prowadzenia zgrzebeł w rynnie; są one około trzykrotnie wyższe niż w przypadku zgrzebeł ze znacznym luzem. Podobnie jest przy zmianach wartości parametrów h i D .

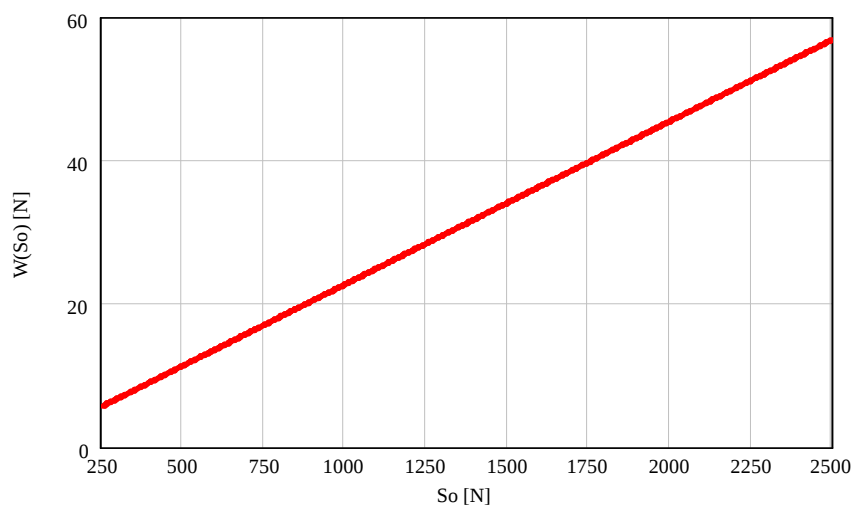
Z przeprowadzonej dotąd analizy wynika, że opory ruchu przenośnika z minimalnym luzem są znacznie większe niż dla przenośnika ze znacznym luzem. Stąd wynika, że należy w praktyce, w miarę możliwości unikać takich rozwiązań.

W dalszej kolejności analizowano wpływ grubości zgrzebła g_z (rys. 5.18) i siły naciągu wstępnego S_0 ciągną na opory ruchy przenośnika (rys. 5.19).



Rys. 5.18. Wykres zależności oporu $W(g_z)$

Opory ruchu zgrzebeł w przypadku wymuszonego ich prowadzenia, zależą w istotny sposób od ich grubości g_z co, przy przyjętych do obliczeń danych, przedstawiono na rys. 5.18; fakt ten należy mieć na uwadze przy projektowaniu przenośników zgrzeblowych rurowych zapewniających dużą szczelność.



Rys. 5.19. Wykres zależności oporu $W(S_0)$ przy pominiętych oporach przemieszczania materiału

Z rysunku 5.19 wynika, że siła S_0 naciągu wstępnego cięgna roboczego wpływa liniowo na opory ruchu samych zgrzebeł, dlatego należy przyjmować możliwie niską jego wartość, zapewniającą jednak poprawną pracę przenośnika.

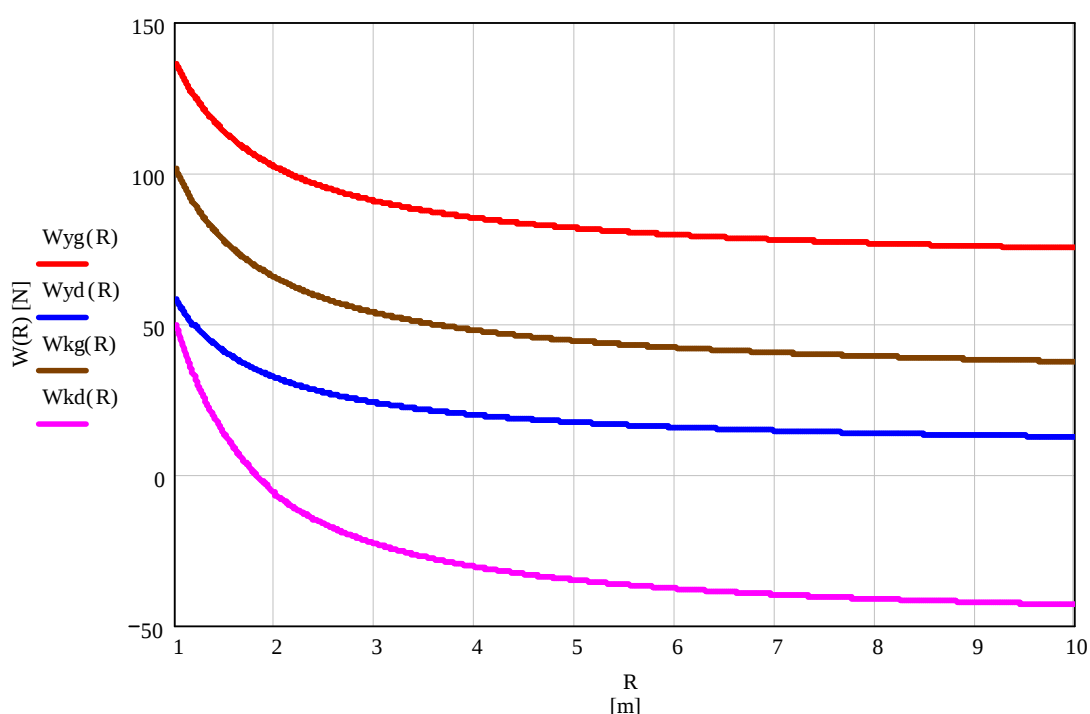
5.2.2. Łuki pionowe

Ze względu na dużą liczbę możliwych przypadków konfiguracji łuków pionowych, oraz podobny jakościowo, jak dla łuków poziomych, wpływ niektórych parametrów, przedstawiono tylko wybrane wyniki analizy na wykresach zbiorczych. Wpływ wybranych parametrów na opory ruchu na łuku pionowych analizowano przy identycznych danych jak dla łuku poziomego. Ciężar jednostkowy ciągną ze zgrzeblami wynosił $q = 45 \text{ [N/m]}$.

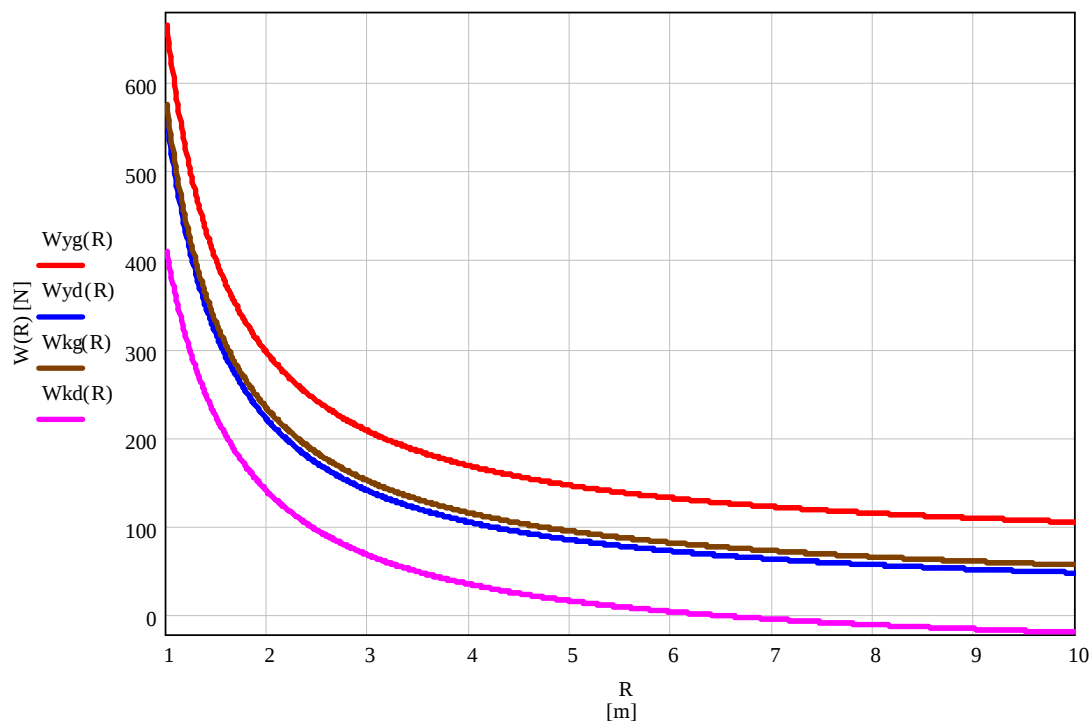
Dla łuków pionowych poszczególne konfiguracje oznaczono:

- łuk pionowy wypukły przy ruchu ciągną „w górę” – W_{yg} ,
- łuk pionowy wklęsły przy ruchu ciągną „w dół” – W_{kd} ,
- łuk pionowy wklęsły przy ruchu ciągną „w górę” – W_{kg} ,
- łuk pionowy wypukły przy ruchu ciągną „w dół” – W_{yd} .

Wykresy przedstawione na rysunkach 5.20 i 5.21 ilustrują wpływ promienia łuku R na opory ruchu przenośnika w przypadku pracy ze znacznym i z minimalnym luzem. Widać, że wpływ ten jest podobny jak dla łuku poziomego. Dla pewnego zakresu wartości parametru R (1 – 4) opory ruchu silnie zmieniają się. Na uwagę zasługuje fakt, że w przypadku transportu materiału na łuku pionowym wklęsłym „w dół” W_{kd} , istnieje pewna wartość promienia R , przy której opory są równe zero (np. na rys. 5.20).

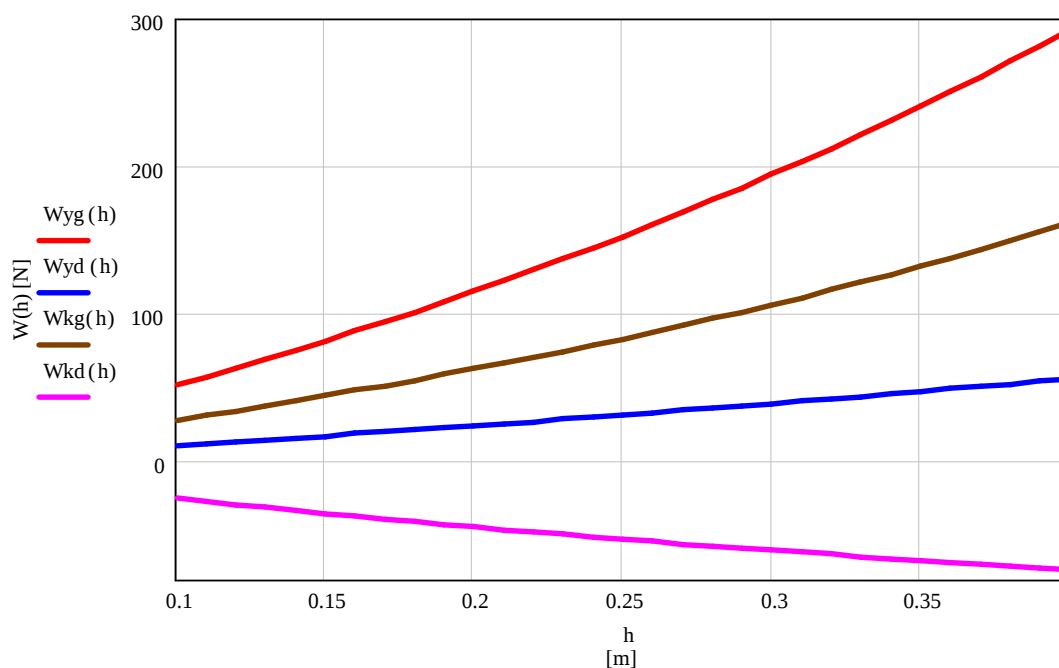


Rys. 5.20. Wykres zależności $W(R)$ dla przenośnika ze znacznym luzem

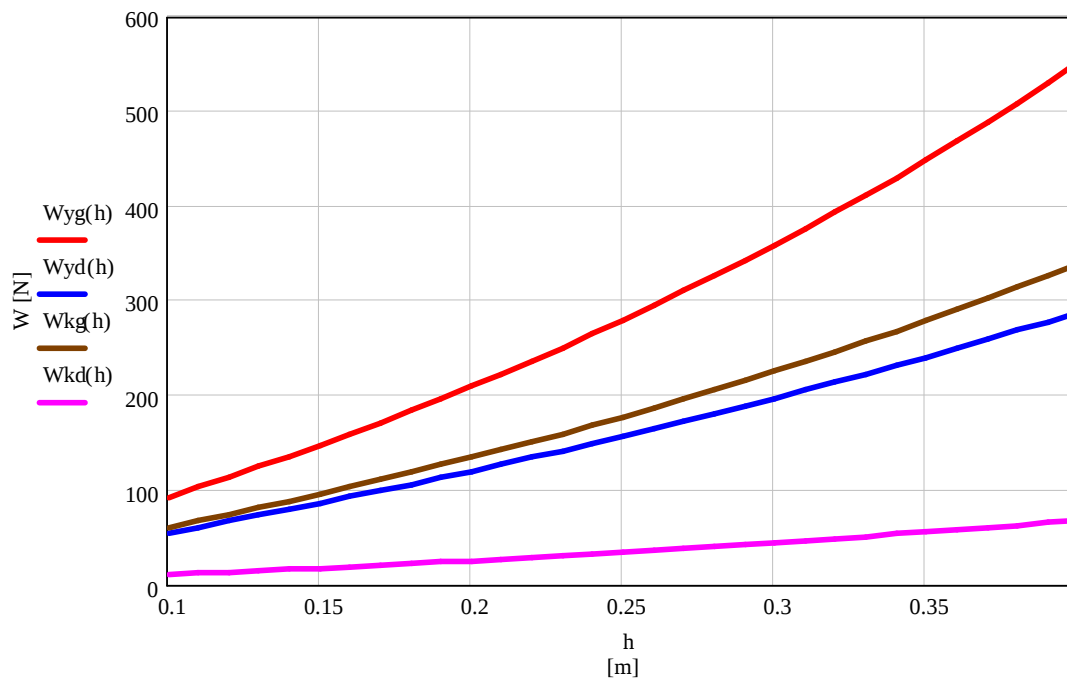


Rys. 5.21. Wykres zależności $W(R)$ dla przenośnika z minimalnym luzem

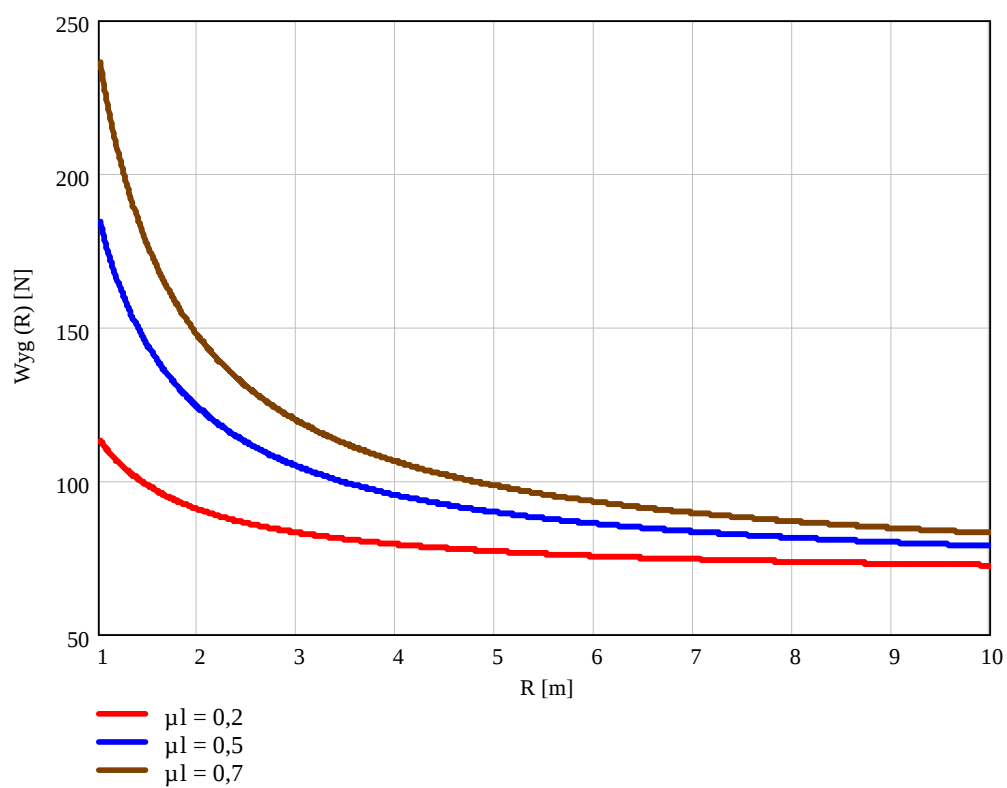
Na kolejnych wykresach (rysunkach 5.22 i 5.23) analizowano wpływ odstępu zgrzebeł h . Wpływ tego parametru jest podobny jak przy łuku poziomym; wraz ze wzrostem h opory ruchu rosną. Uwagę zwracają ujemne opory ruchu dla przypadku transportu materiału na łuku pionowym wklęsłym „w dół” W_{kd} (rys. 5.22).



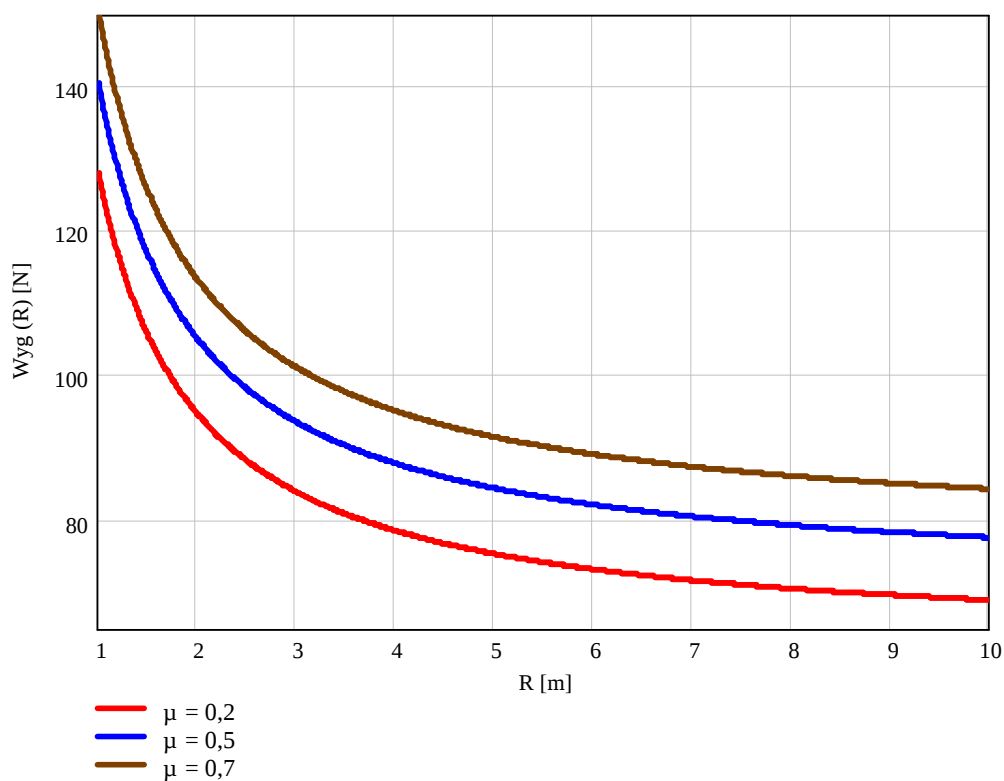
Rys. 5.22. Wykres zależności $W(h)$ dla przenośnika ze znacznym luzem



Rys. 5.23. Wykres zależności $W(h)$ dla przenośnika z minimalnym luzem



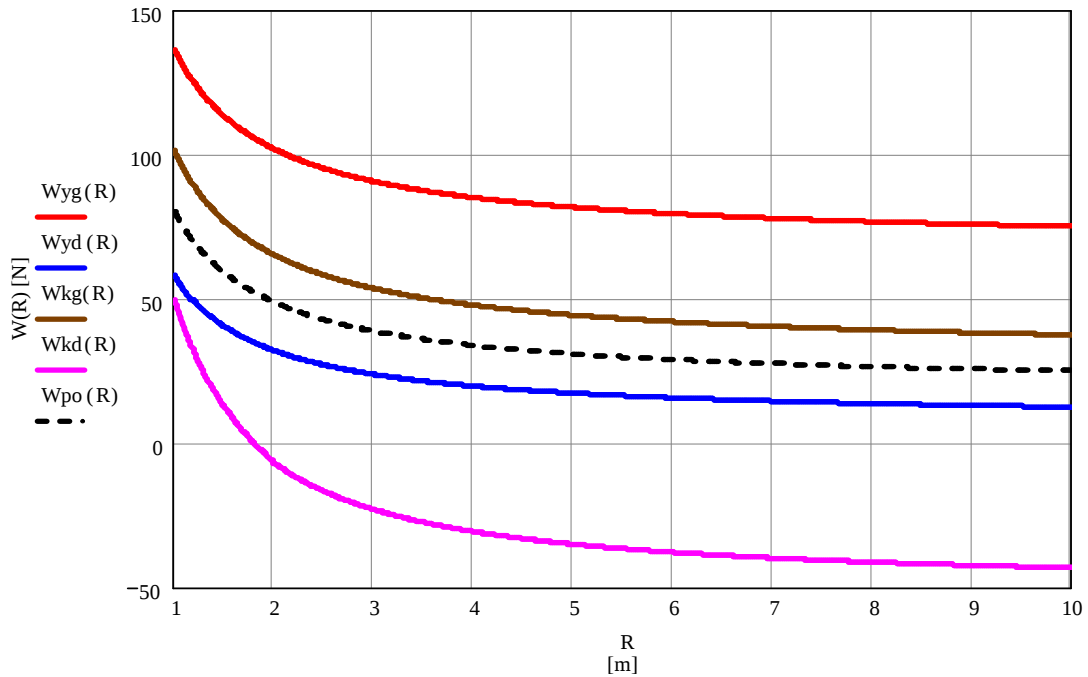
Rys. 5.24. Wykres zależności $W(R)$ dla przenośnika ze znacznym luzem dla łuku wypukłego przy ruchu „w górę” przy różnych współczynnikach tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l



Rys. 5.25. Wykres zależności $W(R)$ dla przenośnika ze znacznym luzem dla łuku wypukłego przy ruchu „w górę” przy różnych współczynnikach tarcia materiału o rynnę μ

Wykresy przedstawione na rysunkach 5.24 i 5.25 ilustrują wpływ współczynników tarcia μ i μ_l . Przykładowo pokazano to dla łuku pionowego wypukłego przy ruchu ciągłym „w górę”. Wpływ ten jest bardzo podobny jak przy łuku poziomym: wpływ współczynnika μ_l rośnie wraz ze zmniejszaniem promienia łuku R , natomiast ze zwiększaniem promienia łuku rośnie wpływ współczynnika tarcia materiału o rynnę na opory ruchu na łuku pionowym.

Na rysunku 5.26 przedstawiono porównawczy wykres zależności $W(R)$ dla łuków poziomych i pionowych. Widać, że opory ruchu przenośnika na łukach pionowych są mniejsze niż na łuku poziomym, gdy materiał jest transportowany „w dół”. Największe opory ruchu na łukach są dla łuków pionowych w przypadku transportu materiału „w górę”.



Rys. 5.26. Wykres porównawczy zależności $W(R)$ dla przenośnika ze znacznym luzem dla łuków pionowych i poziomego (linia przerywana)

Z przeprowadzonej w tym rozdziale analizy teoretycznej wpływu poszczególnych parametrów na opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego wynikają następujące wnioski:

- opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego w sposób istotny zależą od jego parametrów konstrukcyjnych (D , h , μ_i , α) jak i własności transportowanego materiału (γ_m , k , μ),
- odstęp między zgrzeblami h w przenośniku zgrzeblowym rurowym wpływa silniej (bo wykładniczo) na jego opory ruchu, niż w przenośniku konwencjonalnym (wpływ liniowy); podobnie wpływają współczynniki: μ i k – z ich wzrostem rosną opory ruchu,
- opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego na łukach zależą w sposób istotny nie tylko od rodzaju transportowanego materiału, ale także od jego parametrów konstrukcyjnych h , g_z , μ_i , S_0 oraz od promienia łuku R (rys. 5.26), zwłaszcza w zakresie jego małych wartości ($R = 1 - 4$ m),
- w przypadku przenośnika zapewniającego szczelność (pracującego z minimalnym luzem) opory ruchu na łukach są co najmniej trzykrotnie większe niż dla przenośnika pracującego ze znacznym luzem, dlatego też należy unikać rozwiązań z minimalnym luzem.

6. Zagadnienie podobieństwa w badaniach oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego

Teoretyczne ujęcie oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego należy weryfikować w badaniach doświadczalnych prowadzonych na obiektach rzeczywistych lub ich modelach. W przypadku badań modelowych (na stanowiskach badawczych) istotna jest znajomość kryteriów podobieństwa mechanicznego, by wyniki takich badań można było odnieść do obiektów rzeczywistych, a także by budowany model fizyczny mógł dostatecznie wiarygodnie odwzorować zjawiska występujące w obiekcie rzeczywistym. Przydatne w tym zakresie mogą być metody teorii podobieństwa mechanicznego [4, 25, 26].

W tym celu, wykorzystując metodę analizy wymiarowej [26], wyznaczono liczby kryterialne ujmujące parametry konstrukcyjno-ruchowe przenośnika oraz właściwości transportowanego materiału. Dają one podstawy do budowy modelu fizycznego przenośnika zgrzeblowego rurowego oraz pozwalają na redukcję liczby zmiennych niezależnych uwzględnianych w badaniach doświadczalnych. W badaniach oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego można wyróżnić, jako zmienne niezależne, następujące czynniki:

- charakteryzujące tribologiczne i fizykochemiczne właściwości trących się ciał tj. transportowanego materiału sypkiego i rynny; np. współczynnik tarcia cięga i zgrzebeł o rynnę μ_l , współczynnik tarcia urobku o rynnę μ , kąt tarcia wewnętrznego φ , gęstość usypowu materiału ρ ;
- charakteryzujące warunki techniczne transportowania materiału; jak średnica wewnętrzna rury D , odstęp między zgrzeblami h , kąt α nachylenia rurowej rynny względem poziomu, prędkość transportowania v .

Uwzględniając powyższe, jednostkowy opór ruchu w [N/m] materiału transportowanego wraz z ciągnem i zgrzeblami można przedstawić w postaci następującej funkcji:

$$w = F(\mu, \mu_l, \alpha, h, D, \varphi, \rho, v, q) \quad (6.1)$$

gdzie jako zmienne niezależne przyjęto:

- μ [-] – współczynnik tarcia materiału o rynnę,
- μ_l [-] – współczynnik tarcia zgrzebeł i cięga o rynnę,
- α [rad] – kąt nachylenia rynny względem poziomu,

- h [m] – odstęp między zgrzeblami,
- D [m] – średnica wewnętrzna rurowej rynny,
- φ [rad] – kąt tarcia wewnętrznego,
- ρ [kg/m³] – gęstość usypowa materiału transportowanego,
- v [m/s] – prędkość ciągnąca ze zgrzeblami,
- q [N/m] – ciężar jednostkowy ciągnąca ze zgrzeblami.

Z uwagi na wymogi analizy, wymiary tych zmiennych są wyrażone w jednostkach podstawowych układu SI.

Liczby kryterialne podobieństwa mechanicznego można wyznaczyć różnymi metodami. W pracy wykorzystano metodę analizy wymiarowej. Macierz wymiarową wielkości występujących w zależności (6.1) zawarto w tabeli 6.1.

Tab. 6.1 Zmienne uwzględnione w analizie

	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
	w	μ_l	μ	α	h	D	φ	ρ	v	q
L	0	0	0	0	1	1	0	-3	1	0
M	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
T	-2	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2
Ω	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0

gdzie w przyjętym układzie jednostek podstawowych SI:

- L [m] – długość,
- M [kg] – masa,
- T [s] – czas,
- Ω [rad] – kąt w mierze łukowej,

natomiast $p_1 \div p_9$ – to nowe zmienne przypisane zmiennym niezależnym.

Wszystkie założenia stosowalności metody macierzowej są spełnione, a są to:

- $m_j = 4$

$$n+1 = 10 \quad m_j < n-1$$

gdzie : m_j – liczba jednostek podstawowych, n – liczba badanych czynników,

- $r = 4 = m_j$, a macierz zawarta w tabeli 6.1 nie jest osobliwa, zatem niezerowy wyznacznik

$$W = \begin{vmatrix} 0 & -3 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 1 \neq 0$$

stopnia $r = 4$ można wyjąć z ostatnich czterech kolumn macierzy zawartej w tabeli 6.1.

Zgodnie z twierdzeniem Buckinghama [4] równanie (6.1) jest równoważne równaniu bezwymiarowemu:

$$\pi_0 = \Phi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_q) \quad (6.2)$$

gdzie: π_q ($q = 0..5$) tworzą *zupełny układ liczb kryterialnych* zmiennych $w, \mu_l, \dots, q$.

Zgodnie z metodą, podaną w pracy [25], otrzymuje się następujący układ równań wymiarowych:

$$\begin{aligned} p_4 + p_5 - 3p_7 + p_8 &= 0 \\ p_0 + p_7 + p_9 &= 0 \\ -2p_0 - p_8 - 2p_9 &= 0 \\ p_3 + p_6 &= 0 \end{aligned} \quad (6.3)$$

który rozwiązano względem *związanych* niewiadomych p_6, p_7, p_8, p_9 otrzymując:

$$\begin{aligned} p_6 &= -p_3 \\ p_7 &= p_4 + p_5 \\ p_8 &= 2p_4 + 2p_5 \\ p_9 &= -p_0 - p_4 - p_5 \end{aligned} \quad (6.1)$$

Przyjmując następnie dla *swobodnych* niewiadomych p_q ($0, 1, \dots, 5$) następujące specjalne ciągi wartości liczbowych:

$$\begin{aligned} p_{q,0} &= 10000 \\ p_{q,1} &= 01000 \\ &\dots\dots\dots \\ p_{q,5} &= 00001 \end{aligned}$$

otrzymuje się odpowiadające *swobodnym* niewiadomym ciągi wartości związanych niewiadomych p_6, p_7, p_8, p_9 :

$$\begin{aligned} p_{6,0} &= 0 & p_{7,0} &= 0 & p_{8,0} &= 0 & p_{9,0} &= -1 \\ p_{6,1} &= 0 & p_{7,1} &= 0 & p_{8,1} &= 0 & p_{9,1} &= 0 \\ p_{6,2} &= 0 & p_{7,2} &= 0 & p_{8,2} &= 0 & p_{9,2} &= 0 \\ p_{6,3} &= -1 & p_{7,3} &= 0 & p_{8,3} &= 0 & p_{9,3} &= 0 \\ p_{6,4} &= 0 & p_{7,4} &= 1 & p_{8,4} &= 2 & p_{9,4} &= -1 \\ p_{6,5} &= 0 & p_{7,5} &= 1 & p_{8,5} &= 2 & p_{9,5} &= -1 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Uwzględniając powyższe, wyznaczono macierz rozwiązań, którą podano w tabeli 6.2.

Tab. 6.2. Wyniki rozwiązań

	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
π_q	w	μ_l	μ	α	h	D	φ	ρ	v	q
π_0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
π_1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
π_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
π_3	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0
π_4	0	0	0	0	1	0	0	1	2	-1
π_5	0	0	0	0	0	1	0	1	2	-1

Z macierzy tej otrzymuje się następujący *zupełny układ* liczb kryterialnych:

$$\pi_0 = \frac{w}{q}; \pi_1 = \mu_l; \pi_2 = \mu; \pi_3 = \frac{\alpha}{\varphi}; \pi_4 = \frac{h\rho v^2}{q}; \pi_5 = \frac{D\rho v^2}{q} \quad (6.6)$$

Na podstawie twierdzenia Buckingham'a zależność (6.1) można przedstawić w następującej postaci:

$$\frac{w}{q} = F \left[\mu_l, \mu, \frac{\alpha}{\varphi}, hD \left(\frac{\rho v^2}{q} \right)^2 \right] \quad (6.7)$$

przy czym postać funkcji F może być wyznaczona tylko w oparciu o badania doświadczalne.

Bezwymiarową postać zależności (6.7) – dogodną w symulacji komputerowej i interpretacji wyników – można przedstawić w następującej postaci wymiarowej:

$$w = qF \left[\mu_l, \mu, \frac{\alpha}{\varphi}, hD \left(\frac{\rho v^2}{q} \right)^2 \right] \quad (6.8)$$

W badaniach jednostkowego oporu ruchu przENOŚNIKA zgrzeblOWego rurowego zachowanie jednakowych liczb kryterialnych – będących argumentami funkcji F w zależności (6.7) – w modelu i w układzie rzeczywistym czyni zadość wymogom teorii podobieństwa mechanicznego.

Przy stosowaniu takich samych materiałowo i tribologicznie ciał w parze ciiernej (układu rzeczywistego i jego modelu fizycznego), liczby podobieństwa mechanicznego sprowadzają się do – ostatniego argumentu w zależności (6.7). Podobieństwo mechaniczne układu rzeczywistego i jego modelu fizycznego – które oznaczono ‘ (prim) – wyraża wówczas następująca zależność:

$$h'D' \left(\frac{v'^2}{q'} \right)^2 = hD \left(\frac{v^2}{q} \right)^2 \quad (6.9)$$

Wprowadzając skalę:

- długości: $k_l = \frac{h'}{h} = \frac{D'}{d}$,
- prędkości: $k_v = \frac{v'}{v}$,
- ciężaru jednostkowego ciągu: $k_q = \frac{q'}{q}$,

zależność (6.9) przyjmie postać:

$$\left(\frac{k_l \cdot k_v^2}{k_q} \right)^2 = 1 \quad (6.10)$$

Zależność (6.10) daje podstawy do budowy modelu fizycznego przenośnika zgrzeblowego rurowego z zachowaniem podobieństwa mechanicznego. Uzyskane metodą analizy wymiarowej liczby kryterialne, oparte na uproszczonym odwzorowaniu zjawisk rzeczywistych, nie dają pełnych możliwości modelowania wpływu wszystkich czynników, przez co należy je traktować jako przybliżone, a o dokładności odwzorowania warunków rzeczywistych decydują między innymi kryteria przyjęte za najważniejsze.

7. Badania doświadczalne oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego

Uzyskane na drodze analizy teoretycznej (rozdz. 4) zależności na opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego zostały zweryfikowane doświadczalnie na specjalnie do tego celu zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku badawczym (rozdz. 7.3) oraz przemysłowym przenośniku firmy *Ferind* (rozdz. 8). Przeprowadzono również badania pomocnicze na odpowiednim aparacie. Zakres badań doświadczalnych obejmował:

- badania pomocnicze w celu wyznaczenia parametrów charakteryzujących właściwości przyjętych do badań transportowanych materiałów,
- badania zasadnicze w celu wyznaczenia wartości oporu ruchu w .

Do badań doświadczalnych przyjęto reprezentatywne materiały sypkie, o różnej ziarnistości i ciężarze nasypowym, transportowane przemysłowymi przenośnikami zgrzeblowymi rurowymi. Były nimi:

- politroksan,
- tlenek żelaza,
- pył węgla brunatnego,
- rozdrobniony węgiel kamienny zanieczyszczony krzemionką,
- rozdrobniony węgiel kamienny wilgotny (wilgotność 26,1%),
- rozdrobniony węgiel kamienny suchy.

7.1. Badania pomocnicze

W ramach badań pomocniczych przeprowadzono badania laboratoryjne właściwości wybranych materiałów sypkich. Zakres tych badań obejmował:

- wyznaczenie ciężaru nasypowego γ_m [N/m³],
- wyznaczenie wartości współczynników tarcia μ o stal,
- wyznaczenie wartości kąta tarcia wewnętrznego φ [°].

Ciężar nasypowy γ_m został wyznaczony przez ważenie masy m o znanej objętości ($V = 0,001 \text{ m}^3$). Wartość γ_m wyznaczono ze wzoru:

$$\gamma_m = 1000 \cdot m \cdot g \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right] \quad (7.1)$$

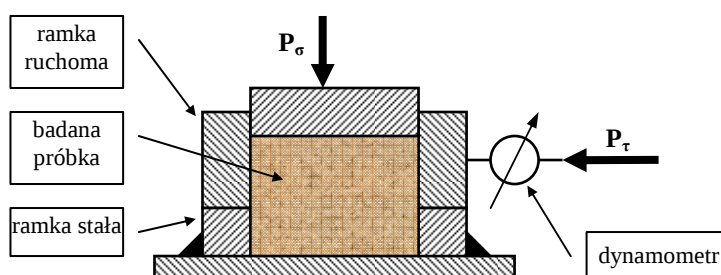
gdzie: $g \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$ – przyspieszenie ziemskie.

Wartości współczynników tarcia o stal μ oraz kąta tarcia wewnętrznego φ wyznaczono na stanowisku wyposażonym w aparat typu AB do bezpośredniego ścinania próbki materiału (rys. 7.1).

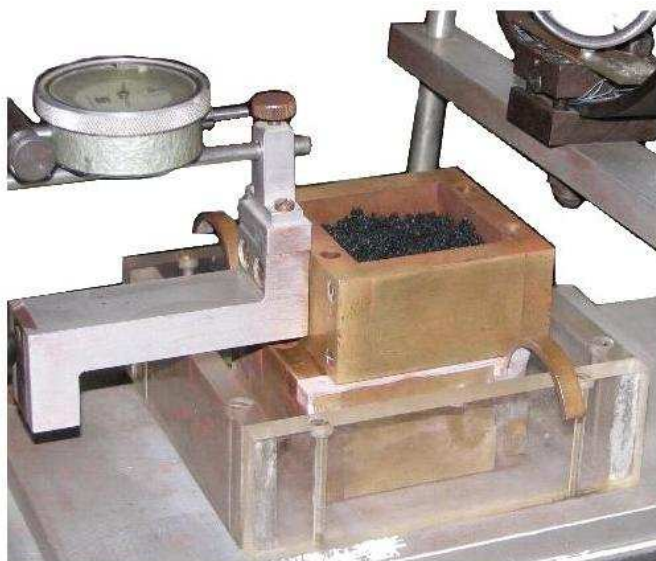


Rys. 7.1. Aparat typu AB do bezpośredniego ścinania próbki materiału

Aparat ten jest wyposażony w dwudzielne naczynie pomiarowe, zwane celką Jenikego [9] (rys. 7.2 i 7.3). Badaną próbkę materiału sypkiego umieszcza się w dwudzielnym naczyniu pomiarowym i obciąża znaną siłą P_σ , która wywołuje naprężenie normalne σ . Do górnej ruchomej ramki przykłada się siłę poziomą P_τ , która jest mierzona dynamometrem. Jednocześnie mierzone jest przemieszczenie. Przy pewnej wartości siły P_τ następuje stały poślizg (rys. 7.5).

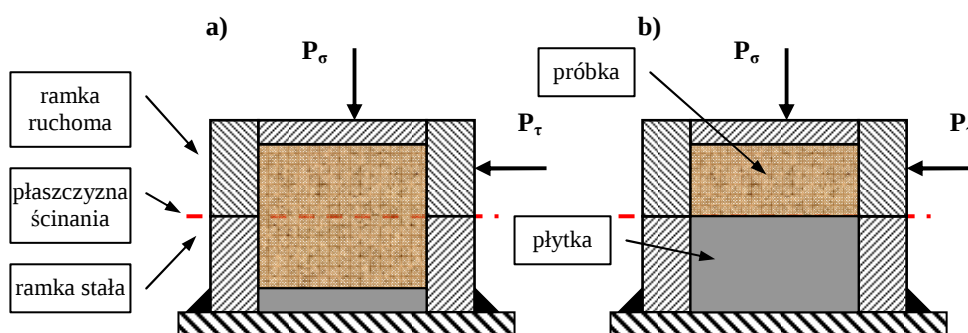


Rys. 7.2. Schemat naczynia pomiarowego (celka Jenikego)



Rys. 7.3. Widok naczynia pomiarowego

Przy wyznaczaniu wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ powierzchnia ścinania przebiega wewnątrz złoża materiału sypkiego (rys. 7.4a). Natomiast chcąc wyznaczyć wartość współczynnika tarcia zewnętrznego μ materiału sypkiego, w ramce stałej umieszcza się płytkę (stalową, bo z takiego materiału jest wykonana rynna) tak, aby powierzchnia ścinania znajdowała się na styku materiał sypki – płytki (rys. 7.4b). Sposób pomiaru, dla wyznaczenia wartości współczynników tarcia zewnętrznego μ za pomocą tego aparatu, odwzorowuje rzeczywiste warunki współpracy zgrzebło – rynna.



Rys. 7.4. Schemat naczynia pomiarowego aparatu typu AB przy wyznaczaniu:
a) kąta tarcia wewnętrznego, b) współczynnika tarcia zewnętrznego

Przygotowaną, jak na rys. 7.4, próbkę materiału sypkiego ścina się ze stałą prędkością. Podczas próby, siła styczna P_τ [N] jest mierzona dynamometrem, a przemieszczenie s [mm] - czujnikiem przemieszczeń. Mierzone wielkości rejestrowane były na komputerze pomiarowym. Przy znanej sile obciążającej próbkę P_σ i zmierzonej sile P_τ wymagane wielkości wyznaczono z poniższych zależności:

$$\mu = \frac{P_{\tau}}{P_{\sigma}} \quad (7.2)$$

$$\varphi = \arctan \frac{P_{\tau}}{P_{\sigma}} \quad (7.3)$$

gdzie $P_{\sigma} = 7,98$ [N].

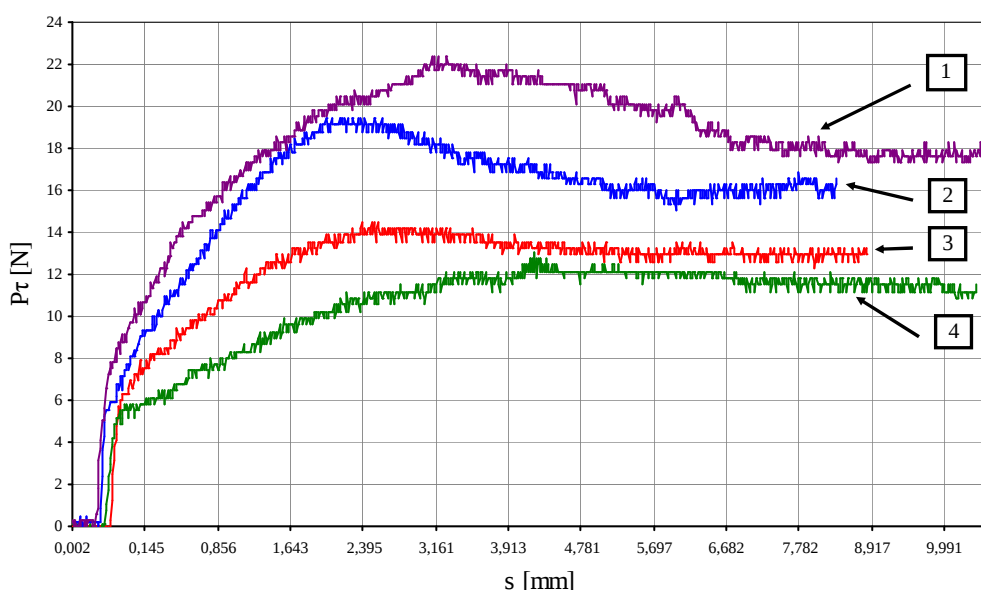
Próby bezpośredniego ścinania przeprowadzono dla dwóch przypadków:

- ścinanie następowało wewnątrz materiału (rys. 7.4a),
- ścinanie następowało na styku materiał – płytka stalowa (rys. 7.4b).

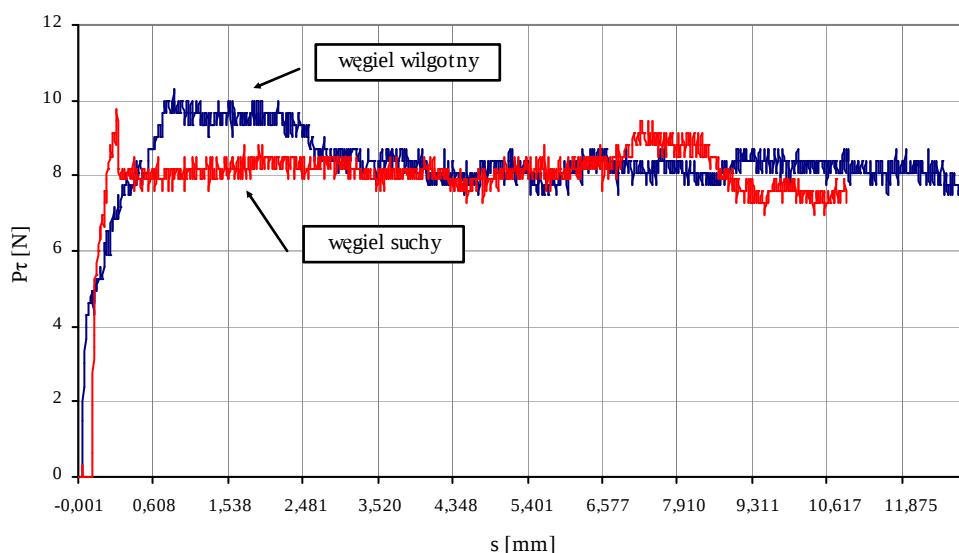
Dla tych przypadków każdy pomiar był powtarzany czterokrotnie, a wyniki uśredniane. W tab. 7.1 zestawiono średnie wartości sił ścinających P_{τ} dla poszczególnych materiałów.

Tab.7.1. Wyznaczone w pomiarach wartości siły ścinającej próbkę

Materiał	Siła ścinająca na styku materiał – płytka stalowa P_{τ} [N]	Siła ścinająca wewnątrz materiału P_{τ} [N]
Politroksan	8,67	2,99
Tlenek żelaza	8,63	4,62
Pył węgla brunatnego	8,11	3,17
Rozdrobniony węgiel kamienny zanieczyszczony	12,06	4,11
Rozdrobniony węgiel kamienny wilgotny	8,31	4,13
Rozdrobniony węgiel kamienny suchy	12,54	4,49



Rys. 7.5. Wykresy z próby bezpośredniego ścinania przy wyznaczaniu wartości współczynnika tarcia zewnętrznego: 1 – węgiel kam. zanieczyszczony, 2 – węgiel kam. suchy, 3 – politroksan, 4 – pył węgla brunatnego.



Rys. 7.6. Wykresy z próby bezpośredniego ścinania dla węgla kamiennego suchego i wilgotnego przy wyznaczaniu wartości współczynnika tarcia zewnętrznego μ .

Na rysunkach 7.5 i 7.6 przedstawiono przykładowo zarejestrowane przebiegi siły ścinającej dla różnych materiałów.

Po przeprowadzonych pomiarach z zależności (7.2) i (7.3) obliczono wartości współczynnika tarcia zewnętrznego μ oraz kąta tarcia wewnętrznego φ .

W tabeli 7.2 zestawiono kompletne wyniki uzyskane w badaniach pomocniczych. Wyniki te potem wykorzystano do analizy porównawczej wyników badań teoretycznych z wynikami badań doświadczalnych (rozdz. 9).

Tab.7.2. Zestawienie wyników uzyskanych w badaniach pomocniczych

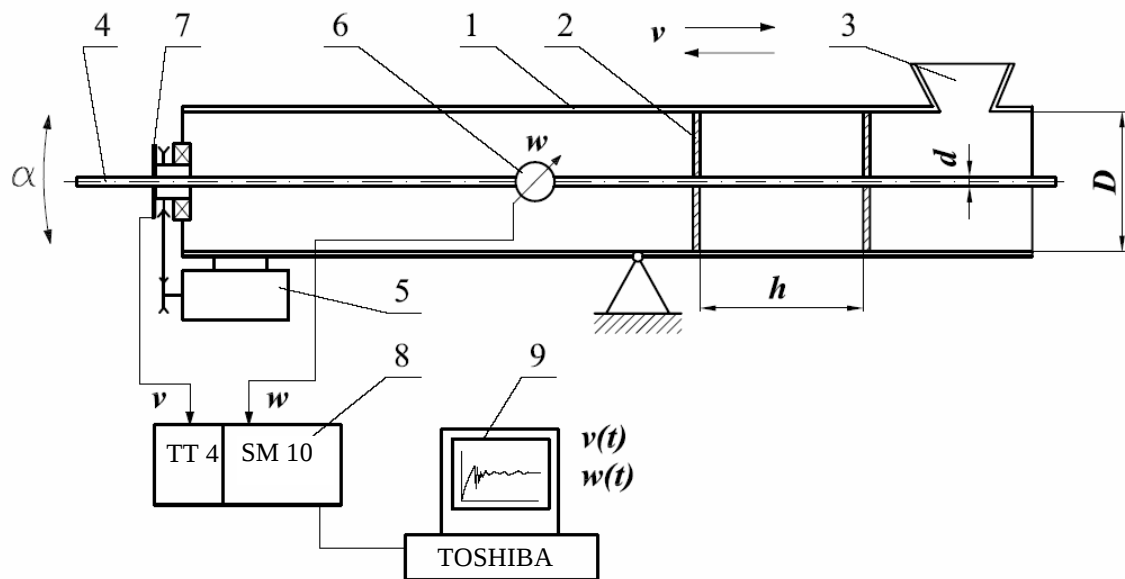
Materiał	γ_m $\left[\frac{N}{m^3} \right]$	wsp. tarcia μ	kąt tarcia wew. φ [°]	wsp. k $k = tg^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$
Politroksan	7453,05	0,357	47,4	0,152
Tlenek żelaza	4707,2	0,578	47,2	0,153
Pył węgla brunatnego	6472,4	0,379	45,4	0,168
Rozdrobniony węgiel kam. zanieczyszczony	11964,1	0,515	56,5	0,09
Rozdrobniony węgiel kam. wilgotny	7455,6	0,517	46,1	0,162
Rozdrobniony węgiel kam. suchy	7357,5	0,563	57,5	0,085

W wyniku przeprowadzonych, w ramach badań pomocniczych, pomiarów stwierdzono istotne różnice właściwości badanych materiałów. Materiały sypane nawet,

jeśli mają bardzo zbliżone np. wartości współczynników tarcia μ , mogą mieć istotnie różne wartości kąta tarcia wewnętrznego φ (tab. 7.1). Również ten sam materiał w zależności np. od wilgotności cechuje się różnymi właściwościami. Z przeprowadzonych badań wynika też, że materiały uziarnione mają większą wartość kąta tarcia wewnętrznego φ niż materiały pyliste. Materiały uziarnione i suche posiadają wyższe wartości współczynników μ i φ niż materiały pyliste czy wilgotne. Powyższe wskazuje, że znajomość rzeczywistych właściwości materiałów transportowanych jest nieodzowna do racjonalnego projektowania przenośników zgrzeblowych rurowych.

7.2. Badania zasadnicze

Dla realizacji przyjętego celu pracy zostało zaprojektowane i wykonane stanowisko badawcze. Schemat tego stanowiska przedstawiono na rysunku 7.7. Podstawowym elementem stanowiska jest rurowa rynna o średnicy wewnętrznej $D = 0,1$ [m], wykonana ze stali i jak rynny rzeczywistych przenośników. Rynna jest zamocowana przegubowo na podstawie. Umożliwia to płynną regulację kąta α nachylenia rynny względem poziomu. Wewnątrz rynny jest umieszczone cięgło w postaci nagwintowanego pręta. Na tym cięgle zamocowano dwa stalowe zgrzebła posiadające możliwość płynnej regulacji ich odstępów h . W cięgło wpięto dynamometr do bezpośredniego pomiaru oporu w [N] przemieszczania porcji materiału o grubości h oraz cięgła ze zgrzeblami. Napęd cięgła był realizowany na zasadzie śruba – nakrętka. Nakrętka była napędzana, poprzez przekładnię pasową, przez silnik elektryczny z możliwością regulacji jego prędkości obrotowej oraz kierunku obrotów. Pomiar prędkości przemieszczania cięgła v realizowany był z wykorzystaniem czujnika optoelektronicznego.



Rys. 7.7. Schemat stanowiska badawczego: 1 – rurowa rynna, 2 – zgrzebló, 3 – wsyp, 4 – cięgło śrubowe, 5 – silnik napędowy, 6 – dynamometr, 7 – czujnik optoelektroniczny, 8 – wzmacniacze pomiarowe typu TT 4 i SM 10, 9 – komputer pomiarowy

Ciężar cięgła z dwoma zgrzeblami, zastosowanych na stanowisku badawczym, wynosił $q_l = 21,58[\text{N}]$, a wyznaczona w pomiarach wartość współczynnika tarcia zgrzebeł o rynnę – $\mu_l = 0,56$.

Mierzone sygnały $w(t)$ i $v(t)$ po wzmocnieniu były rejestrowane na komputerze pomiarowym. Na rysunku 7.8. przedstawione jest stanowisko badawcze wraz z aparaturą pomiarowo – rejestrującą.



Rys. 7.8. Widok stanowiska badawczego z aparaturą pomiarowo-rejestrującą

Dla każdego z badanych materiałów przebieg pomiarów był następujący: po całkowitym wypełnieniu materiałem przestrzeni pomiędzy zgrzeblami, załączano napęd i przy zadanej wartości kąta nachylenia rynny α oraz prędkości ruchu zgrzebeł v prowadzono rejestrację sygnałów pomiarowych oporu w i prędkości v przy założonym i nawrotnym kierunku ruchu zgrzebeł. Dla wszystkich przyjętych do badań materiałów oraz wartości kąta nachylenia rynny α i prędkości ruchu zgrzebeł v , każdy pomiar powtarzano trzykrotnie, a wyniki z tych pomiarów były następnie uśredniane.

Wielkościami zmiennymi (sterowanymi) w badaniach były:

- odstęp między zgrzeblami h ,
- prędkość transportowania v ,
- rodzaj materiału transportowanego,
- kąt α nachylenia rynny przenośnika względem poziomu.

W tab. 7.3 zestawiono zmienne uwzględnione w badaniach doświadczalnych oraz ich wartości.

Tab. 7.3. Przyjęte w badaniach wartości wielkości zmiennych

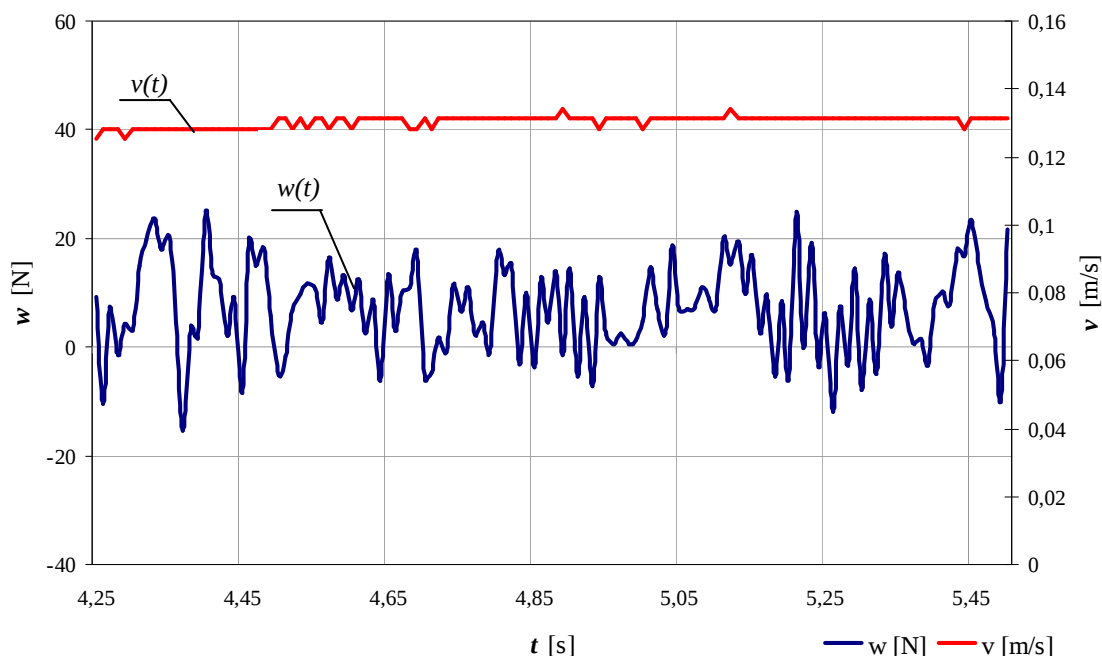
Rodzaj materiału	Wartości wielkości zmiennych											
	h [m]			v [m/s]			α [°]					
politroksan	1D	2D	3D	0,13	0,16	0,18	0	±30	±60	-	-	±90
tlenek żelaza	1D	2D	3D	0,13	0,16	0,18	0	±30	±60	-	-	±90
pył węgla brunatnego	1D	2D	3D	0,13	0,16	0,18	0	±30	±60	-	-	±90
rozdrobniony węgiel kam. zan. krzemionką	1D	2D	3D	0,13	0,16	0,18	0	±30	±60	-	-	±90
rozdrobniony węgiel kam.	1D	2D	-	0,13	0,16	-	0	±30	±60	±70	±80	±90
rozdrobniony węgiel kamienny suchy	1D	2D	-	0,13	0,16	-	0	±30	±60	±70	±80	±90

gdzie: $D = 0,1$ m jest średnicą wewnętrzną rurowej rynny (zgrzebla),

(+) - oznacza ruch warstwy materiału „w górę”,

(-) - ruch warstwy materiału „w dół”.

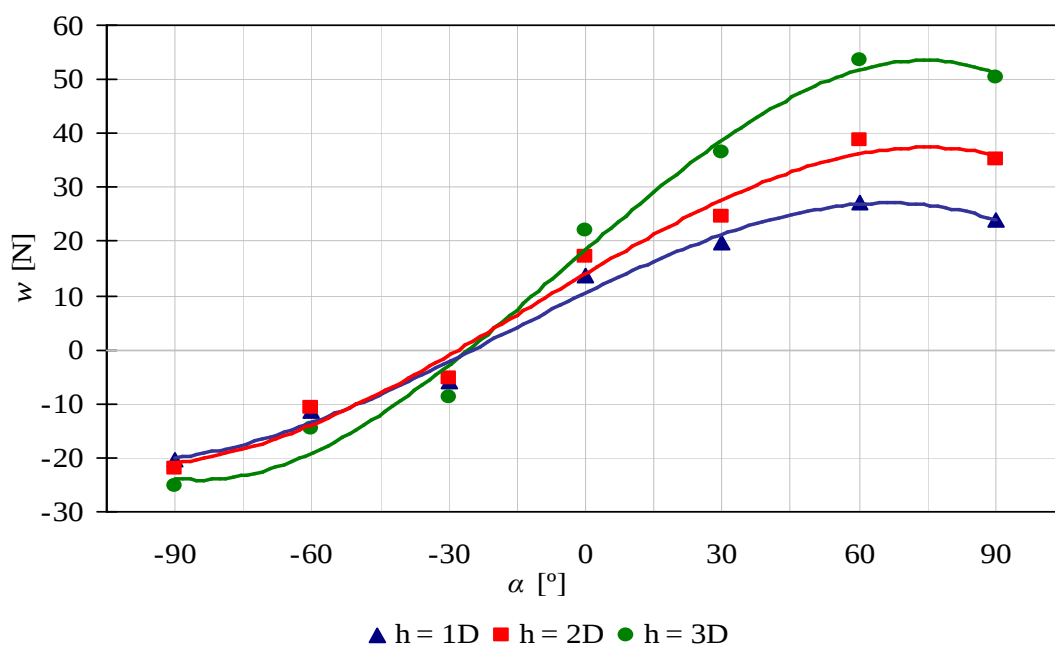
Konstrukcja stanowiska badawczego umożliwiała zadawanie różnych prędkości ruchu zgrzebeł. Przedstawione w dalszej części pracy wyniki pomiarów dotyczą prędkości $v = 0,13$ [m/s].



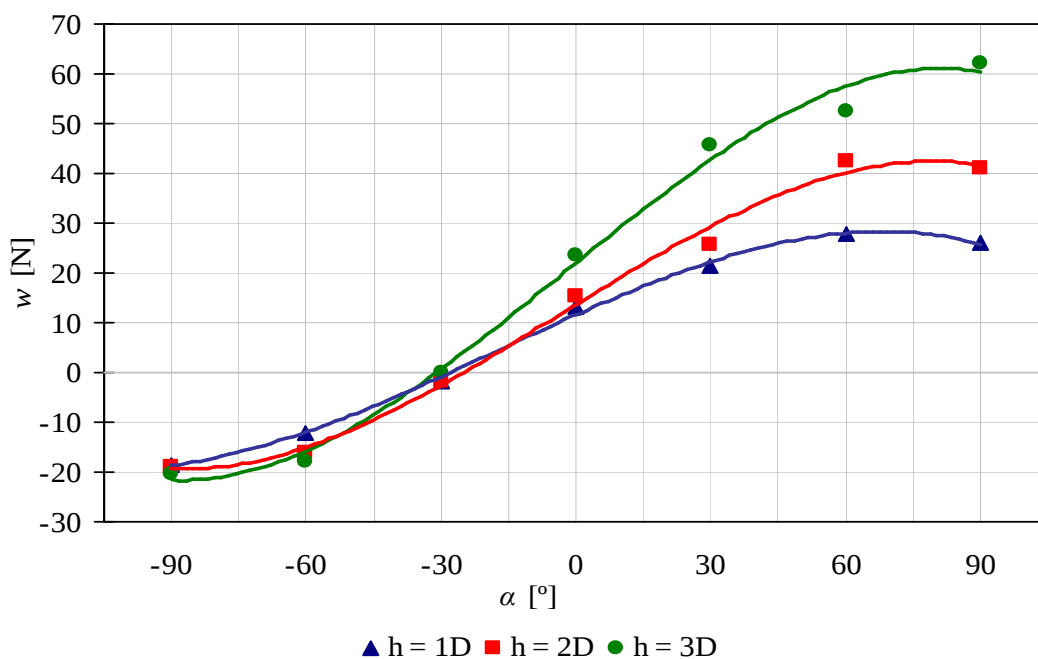
Rys. 7.9. Przykładowy zapis przebiegu w czasie siły oporu w i prędkości v

Na rys. 7.9 przedstawiono przykładowo przebiegi mierzonych sygnałów $w(t)$ i $v(t)$. Do analizy brano wartość uśrednioną z trzech pomiarów wartości siły oporu w i prędkości cieżna v z zakresu ustabilizowanych ich przebiegów.

Rysunki 7.10 i 7.11 przedstawiają przykładowo wyniki uzyskane z pomiarów na stanowisku badawczym. Liniami ciągłymi oznaczono aproksymowane wyniki z pomiarów. Szczegółowe omówienie wyników badań doświadczalnych podano dalszej części pracy.



Rys. 7.10. Wyniki pomiarów oporu ruchu w uzyskane dla tlenku żelaza



Rys. 7.11. Wyniki pomiarów oporu ruchu w uzyskane dla pyłu węgla brunatnego

W wykorzystanym układzie pomiarowym, istnieje wiele źródeł błędów pomiarowych [3], które z uwagi na charakter występowania można podzielić na błędy: grube, systematyczne (np. wynikające z niedokładności aparatury pomiarowej) i przypadkowe. W trakcie badań wyeliminowano błędy grube, a pozostałe błędy oszacowano.

Podawane przez producentów elementów toru pomiarowego górne wartości względnych błędów dopuszczalnych wynoszą dla:

- czujnika prędkości 1 %,
- wzmacniacza TT 4 $\pm 0,5$ %,
- wzmacniacza SM 10 ± 2 %,
- przetwornika A/C 0,5 %.

Wykorzystując charakterystykę statyczną przeprowadzono ocenę błędu wzorcowania dynamometru tensometrycznego do pomiaru oporu ruchu w [3]:

$$\delta_w = \delta_{wzm} + \delta_d + \delta_{odcz} + \delta_p = 1,81\%$$

oraz czujnika prędkości v :

$$\delta_v = \delta_{wzm} + \delta_c + \delta_{odcz} + \delta_p = 2,31\%$$

gdzie: $\delta_{wzm} = 0,4$ % - błąd klasy wzmacniacza tensometrycznego,

$\delta_d = 0,4$ % - błąd wzorcowania dynamometru,

$\delta_c = 1$ % - błąd czujnika prędkości,

$\delta_{odcz} = 0,1$ % - błąd odczytu,

$\delta_p = 0,81$ % - błąd przetwarzania.

Wyznaczony błąd systematyczny pomiaru oporów ruchu w i prędkości v [3] może posłużyć do wyznaczenia poprawki wyniku pomiaru. Błąd ten jest ze znakiem $\pm$, ponieważ został on oszacowany na podstawie błędów poszczególnych elementów toru pomiarowego, podanych w ich specyfikacji.

$$w_{rz} = w \pm \delta_w \cdot w, \quad v_{rz} = v \pm \delta_v \cdot v$$

Całkowity błąd pomiaru wartości siły oporu w wynosi $\pm 1,81\%$, a pomiaru wartości prędkości $v \pm 2,31\%$.

8. Badania na przemysłowym przenośniku zgrzeblowym rurowym

W celu dalszej weryfikacji, uzyskanych wcześniej, zależności teoretycznych na opory ruchu przeprowadzono również badania doświadczalne na przemysłowym przenośniku zgrzeblowym rurowym firmy *Ferind*. Jest to przenośnik z ciągnem linowym (o średnicy liny $d = 0,014$ m), którego trasa posiada odcinki proste poziome i nachylone względem poziomu oraz łukowe (rys. 8.1). Podstawowe dane przenośnika są następujące:

- moc napędu $N = 370$ [W],
- prędkość ciągu $v = 0,06$ [m/s],
- średnica wewnętrzna rurowej rynny $D = 0,1$ [m],
- odstęp między zgrzeblami $h = 0,155$ [m],
- kąt nachylenia trasy $\alpha = 18$ [°].

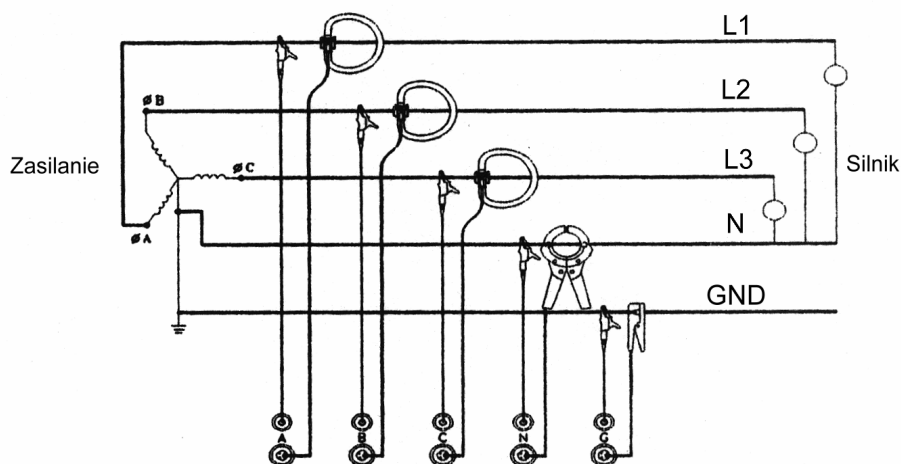


Rys. 8.1. Widok przenośnika zgrzeblowego rurowego f-my *Ferind*

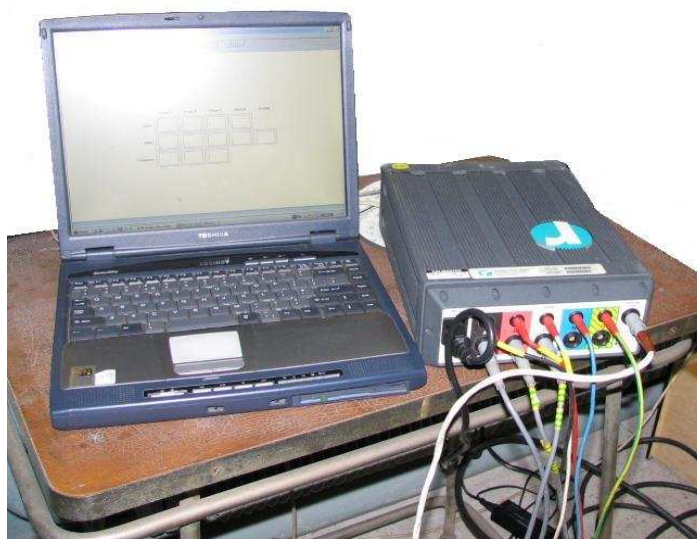
Badania doświadczalne obejmowały pomiary mocy czynnej pobieranej z sieci przez silnik przenośnika przy różnych naciągach wstępnych ciągu roboczego S dla przypadku:

- przenośnika nieobciążonego materiałem transportowanym,
- przenośnika obciążonego materiałem transportowanym (rozdrobnionym węglem kamiennym suchym i wilgotnym) na długości $4h$ na prostym poziomym i nachylonym oraz łukowym odcinku trasy.

Do pomiaru mocy czynnej wykorzystano układ pomiarowy przedstawiony na rysunkach 8.2 i 8.3.



Rys. 8.2. Schemat układu do pomiaru mocy czynnej

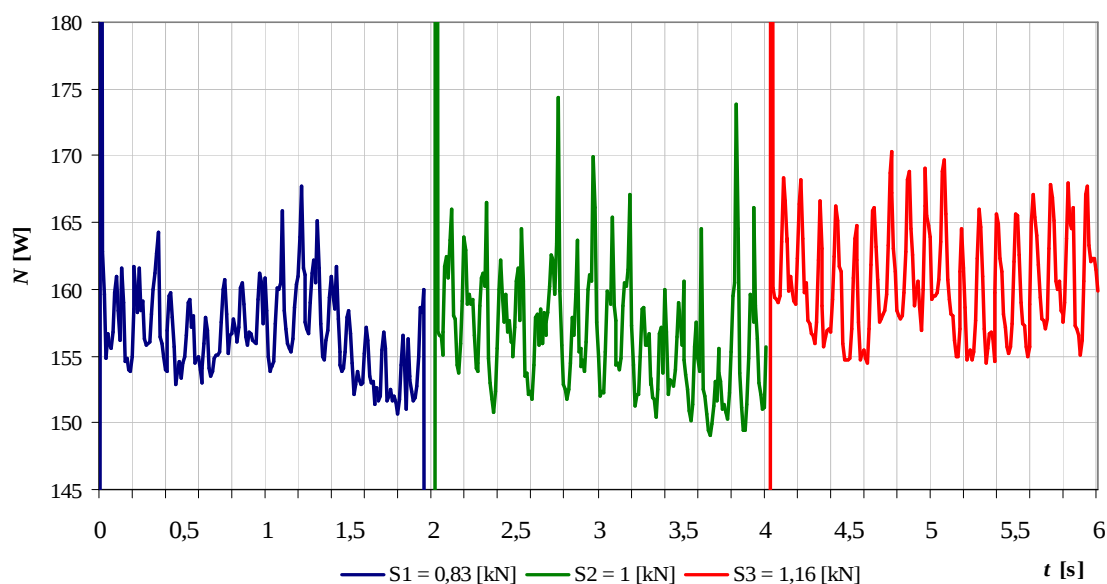


Rys. 8.3. Widok urządzenia pomiarowego RPM wraz komputerem pomiarowym

Na rysunkach 8.4 – 8.7 przedstawiono zapisy mocy czynnej pobieranej z sieci przez silnik przenośnika.

Zapisy poboru mocy czynnej przez silnik przenośnika nieobciążonego przy siłach wstępnego naciągu cięgna roboczego wynoszących: $S_1 = 0,83$ [kN], $S_2 = 1$ [kN] i $S_3 = 1,16$ [kN] przedstawiono na rys. 8.4. W tabeli 8.1 zestawiono uśrednione w czasie wyniki pomiarów poboru mocy czynnej N oraz wyznaczone na ich podstawie opory ruchu W przenośnika (przy sprawności układu napędowego $\eta = 0,85$). Widać z nich, że wraz ze wzrostem siły naciągu wstępnego S rosną odpowiednio pobierana moc oraz

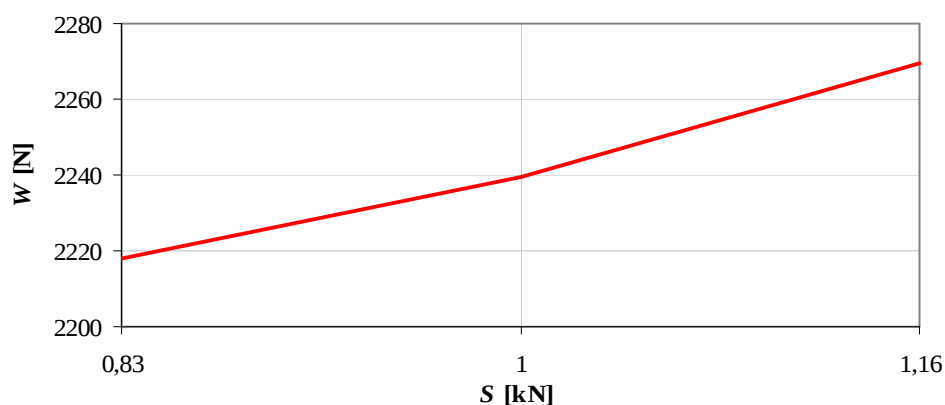
opory ruchu przenośnika. Na podstawie otrzymanych wyników sporządzono wykres zależności $W(S)$, który przedstawiono na rys. 8.5. Zmiana oporów ruchu przenośnika $W(S)$ jest bardzo zbliżona do otrzymanej z analizy teoretycznej (por. rys. 5.19).



Rys. 8.4. Zapis poboru mocy czynnej przez silnik przenośnika nieobciążonego przy różnych siłach wstępnego naciągu cięgna roboczego

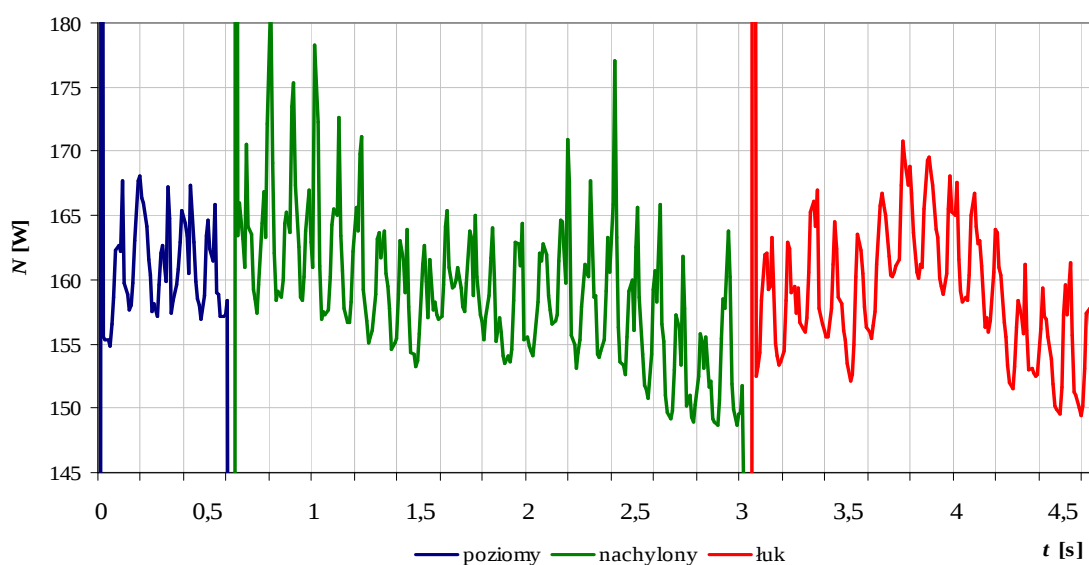
Tab. 8.1. Wyniki pomiarów i obliczeń dla przenośnika nieobciążonego

Napięcie cięgna S [kN]	Moc zmierzona N [W]	Opór ruchu W [N]
0,83	156,57	2218,14
1	158,08	2239,56
1,16	160,2	2269,61



Rys. 8.5. Wykres zależności $W(S)$ uzyskany z pomiarów

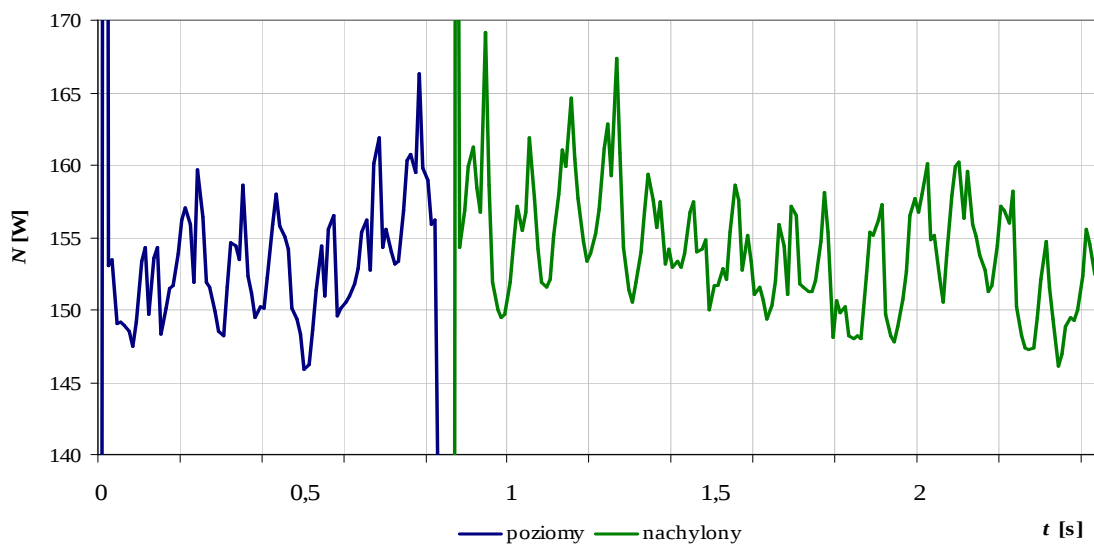
W dalszej kolejności przedstawiono wyniki pomiarów dla przenośnika obciążonego materiałem transportowanym na długości równej $4h$ (materiał wypełniał cztery przestrzenie pomiędzy kolejnymi zgrzeblami). Przebieg tych pomiarów był następujący: przez otwór zasypowy w pełni załadowano te przestrzenie rynny materiałem, który był transportowany na odcinku prostym poziomym i nachylonym oraz łukowym, a następnie włączano przenośnik i układ pomiarowo – rejestrujący (rys. 8.6). Na rysunkach 8.6 i 8.7 przedstawiono zapisy poboru mocy czynnej przez silnik przenośnika w czasie transportu materiałów na poszczególnych odcinkach trasy. W tabelach 8.2 i 8.3 zestawiono uzyskane wyniki pomiarów mocy czynnej N i obliczonych oporów ruchu W .



Rys. 8.6. Zapis poboru mocy czynnej przez silnik przenośnika obciążonego węglem kamiennym suchym

Tab. 8.2. Wyniki pomiarów i obliczeń dla przenośnika obciążonego węglem kamiennym suchym

Odcinek przenośnika	Moc zmierzona N [W]	Opór ruchu W [N]
poziomy	160,96	2280,3
nachylony	161,90	2293,65
łuk	162,97	2308,75

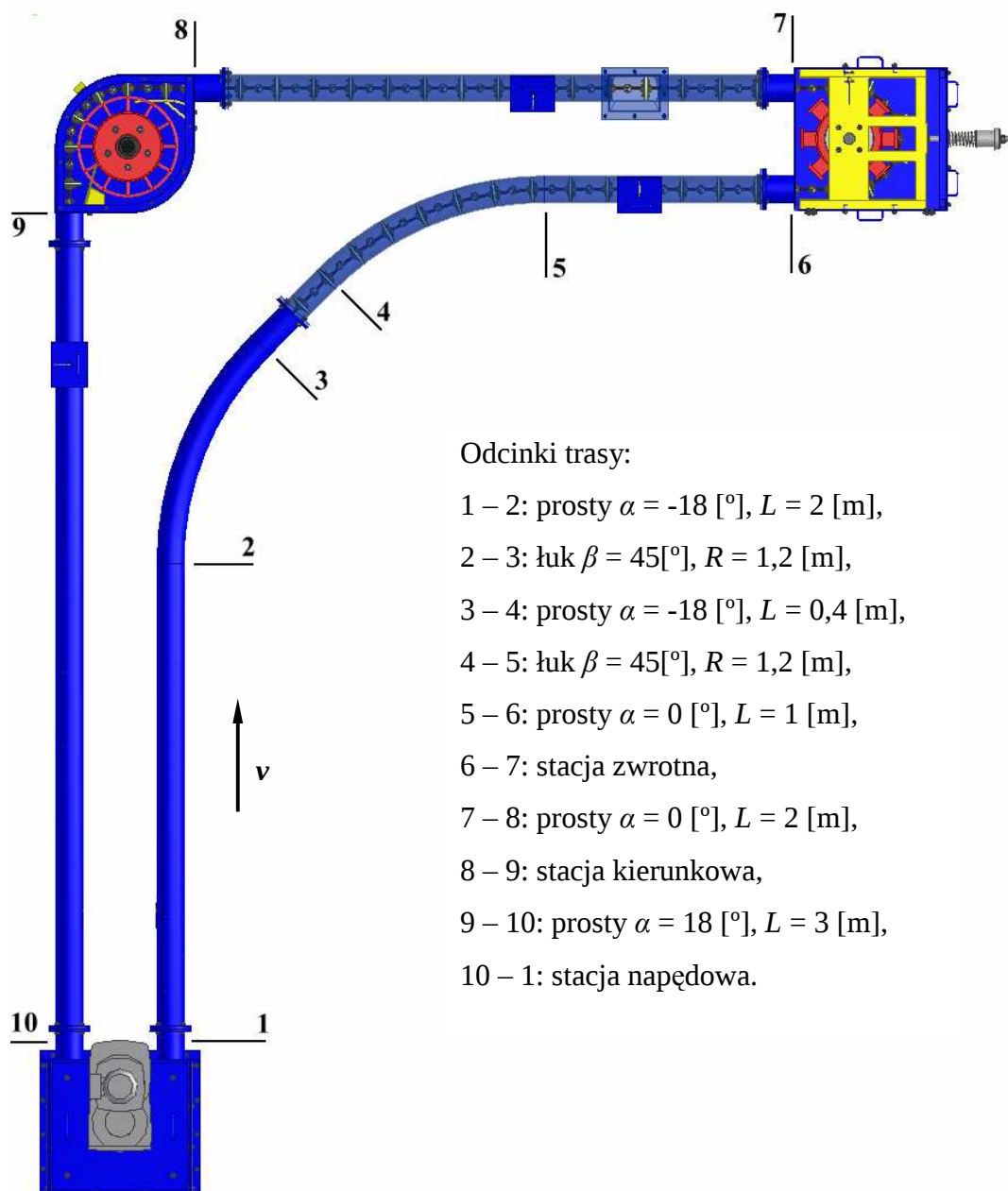


Rys. 8.7. Zapis poboru mocy czynnej przez silnik przenośnika obciążonego węglem kamiennym wilgotnym

Tab. 8.3. Wyniki pomiarów i obliczeń dla przenośnika obciążonego węglem wilgotnym

Odcinek przenośnika	Moc zmierzona N [W]	Opór ruchu W [N]
poziomy	153,58	2175,77
nachylony	156,96	2223,63

Wykorzystując otrzymane zależności teoretyczne (4.22, 4.23, 4.37 i 4.40) przeprowadzono obliczenia oporów ruchu oraz mocy potrzebnej do napędu tego przenośnika. Na rys. 8.8 przedstawiono schemat przenośnika wraz z parametrami geometrycznymi poszczególnych odcinków jego trasy.



Rys. 8.8. Schemat przenośnika zgrzeblowego rurowego f-my *Ferind*

Obliczenia przeprowadzono dla następujących przypadków:

- przenośnik nieobciążony,
- przenośnik obciążony rozdrobnionym węglem kamiennym suchym na odcinkach prostym poziomym i nachylonym oraz łukowym,
- przenośnik obciążony rozdrobnionym węglem kamiennym wilgotnym na odcinkach prostym poziomym i nachylonym,

przy następujących danych:

- siła wstępnego napięcia cięgna $S_0 = 500 [N]$,

- współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę $\mu_l = 0,7$,
- ciężar jednostkowy cięgna ze zgrzeblami $q = 43,4$ [N/m],
- prędkość cięgna $v = 0,06$ [m/s],
- sprawność układu napędowego $\eta = 0,85$.

Dane materiałów transportowanych (rozdrobniony węgiel kamienny suchy i wilgotny) przyjęto z tab. 7.2.

Do obliczenia oporów ruchu przenośnika na odcinkach prostoliniowych wykorzystano zależności (4.22 i 4.23), a dla odcinków łukowych - zależności (4.37 i 4.40). W obliczeniach przyjęto, że opory miejscowe (przebiegania cięgna na gwiazdach napędowej, zwrotnej i kierunkowej) stanowią 10 % całkowitych oporów ruchu przenośnika [14]. Moc potrzebną do napędu przenośnika, przy wyznaczonych na podstawie pomiarów oporach ruchu, obliczono z zależności:

$$N = \frac{W_c \cdot v}{\eta} \quad [\text{W}] \quad (8.1)$$

Poniżej pokazano przykładowy tok obliczeń oporów ruchu przenośnika obciążonego rozdrobnionym węglem kamiennym wilgotnym na odcinku nachylonym 9-10 (rys. 8.8).

Obliczenie sił w cięgnię w poszczególnych punktach trasy:

- odcinek 1 – 2:

$$S_2 = S_0 + L_{1-2} \cdot q(\mu_l \cos \alpha_{1-2} + \sin \alpha_{1-2}) = 540,93 [\text{N}]$$

- odcinek 2 – 3:

$$S_3 = S_2 + \left[\frac{\mu_l \cdot S_2}{\text{ctg} \xi - \mu_l} + \left[\mu_l \frac{S_2}{\cos \xi - \mu_l \cdot \sin \xi} \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi \right] \frac{q_w^6 - 1}{q_w - 1} \right] = 1104,59 [\text{N}]$$

- odcinek 3 – 4:

$$S_4 = S_3 + L_{3-4} \cdot q(\mu_l \cos \alpha_{3-4} + \sin \alpha_{3-4}) = 1112,78 [\text{N}]$$

- odcinek 4 – 5:

$$S_5 = S_4 + \left[\frac{\mu_l \cdot S_4}{\text{ctg} \xi - \mu_l} + \left[\mu_l \frac{S_4}{\cos \xi - \mu_l \cdot \sin \xi} \left(1 + \frac{1 + \mu_l \tan \xi}{1 - \mu_l \tan \xi} \right) \sin \xi \right] \frac{q_w^6 - 1}{q_w - 1} \right] = 2272,31 [\text{N}]$$

- odcinek 5 – 6:

$$S_6 = S_5 + L_{5-6} \cdot q(\mu_l \cos \alpha_{5-6} + \sin \alpha_{5-6}) = 2307,96 [\text{N}]$$

- odcinek 6 – 7:

$$S_7 = S_6$$

- odcinek 7 – 8:

$$S_8 = S_7 + L_{7-8} \cdot q(\mu_l \cos \alpha_{7-8} + \sin \alpha_{7-8}) = 2379,25 [\text{N}]$$

- odcinek 8 – 9:

$$S_9 = S_8$$

- odcinek 9 – 10:

$$S_{10} = S_9 + \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m \cdot 4h \cdot (\mu \cos \alpha_{9-10} + \sin \alpha_{9-10}) + \\ + L_{9-10} \cdot q(\mu_l \cos \alpha_{9-10} + \sin \alpha_{9-10}) = 2569,33 [\text{N}]$$

Opory ruchu przenośnika W wynoszą:

$$W = S_{10} - S_0 = 2569,33 - 500 = 2069,33 [\text{N}]$$

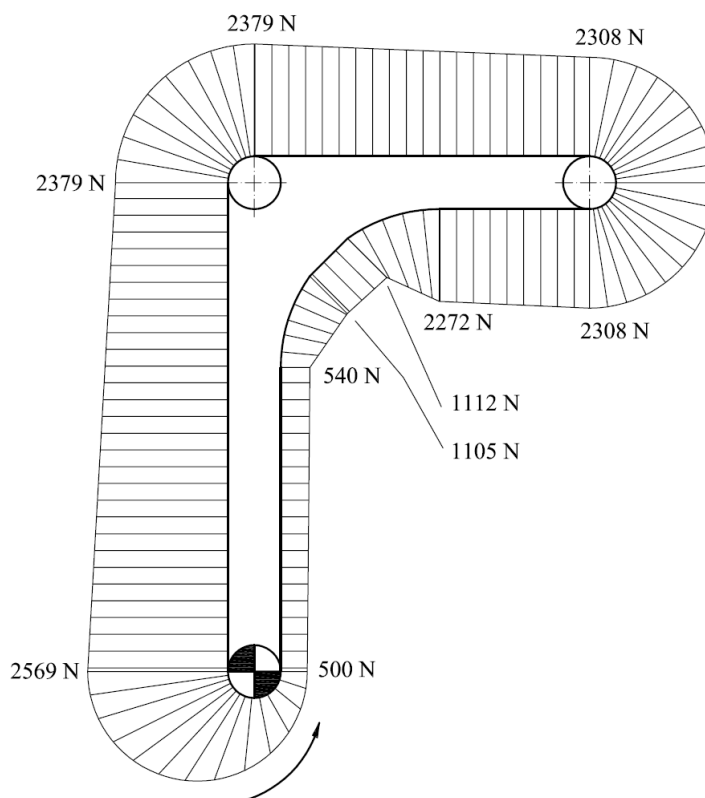
Na rys. 8.9 przedstawiono wykres rozkładu obliczonych sił w ciągu przenośnika.

Po uwzględnieniu dodatkowych oporów miejscowych (przebiegania cięgna na gwiazdach napędowej, zwrotnej i kierunkowej) równych 10% oporów ruchu, całkowite opory ruchu przenośnika wynoszą:

$$W_c = 1,1 \cdot W = 1,1 \cdot 2069,33 = 2276,27 [\text{N}]$$

a moc potrzebna do napędu w tym przypadku wynosi:

$$N = \frac{W_c \cdot v}{\eta} = \frac{2276,27 \cdot 0,06}{0,85} = 160,67 [\text{W}]$$



Rys. 8.9. Rozkład sił w cięgnię przenośnika

Podobnie wyznaczono opory dla pozostałych przypadków, czyli dla przenośnika nieobciążonego i obciążonego materiałem na poszczególnych odcinkach.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń dla przenośnika nieobciążonego, moc potrzebna do napędu wynosi $N = 156,94$ [W] (zmierzona $N = 158,08$ [W]). Obliczone moce potrzebne dla napędu przenośnika obciążonego materiałem transportowanym przedstawiono w tab. 8.4 wraz z wynikami pomiarów tej mocy.

Tab. 8.4. Wyniki pomiarów i obliczeń dla przenośnika obciążonego przenośnika obciążonego

Odcinek przenośnika obciążony materiałem na długości $4h$	Rozdrobniony węgiel kamienny suchy		Rozdrobniony węgiel kamienny wilgotny	
	Moc N [W]		Moc N [W]	
	zmierzona	obliczona	zmierzona	obliczona
poziomy	160,9	159,2	153,5	159,3
nachylony	161,9	160,3	156,9	160,6
łukowy	162,2	180,3	-	-

Wyniki pomiarów przeprowadzonych na przenośniku rzeczywistym oraz wyniki obliczeń porównawczych (na podstawie zależności teoretycznych z rozdz. 4) pozwalają

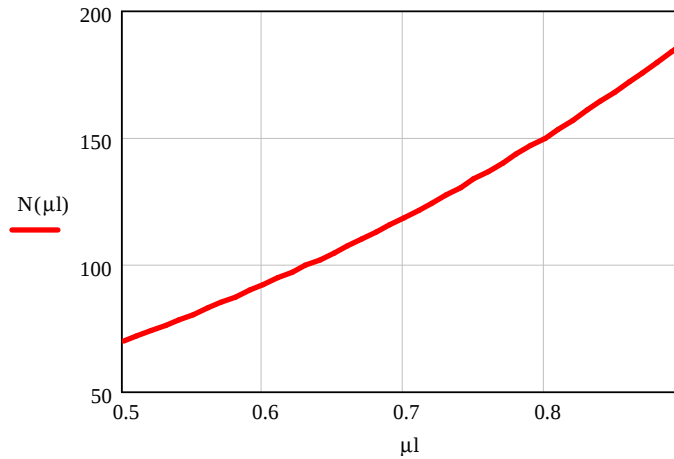
stwierdzić, że obliczona moc nie odbiega w znaczącym stopniu od mocy zmierzonej, zarówno dla przypadku przenośnika nieobciążonego jak i obciążonego materiałem transportowanym. Dla analizowanych przypadków (tab. 8.4) różnice pomiędzy mocą zmierzona, a obliczoną nie przekraczały 25%. Najmniejsze różnice w wynikach uzyskano dla przenośnika obciążonego materiałem na łuku, która wynosi 18%. Jednak należy wspomnieć, że powyższe obliczenia przeprowadzone były dla założonych danych takich jak: współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l , sprawność układu napędowego η oraz oporów miejscowych (10%).

Dysponując zmierzoną czynną mocą pobieraną przez silnik przenośnika oraz teoretycznymi zależnościami pozwalającymi obliczyć tę moc, metodą numeryczną wyznaczono rzeczywiste wartości współczynniki tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l , które zestawiono w tab. 8.5.

Tab. 8.5. Rzeczywiste wartości współczynnika tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l

Przenośnik nieobciążony materiałem	Rozdrobniony węgiel kamienny wilgotny		Rozdrobniony węgiel kamienny suchy		
	odc. poziomy	odc. nachylony	odc. poziomy	odc. nachylony	odc. łukowy
$\mu_l = 0,83$	$\mu_l = 0,8$	$\mu_l = 0,81$	$\mu_l = 0,82$	$\mu_l = 0,82$	$\mu_l = 0,78$

Jak widać z tab. 8.5 rzeczywiste współczynniki tarcia oscylują wokół wartości $\mu_l = 0,8$ co oznacza, że są około 12% większe niż przyjęty do obliczeń $\mu_l = 0,7$. Spowodowało różnicę w wynikach mocy zmierzonej i obliczonej na poziomie około 25%. Oznacza to, że współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l ma znaczący wpływ na opory ruchu, a co za tym idzie na energochłonność przenośnika. Przy projektowaniu istotna jest znajomość rzeczywistej wartości współczynnika μ_l . Na rys. 8.10 przedstawiono wpływ tego współczynnika na moc potrzebną do napędu badanego przenośnika.



Rys. 8.10. Wykres zależności mocy $N(\mu l)$

Uzyskane wyniki z pomiarów na przenośniku przemysłowym i na stanowisku badawczym (rozdz. 7.3) pokazują dobrą ich zgodność z wynikami uzyskanymi z zależności teoretycznych, co stanowi dobrą podstawę do opracowania metody obliczania oporów ruchu przenośników zgrzeblowych rurowych, pozwalającej na racjonalne ich projektowanie.

9. Analiza porównawcza wyników badań teoretycznych i doświadczalnych

Uzyskane z badań doświadczalnych wyniki porównano z wynikami badań teoretycznych. Ze względu na dużą liczbę wyników badań doświadczalnych, przedstawiono w tym rozdziale tylko wybrane ich wyniki.

Korzystając z zależności teoretycznych (rozdz. 4), opory ruchu warstwy materiału o grubości h i dwóch zgrzebeł z cięgłem śrubowym, jak miało to miejsce na stanowisku badawczym (rozdz. 7.1.2), wyraża zależność:

$$w = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_m h (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot e^{\frac{4\mu k D h}{D^2 - d^2} \operatorname{sgn}(\alpha - \alpha_{gr})} + q(\mu_l \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (9.1)$$

gdzie:

$q = 21,58$ [N] – ciężar cięgła z dwoma zgrzebełami,

$\mu_l = 0,56$ – współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę,

a w tym przypadku:

$$\alpha_{gr} = -\arctg \left[\frac{\pi(d^2 - D^2) \gamma_m h \mu \exp\left(\frac{-4\mu k h D}{d^2 - D^2}\right) - 4q\mu_l}{\pi(d^2 - D^2) \gamma_m h \exp\left(\frac{-4\mu k h D}{d^2 - D^2}\right) - 4q} \right] \quad (9.2)$$

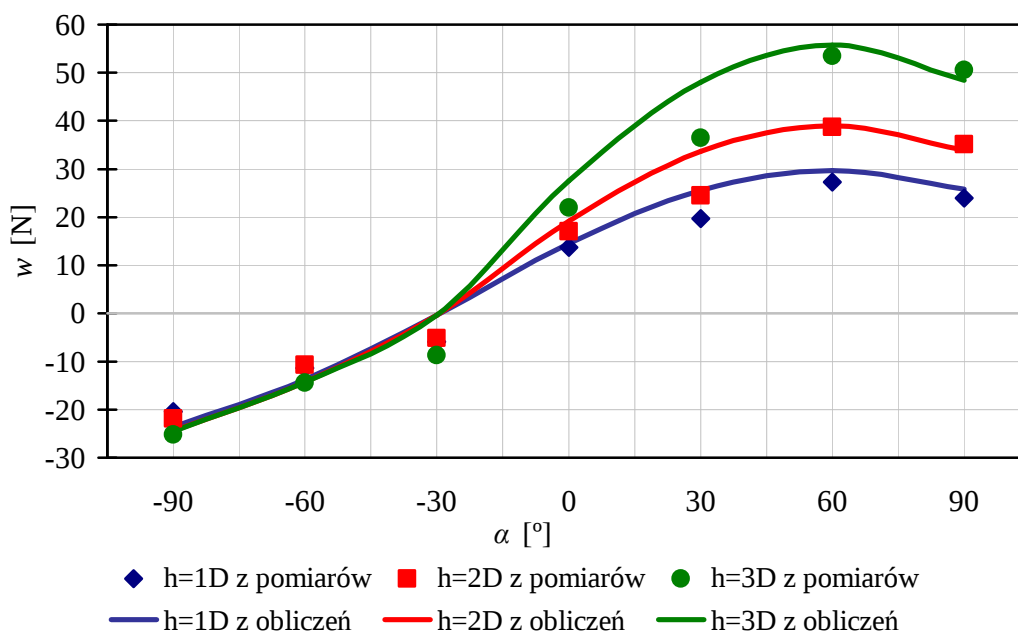
Powyższe zależności były podstawą weryfikacji wyników badań teoretycznych wynikami badań doświadczalnych.

Wyniki badań doświadczalnych zestawiono w tabelach i w postaci wykresów dla wybranych materiałów transportowanych. Wyznaczono współczynniki korelacji oraz różnice procentowe pomiędzy wynikami badań teoretycznych i doświadczalnych.

- Tlenek żelaza

Tab 9.1. Zestawienie wyników badań teoretycznych i doświadczalnych dla tlenku żelaza

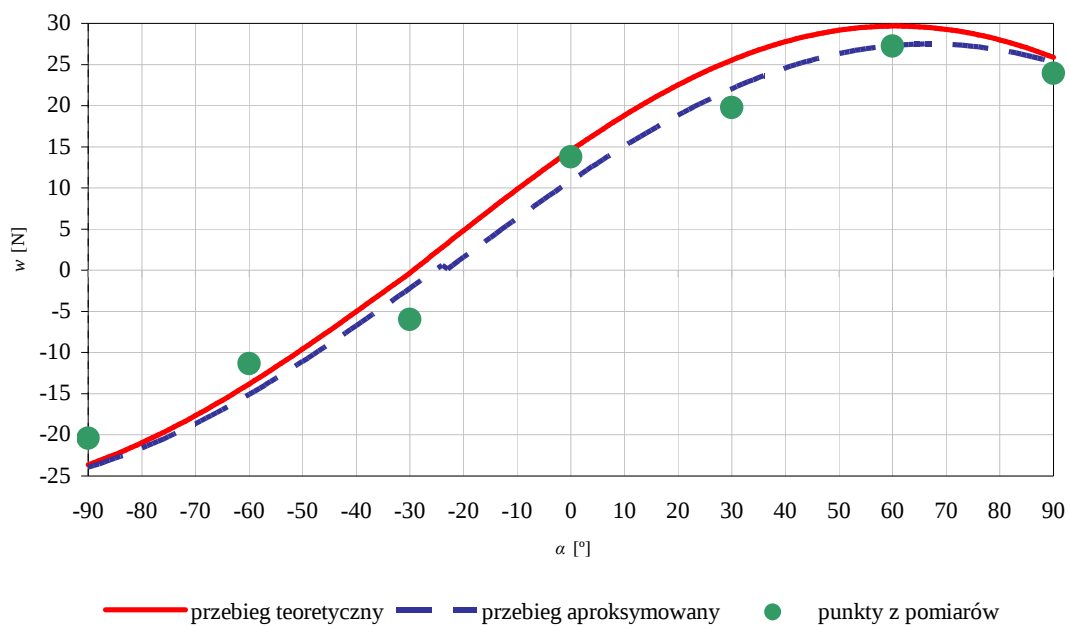
Opory ruchu w [N]						
α [°]	Rozstaw zgrzebeł h [m], $D = 0,1$ [m]					
	1D		2D		3D	
	wyliczone	zmierzone	wyliczone	zmierzone	wyliczone	zmierzone
-90	-23,63	-20,42	-24,41	-21,87	-24,52	-25,15
-60	-13,83	-11,36	-14,28	-10,66	-14,34	-14,45
-30	-0,32	-5,99	-0,32	-5,11	-0,32	-8,73
0	14,56	13,78	19,23	17,12	27,58	22,03
30	25,54	19,76	33,63	24,57	48,09	36,5
60	29,67	27,25	39,01	38,78	55,7	53,48
90	25,86	23,94	33,95	35,09	48,4	50,51



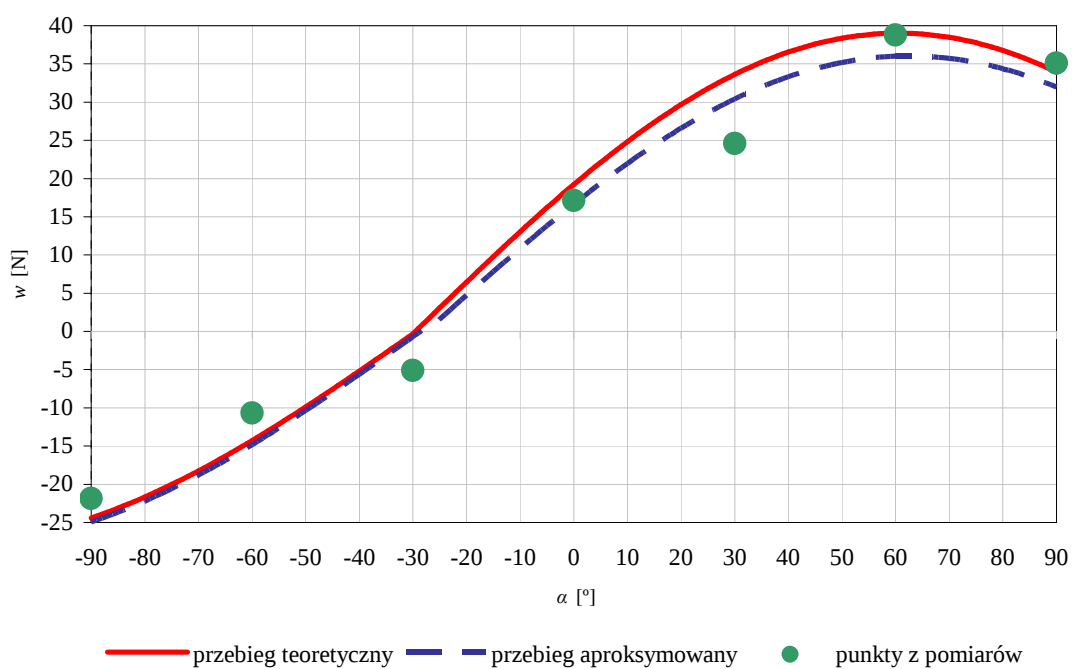
Rys. 9.1. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy odstępach zgrzebeł $h = 1D - 2D - 3D$ dla tlenku żelaza

Tab 9.2. Różnice między wynikami teoretycznymi a doświadczalnymi

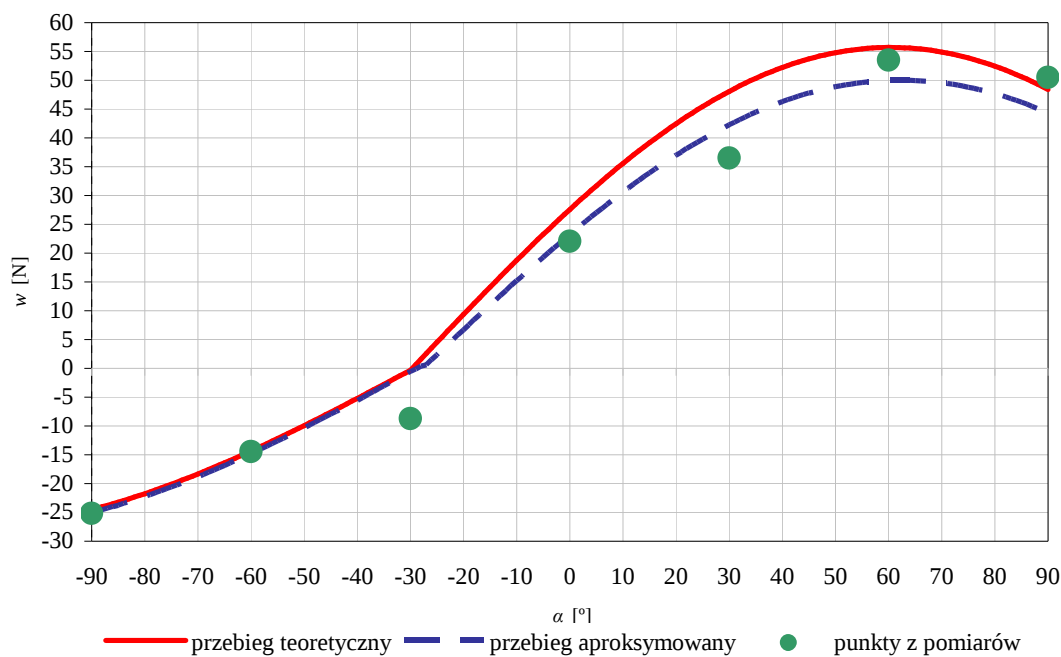
α [°]	Różnice w [%]		
	dla odstępów zgrzebeł h [m], $D = 0,1$ [m]		
	1D	2D	3D
-90	15,7	11,6	2,5
-60	21,7	34	0,7
-30	17	19	28
0	5,6	12,3	25,2
30	29,2	36,8	31,7
60	8,8	0,6	4,2
90	8	3,3	4,4



Rys. 9.2 Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 1D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98688$)



Rys. 9.3 Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 2D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98543$)

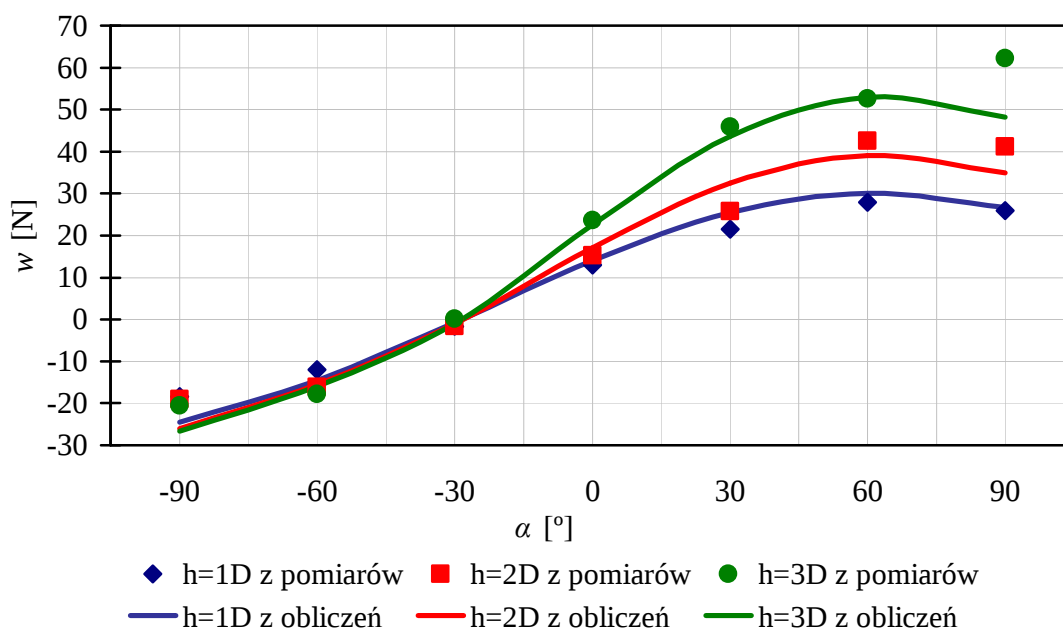


Rys. 9.4. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 3D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98686$)

- Pył węgla brunatnego

Tab. 9.3. Zestawienie wyników badań teoretycznych i doświadczalnych dla pyłu węgla brunatnego

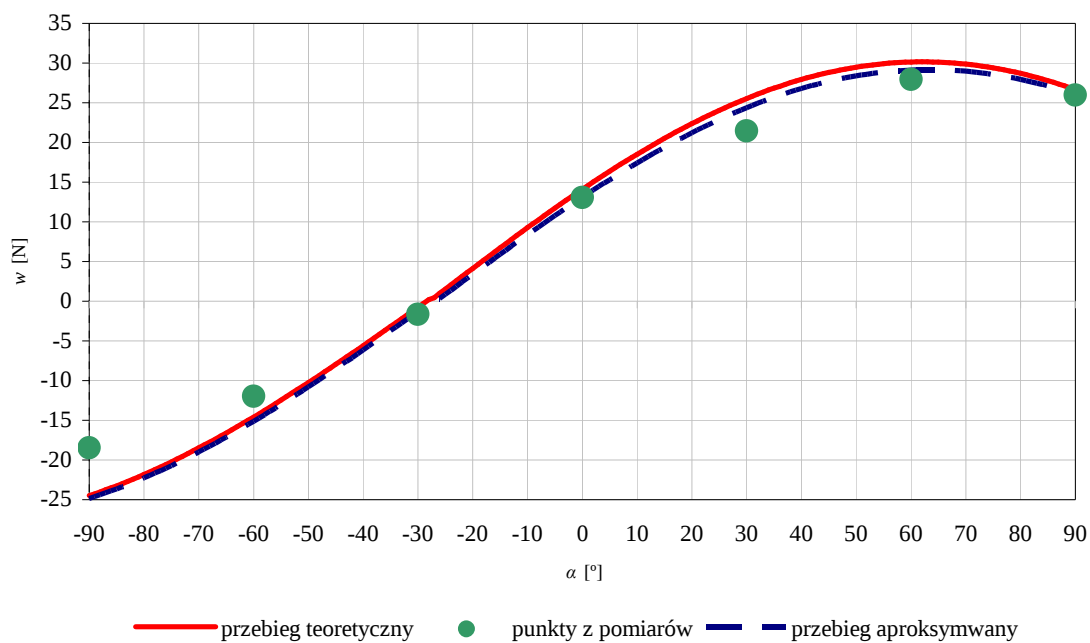
Opory ruchu w [N]						
α [°]	Rozstaw zgrzebeł h [m], $D = 0,1$ [m]					
	1D		2D		3D	
	wyliczone	zmierzone	wyliczone	zmierzone	wyliczone	zmierzone
-90	-24,49	-18,47	-25,99	-18,98	-26,59	-20,51
-60	-14,59	-11,98	-15,59	-16,15	-15,99	-17,83
-30	-0,78	-1,64	-1,01	-1,72	-1,1	0,15
0	14,1	13,06	17,04	15,26	22,62	23,65
30	25,54	21,46	32,56	25,85	43,65	45,84
60	30,13	27,93	39	42,52	52,99	52,56
90	26,65	25,96	34,98	41,12	48,13	62,19



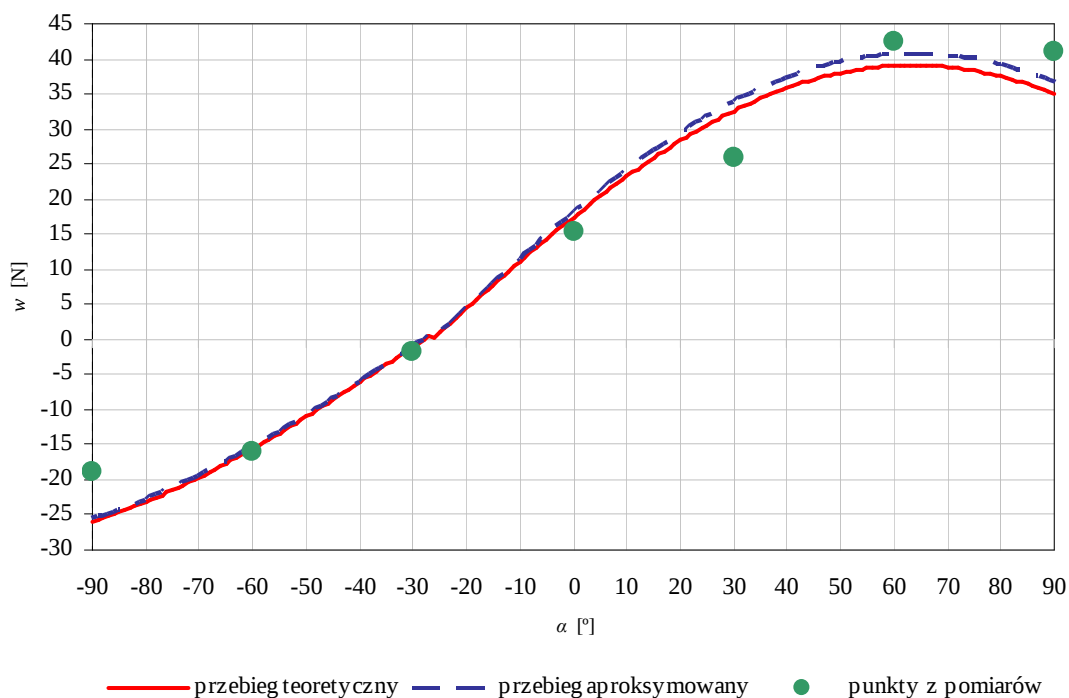
Rys. 9.5. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy odstępach zgrzebeł $h = 1D - 2D - 3D$ dla pyłu węgla brunatnego

Tab. 9.4. Różnice między wynikami teoretycznymi a doświadczalnymi

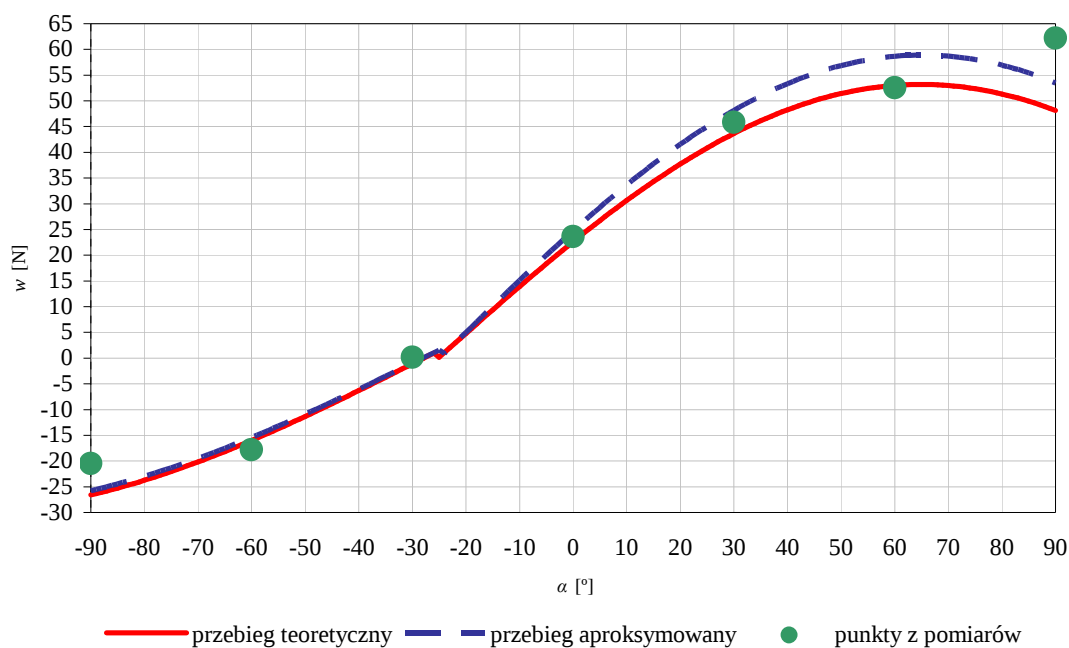
α [°]	Różnice w [%]		
	dla rozstawu zgrzebeł h [m], $D = 0,1$ [m]		
	1D	2D	3D
-90	32,6	37	29,7
-60	25,3	3,6	11,5
-30	11	43	33
0	8	11,7	4,5
30	19	26	5
60	7,9	9	0,8
90	2,7	17,6	29,2



Rys. 9.6. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 1D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98553$)

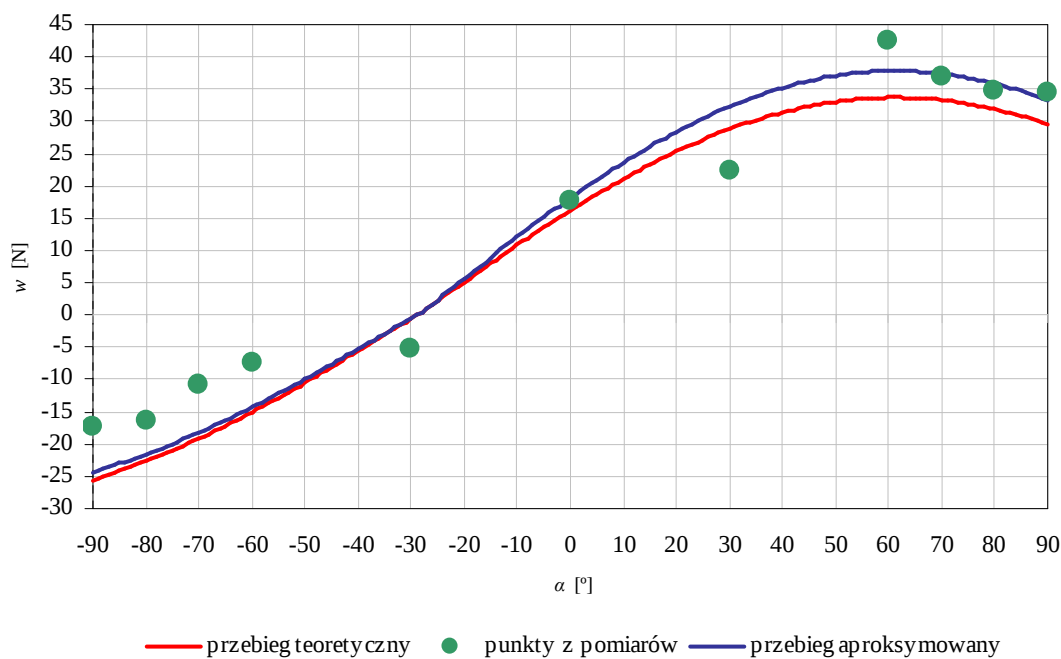


Rys. 9.7. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 2D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98187$)

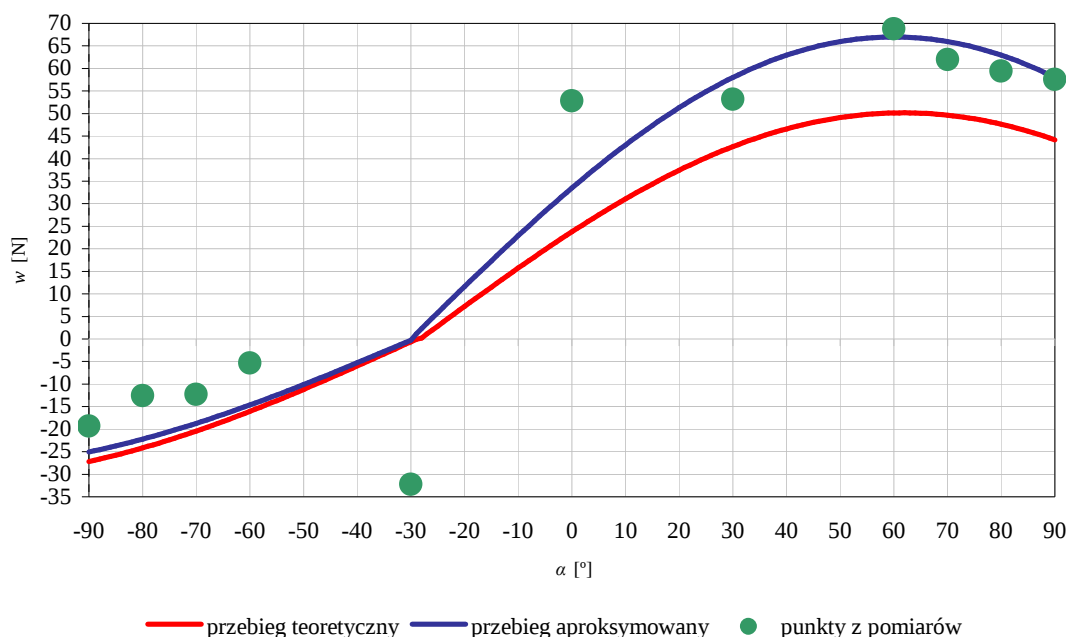


Rys. 9.8. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 3D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98723$)

- Rozdrobniony węgiel kamienny wilgotnego



Rys. 9.9. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 1D$ (współczynnik korelacji $R = 0,97034$)



Rys. 9.10. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 2D$ (współczynnik korelacji $R = 0,94545$)

Przeprowadzona analiza porównawcza wyników badań teoretycznych i doświadczalnych pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego w sposób istotny zależą od jego parametrów konstrukcyjnych (D , h , q , μ_1 , α) i od własności transportowanego materiału (k , μ , γ_m),
- wyniki badań doświadczalnych potwierdziły występowanie maksimum oporów ruchu przenośnika w granicach kąta $\alpha = 60 - 70^\circ$ oraz to, że opory przy ruchu materiału „w dół” są mniejsze niż opory przy ruchu „w górę”,
- opory ruchu przenośnika na kierunku pionowym „w górę” są około dwa razy większe niż na kierunku poziomym,
- opracowany i zweryfikowany doświadczalnie opis oporów ruchu przenośnika wykazał zadowalającą dokładność, o czym świadczą wysokie współczynniki korelacji i będzie on podstawą do zaproponowania metody racjonalnego doboru wartości parametrów h i D przenośnika i obliczania oporów jego ruchu, przy których można zminimalizować te opory, a przez to ograniczyć zużycie elementów przenośnika (zgrzebeł, rynien).

10. Zagadnienie racjonalnego doboru wartości parametrów h i D przenośnika zgrzeblowego rurowego

Przeprowadzone dotąd rozważania pozwoliły stwierdzić, że podstawowymi parametrami konstrukcyjno-geometrycznymi przenośnika zgrzeblowego rurowego, które mają zasadniczy wpływ na jego opory ruchu są: odstęp między zgrzeblami h oraz średnica wewnętrzna rurowej rynny D . W najprostszych modelach zużycia zakłada się, że jest ono wprost proporcjonalne do pracy sił tarcia [27], zatem przez zmniejszenie oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego można zmniejszyć zużycie ścierne jego rynien i zgrzebeł. W tych przenośnikach, mimo stosunkowo niewielkich ich mocy, problem zużycia jest ważny, dlatego istotne jest aby przez właściwy dobór wartości parametrów h i D , zminimalizować opory ruchu, a przez to ograniczyć zużycie ścierne. Pojawia się zatem pytanie: czy można tak dobrać wartości parametrów h i D , przy których, w zadanych warunkach pracy, uzyskuje się minimalne opory ruchu przenośnika? W odpowiedzi na to pytanie, w dalszej części rozdziału przedstawiono metodę doboru takich wartości parametrów h i D , przy których można uzyskać minimalne opory ruchu przenośnika.

Opór ruchu przenośnika odniesiony do jednostki jego długości przy $\alpha \geq \alpha_{gr}$ wyraża się zależnością:

$$w_j = \frac{W_L + W_P}{L} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot (1 - \delta^2) \cdot \gamma_m (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot \exp\left(\frac{4\mu kh}{D(1 - \delta^2)}\right) + 2q\mu_l \cos \alpha \left[\frac{N}{m}\right] \quad (10.1)$$

Jednakowe wydajności przenośników oznaczonych indeksami 1 i 2, odpowiednio o parametrach h_1 , D_1 i prędkości zgrzebeł v_1 oraz h_2 , D_2 i v_2 , będą zachowane gdy:

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \frac{v_2}{v_1} \quad \text{oraz} \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{h_2}{h_1} \quad \text{czyli} \quad \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \frac{h_2}{h_1} \quad (10.2)$$

Wprowadzając współczynnik:

$$c = \frac{D_1}{D_2} \quad \text{mamy:} \quad D_2 = \frac{D_1}{c} \quad \text{oraz} \quad \text{zgodnie z (10.2)} \quad h_2 = c^2 \cdot h_1 \quad \text{i} \quad v_2 = c^2 \cdot v_1 \quad (10.3)$$

Iloraz oporów jednostkowych przenośników 1 i 2 wyraża się zależnością:

$$\frac{w_{j2}}{w_{j1}} = k_w(c) = \frac{\frac{\pi D_2^2}{4}(1-\delta^2)\gamma_m(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot \exp\left(\frac{4\mu k h_2}{D_2(1-\delta^2)}\right) + 2q\mu_l \cos \alpha}{\frac{\pi D_1^2}{4}(1-\delta^2)\gamma_m(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot \exp\left(\frac{4\mu k h_1}{D_1(1-\delta^2)}\right) + 2q\mu_l \cos \alpha} \quad (10.4)$$

Jednostkowy ciężar ciągu roboczego ze zgrzeblami wynosi:

$$q = q_l + q_z \quad (10.5)$$

gdzie: q_l [N/m] – jednostkowy ciężar ciągu (np. liny stalowej),

q_z [N/m] – jednostkowy ciężar zgrzebel (np. z żeliwa).

Ponieważ jednostkowy ciężar ciągu roboczego ze zgrzeblami zależy od wartości h i D , to ciężary jednostkowe ciągu i zgrzebel odpowiednio wynoszą:

$$q_l = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \gamma_l}{4} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right], \quad (10.6)$$

$$q_z = \frac{D^2}{h + g_z} \cdot \frac{\pi \cdot g_z \cdot \gamma_z}{4} \cong \frac{\pi \cdot g_z \cdot D^2 \cdot \gamma_z}{4 \cdot h} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right], \quad (10.7)$$

gdzie: γ_l [N/m³] – ciężar właściwy liny (dla liny typu 35(W)×7 $\gamma_l = 55000$ [N/m³]),

g_z [m] – grubość zgrzebła,

γ_z [N/m³] – ciężar właściwy materiału zgrzebła (dla żeliwa $\gamma_z = 72000$ [N/m³]).

Wraz ze zmianą średnicy rynny D zmieniają się także wymiary średnicy ciągu d oraz grubości zgrzebła g_z . Aby zachować proporcję tych wymiarów przyjęto następujące oznaczenia (współczynniki proporcji):

$$\delta = \frac{d}{D} ; \quad \delta_z = \frac{g_z}{D}. \quad (10.8)$$

Uwzględniając zależności (10.8) w zależnościach (10.6) i (10.7) otrzymano:

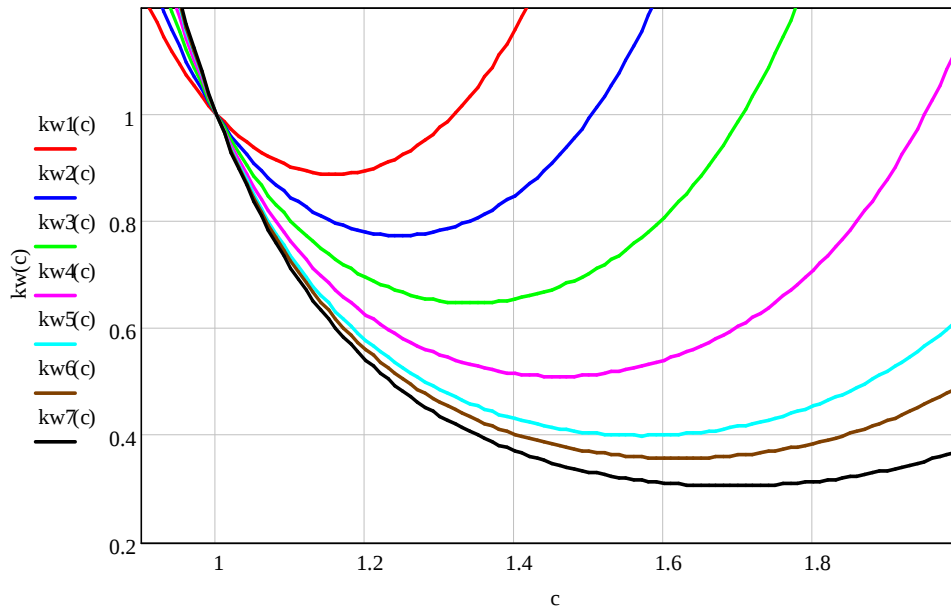
$$q_l = \frac{\pi D^2 \delta^2 \gamma_l}{4} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right], \quad (10.9)$$

$$q_z = \frac{\pi \delta_z D^3 \gamma_z}{4h} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]. \quad (10.10)$$

Po uwzględnieniu powyższych zależności w (10.4) otrzymuje się:

$$k_w(c) = \frac{\frac{\pi D_1^2}{4 \cdot c^2} (1 - \delta^2) \gamma_m (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot \exp\left(\frac{4 \mu k h_1 c^3}{D_1 (1 - \delta^2)}\right) + 2 \left(\frac{\pi \delta^2 D_1^2 \gamma_c}{4 \cdot c^2} + \frac{\pi \delta_z D_1^3 \gamma_z}{4 h_1 c^5} \right) \mu_l \cos \alpha}{\frac{\pi D_1^2}{4} (1 - \delta^2) \gamma_m (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot \exp\left(\frac{4 \mu k h_1}{D_1 (1 - \delta^2)}\right) + 2 \left(\frac{\pi \delta^2 D_1^2 \gamma_c}{4} + \frac{\pi \delta_z D_1^3 \gamma_z}{4 h_1} \right) \mu_l \cos \alpha} \quad (10.11)$$

Wykorzystując zależność (10.11) przeprowadzono przykładowe obliczenia oraz sporządzono wykresy ilorazu $k_w(c)$ dla tlenku żelaza (rys. 10.1) przy $h_1 = 0,15\text{m}$, $\alpha = 0^\circ$ oraz różnych średnicach D_1 stosowanych w przenośnikach zgrzeblowych rurowych.



Rys. 10.1. Wykresy zależności $k_w(c)$ przy: $h_1 = 0,15$ [m], $D_1 = 0,08-0,1-0,125-0,16-0,2-0,22-0,25$ [m], $\mu_l = 0,3$, $\alpha = 0^\circ$, $\gamma_m = 4707,2$ [N/m³], $\mu = 0,578$, $k = 0,153$ (tlenek żelaza)

Na powyższych wykresach widać, że przy pewnych wartościach parametru c iloraz jednostkowych oporów k_w osiąga minimum, co wskazuje na to, że istnieją takie wartości parametrów h i D , przy których opory ruchu przenośnika są minimalne. Przykładowo przyjmijmy przenośnik 1 o parametrach $h_1 = 0,15$ m, $D_1 = 0,2$ m

i $v_1 = 0,2$ m/s. Z wykresu przedstawionego na rys. 10.1, można wyznaczyć wartość parametru c , przy którym iloraz jednostkowych oporów ruchu k_w jest minimalny [krzywa $k_{w5}(c)$]; w tym przypadku $c = 1,57$. Korzystając z zależności (10.3) otrzymujemy parametry przenośnika 2, które wynoszą: $h_2 = 0,369$ m, $D_2 = 0,127$ m i $v_2 = 0,493$ m/s. Powtarzając tę procedurę dla innych danych wyjściowych np. dla przenośnika 1': $h_1' = 0,15$ m, $D_1' = 0,1$ m i $v_1' = 0,1$ m/s, wyznaczony parametr $c = 1,25$ [krzywa $k_{w2}(c)$], a przenośnik 2' ma minimalne opory przy: $h_2' = 0,234$ m, $D_2' = 0,08$ m, $v_2' = 0,156$ m/s. Wyznaczając stosunki: $\frac{D_2}{h_2} = 0,34$ i $\frac{D_2'}{h_2'} = 0,34$ otrzymuje się stałą ich wartość niezależnie od przyjętych danych wyjściowych D_1 i h_1 . Wskazuje to, że dla danego materiału transportowanego (w tym przypadku był to tlenek żelaza) oraz zadanych warunków pracy przenośnika (np. kąt nachylenia trasy) uzyskuje się jedno rozwiązanie w postaci stosunku $\frac{D}{h}$, przy którym opory ruchu przenośnika są minimalne.

W analizie teoretycznej oporów ruchu przenośnika (rozdz. 4) przyjęto, że współczynnik tarcia ma wartość stałą, czyli że nie zależy od prędkości ruchu ciągną v . Zatem poszukiwanie parametrów przenośnika, przy których uzyskuje się minimalne jego opory ruchu ogranicza się do wyznaczenia wartości D_2 i h_2 , czyli ich stosunku $\frac{D_2}{h_2}$.

Wprowadzając:

$$x_1 = \frac{D_1}{h_1}, \quad (10.12)$$

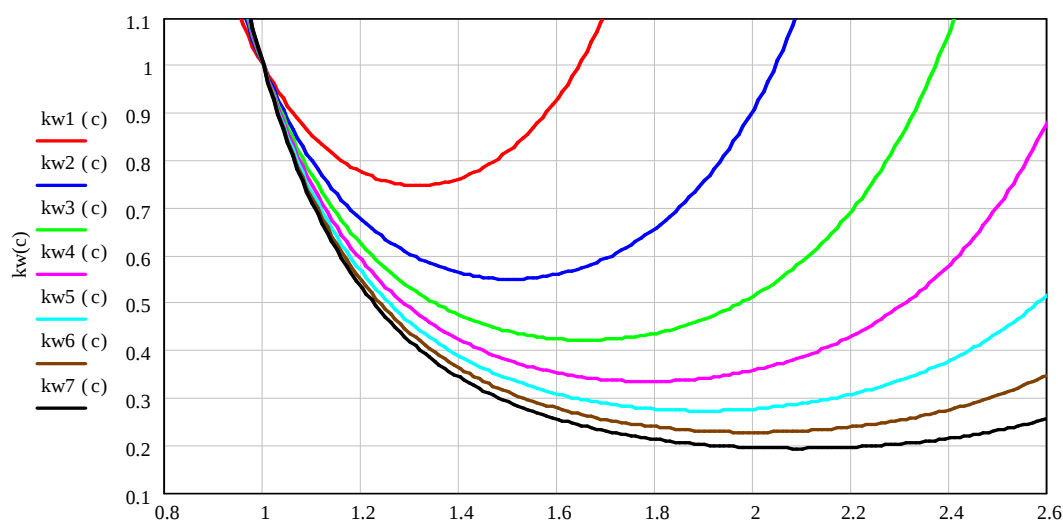
do zależności (10.4) otrzymuje się:

$$k_w(c) = \frac{\frac{\pi}{4 \cdot c^2} (1 - \delta^2) \gamma_m (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot \exp\left(\frac{4\mu k c^3}{x_1 (1 - \delta^2)}\right) + 2\left(\frac{\pi \delta^2 \gamma_c}{4 \cdot c^2} + \frac{\pi \delta_z \gamma_z}{4 c^5} x_1\right) \mu_l \cos \alpha}{\frac{\pi}{4} (1 - \delta^2) \gamma_m (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot \exp\left(\frac{4\mu k}{x_1 (1 - \delta^2)}\right) + 2\left(\frac{\pi \delta^2 \gamma_c}{4} + \frac{\pi \delta_z \gamma_z}{4} x_1\right) \mu_l \cos \alpha} \quad (10.13)$$

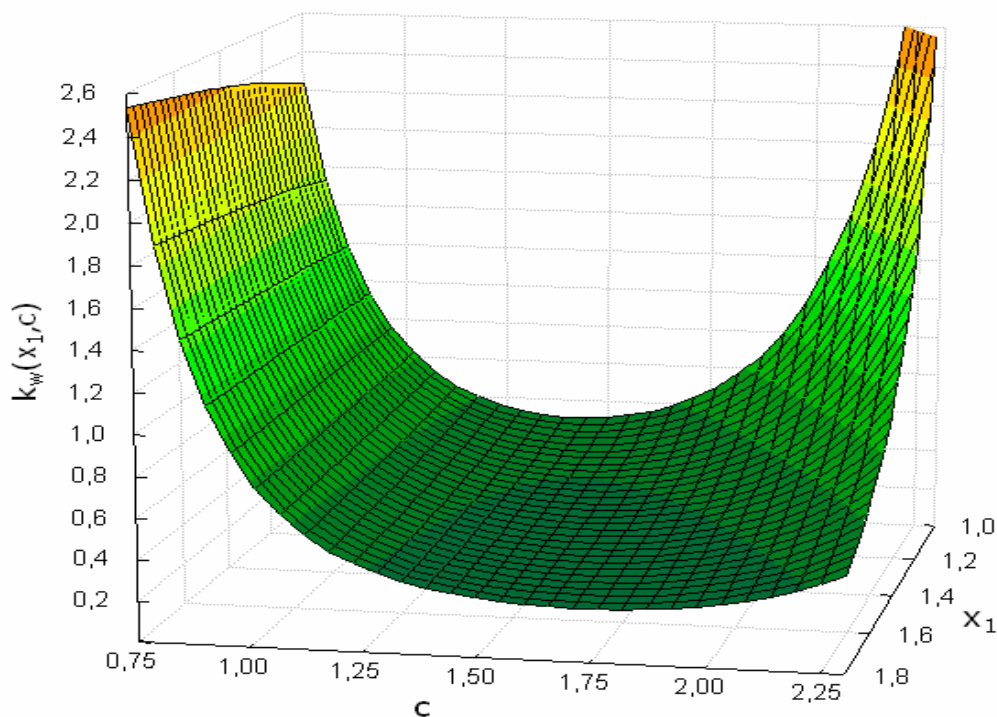
Otrzymana zależność (10.13) ma postać bezwymiarową i zależy od rodzaju i właściwości tribologicznych trących się par: materiał transportowany – rynna (γ_m, μ, k) oraz ciągną ze zgrzeblami – rynna (μ_l), a także od kąta α nachylenia trasy przenośnika oraz parametrów δ i δ_z . Zależność (10.13) umożliwia wyznaczenie wartości parametru

c , przy której uzyskuje się minimalne wartości ilorazu $k_w(c)$ – zatem i minimalne opory ruchu przenośnika – nie tylko dla danych wyjściowych D_I i h_I , ale ich zbioru określonego stałym stosunkiem D_I/h_I , przez co uzyskuje się szersze pole rozwiązań.

Na rys. 10.2 przedstawiono przykładowo rodzinę wykresów $k_w(c)$ dla węgla kamiennego, suchego przy różnych wartościach parametru x_I , a na rys. 10.3 - dla węgla kamiennego, wilgotnego.



Rys. 10.2. Wykres zależności $k_w(c)$ przy: $x_I = 0,5- 0,75- 1,0 - 1,25- 1,5- 1,75 - 2,0$; $\alpha = 0^\circ$, $\gamma_m = 7357,5 \text{ [N/m}^3\text{]}$, $\mu = 0,563$, $k = 0,085$ (węgiel kamienny suchy)

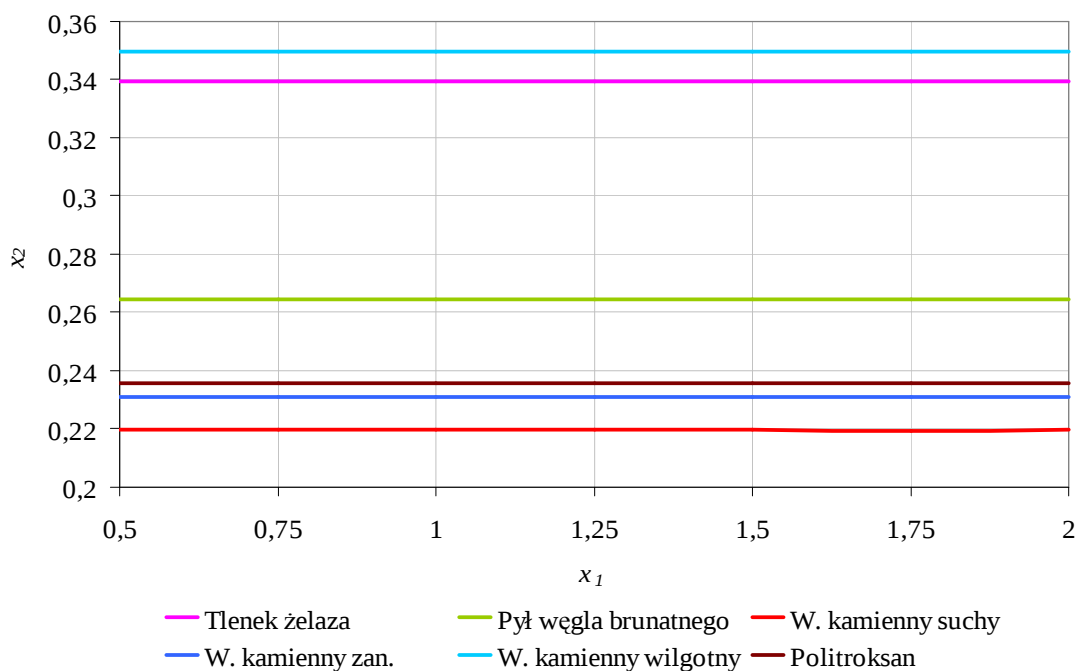


Rys. 10.3. Wykres 3D zależności $k_w(x_I, c)$ przy: $\gamma_m = 7457,5 \text{ [N/m}^3\text{]}$, $\mu = 0,517$, $k = 0,162$ (węgiel kamienny wilgotny)

Na podstawie zależności (10.13) dla znanego stosunku $x_1 = \frac{D_1}{h_1}$ można wyznaczyć wartość parametru $c = c_m$, przy której jednostkowe opory ruchu przenośnika są minimalne. Ze względu na złożoną postać zależności (10.13) trudno było na drodze analitycznej wyznaczyć wartość parametru c_m z zależności w postaci ogólnej, dlatego jego wartości zostały wyznaczone numerycznie; wykresy $k_w(c, x_1)$ przedstawiono na rysunkach 10.2 i 10.3. Wykorzystując zależności (10.3) i (10.12) otrzymujemy:

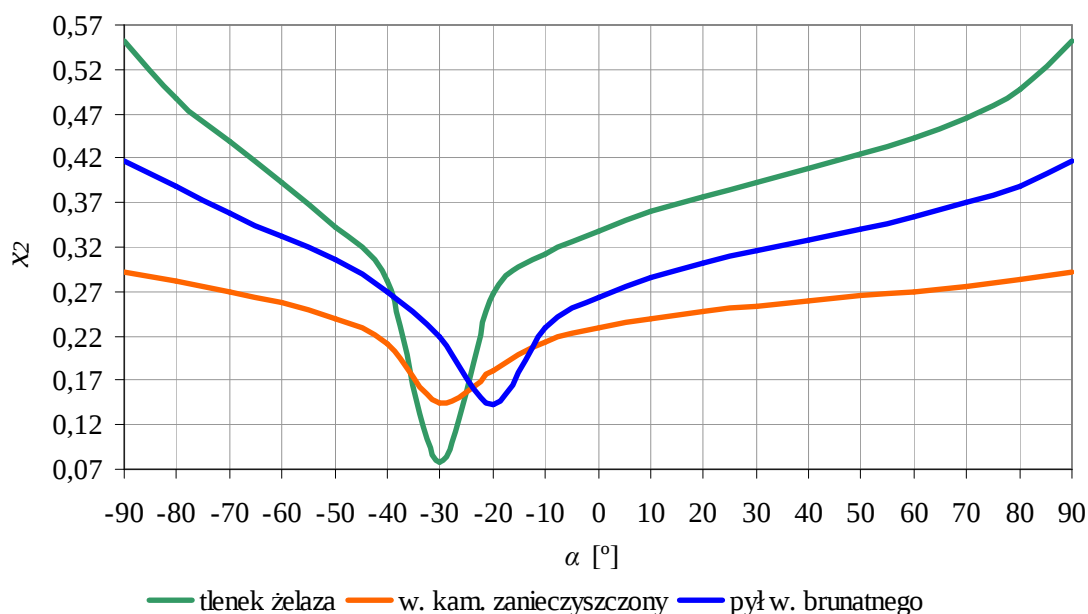
$$x_2 = \frac{D_2}{h_2} = \frac{D_1}{c_m} \cdot \frac{1}{c_m^2 \cdot h_1} = \frac{D_1}{c_m^3 \cdot h_1} = \frac{x_1}{c_m^3} \quad (10.14)$$

Z powyższej zależności wyznacza się iloraz $x_2 = \frac{D_2}{h_2}$, przy którym jednostkowy opór ruchu przenośnika jest minimalny. Według zaproponowanej metody dla danego materiału taki sam iloraz x_2 otrzymuje się niezależnie od wyjściowych wartości D_1 i h_1 zatem i od stosunku $\frac{D_1}{h_1} = x_1$ (rys. 10.4). Na rysunku 10.4 przedstawiono wykresy zależności parametru x_2 od wartości parametru x_1 dla różnych materiałów transportowanych (które uwzględniono w badaniach laboratoryjnych).



Rys. 10.4. Wykresy zależności parametru x_2 od parametru x_1 dla różnych materiałów przy $\alpha = 0^\circ$

Z rys. 10.4 widać, że dla danego materiału, niezależnie od przyjętej wartości parametru x_1 , otrzymuje się tylko jedną wartość parametru x_2 . Mając tak wyznaczony, dla konkretnego materiału, stosunek $x_2 = \frac{D_2}{h_2}$ (np. dla tlenku żelaza $x_2 = 0,339$) można wyznaczyć wartości parametrów h i D , przy których jednostkowe opory ruchu przenośnika są minimalne. Otrzymane powyżej wartości parametru x_2 (rys. 10.4) odnoszą się do przenośnika pracującego poziomo ($\alpha = 0^\circ$). Dla przenośnika pracującego przy innym nachyleniu trasy parametr x_2 będzie przyjmował inne wartości. Zostało to przykładowo przedstawione na rys. 10.5. Można zauważyć, że ze wzrostem wartości kąta α rośnie wartość parametru x_2 .

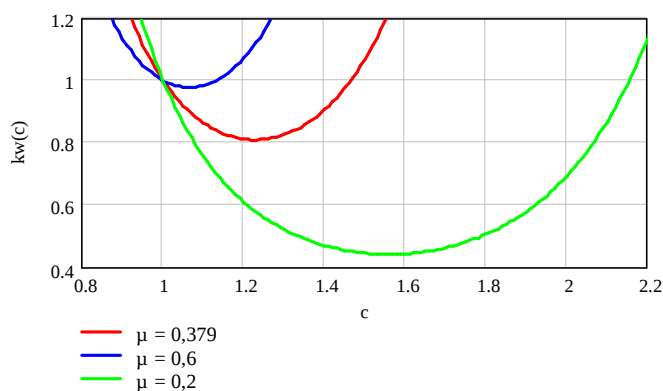


Rys. 10.5. Wykres zależności parametru x_2 od kąta nachylenia α przenośnika dla różnych materiałów transportowanych

Z rys. 10.5 widać, że wartość parametru x_2 dla każdego materiału ze zmianą wartości kąta α zmienia się inaczej. Przykładowo dla węgla kamiennego zanieczyszczonego parametr x_2 zmienia się w zakresie $0,23 \div 0,29$, a dla tlenku żelaza w zakresie $0,34 \div 0,55$. Z rys. 10.5, można dla określonej wartości kąta α nachylenia trasy przenośnika i rodzaju materiału transportowanego, dobrać wartość parametru x_2 , przy której opór jednostkowy przenośnika jest minimalny.

Jak wcześniej wspomniano, iloraz oporów jednostkowych (10.13), a co za tym idzie, wartość parametru c zależą także od właściwości materiału transportowanego (γ_m ,

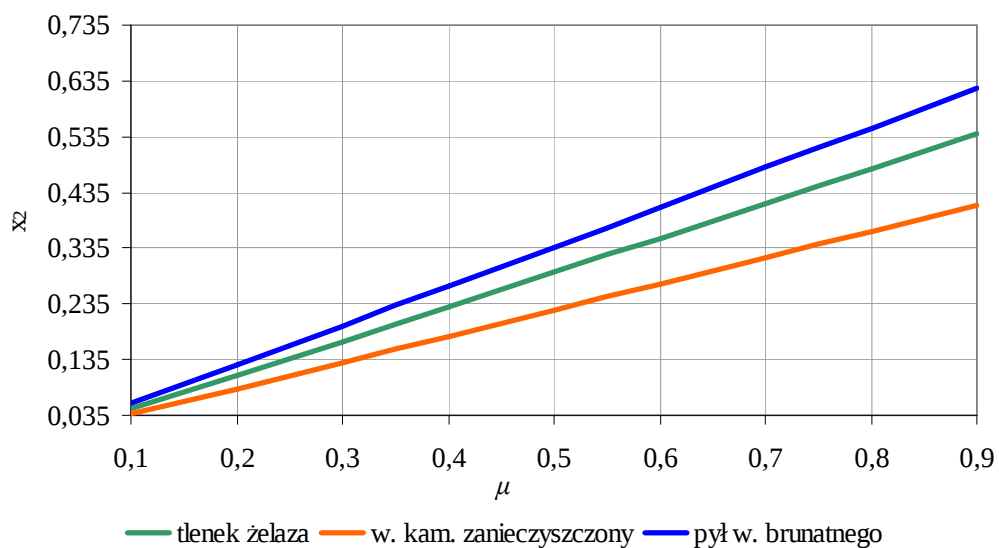
μ , k) oraz współczynnika tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l . Wykresy na rysunku 10.6 przedstawiają zmiany ilorazu oporów jednostkowych $k_W(c)$ przy różnych wartościach np. współczynnika tarcia μ dla pyłu węgla brunatnego ($\mu = 0,379$).



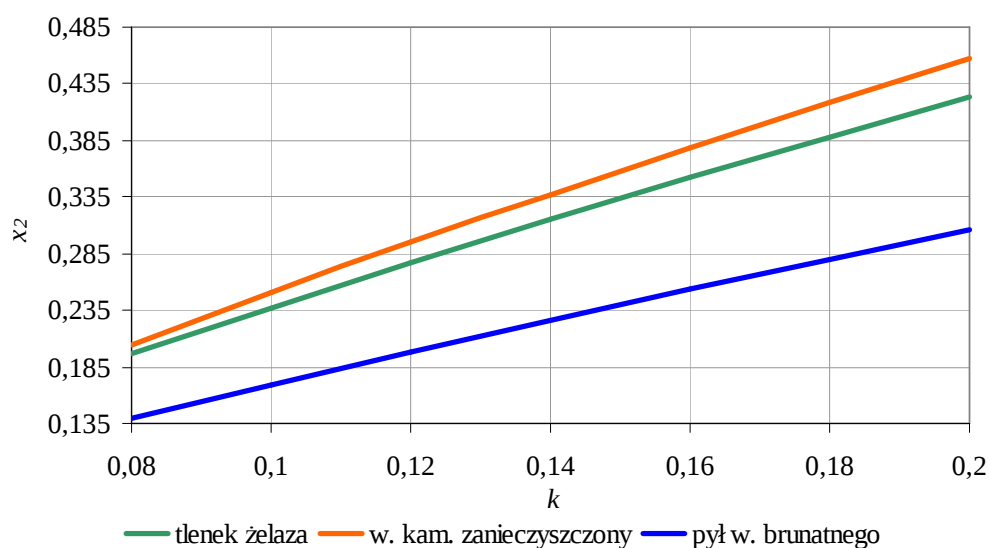
Rys. 10.6. Wykresy zależności $k_W(c)$ przy różnych wartościach współczynnika tarcia μ dla pyłu węgla brunatnego ($k = 0,168$) przy $\alpha = 0^\circ$

Przyjęcie współczynnika tarcia μ większego o 50% powoduje, że wartość parametru $k_W(c_m)$ zmniejsza się o $\sim 13\%$, natomiast przy współczynniku tarcia μ mniejszym o 50% - wzrasta ona o $\sim 27\%$. Podobny wpływ ma współczynnik k , przy zmianie którego wartość parametru $k_W(c_m)$ jest odpowiednio mniejsza o $\sim 11\%$, a w drugim przypadku większa o $\sim 21\%$. Znacznie mniejszy wpływ na wartość parametru $k_W(c_m)$ ma współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l . Zwiększenie μ_l o $\pm 50\%$ powoduje, że wartość parametru $k_W(c_m)$ zmienia się odpowiednio o $\pm 5\%$. Ze względu na dużą wrażliwość zależności (10.13) na zmiany właściwości materiału transportowanego charakteryzowanych takimi parametrami jak: współczynnik tarcia materiału o rynnę μ oraz współczynnik parcia bocznego k istotna jest znajomość ich miarodajnych wartości, które powinny być wyznaczone w badaniach doświadczalnych.

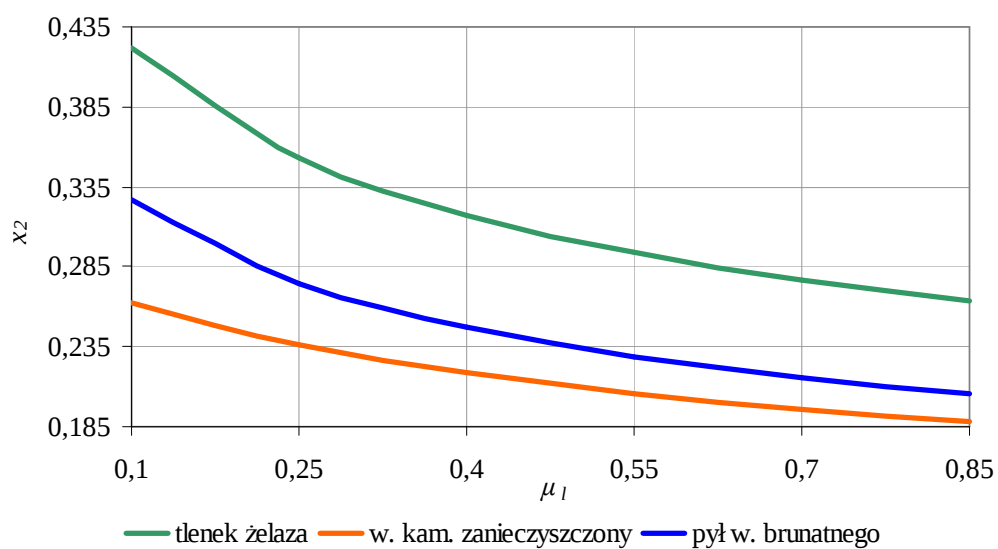
Na rysunkach 10.7 – 10.10 przedstawiono wykresy zależności parametru x_2 od parametrów: μ , k , μ_l , γ_m .



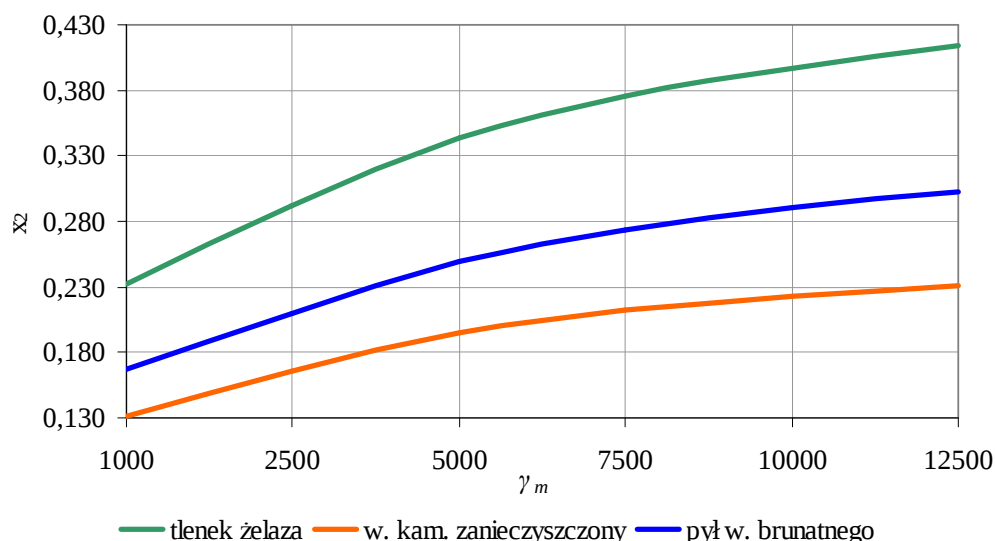
Rys. 10.7. Wykresy zależności $x_2(\mu)$ przy $\alpha = 0^\circ$



Rys. 10.8. Wykresy zależności $x_2(k)$ przy $\alpha = 0^\circ$



Rys. 10.9. Wykresy zależności $x_2(\mu_1)$ przy $\alpha = 0^\circ$

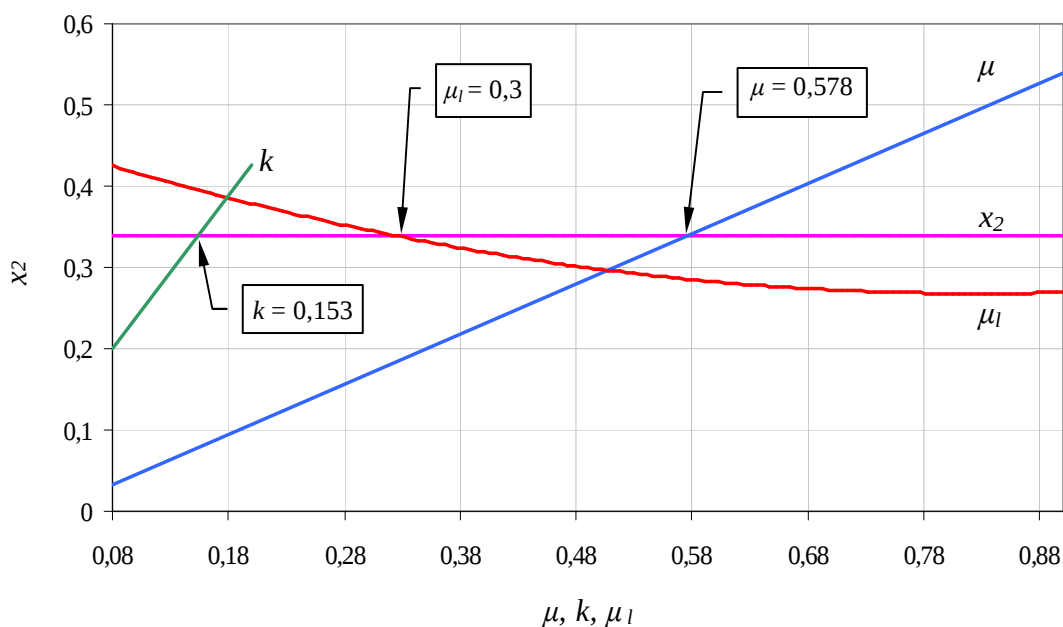


Rys. 10.10. Wykresy zależności $x_2(\gamma_m)$ przy $\alpha = 0^\circ$

Jak wynika z wykresów przedstawionych na rysunkach 10.7 – 10.10 parametry μ , k , μ_l , γ_m mają istotny wpływ na wartość parametru x_2 . Wpływ ten ma różny charakter. Wraz ze wzrostem wartości μ , k , i γ_m rosną wartości parametru x_2 . Oznacza to, że dla materiałów o większych współczynnikach tarcia, kątach tarcia wewnętrznego i ciężarach nasypowych mniejsze opory ruchu przenośnika uzyskuje się przy stosowaniu (np. przy danej średnicy rynny D) mniejszych odstępów zgrzebeł h . Natomiast ze wzrostem współczynnika tarcia zgrzebeł o rynnę - maleje wartość parametru x_2 , co wskazuje na to, że przy np. średnicy rynny D mniejsze opory ruchu uzyskuje się stosując odpowiednio większe odstępów zgrzebeł h . Na wartość parametru x_2 ma również wpływ rodzaj materiału transportowanego. Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 10.7 – 10.10 można zauważyć, że największe zmiany wartości parametru x_2 występują dla tlenku żelaza (materiał pylisty), a najmniejsze - dla rozdrobnionego węgla kamiennego (materiał uziarniony). Świadczy to o złożonym wpływie rodzaju transportowanego materiału na opory ruchu przenośnika, jak i zjawisk zachodzących podczas transportu materiału sypkiego przenośnikiem zgrzeblowym rurowym.

Na rysunku 10.11 przedstawiono wykresy zbiorcze zależności $x_2(\mu, k, \mu_l)$ dla tlenku żelaza przy $\alpha = 0^\circ$. Widać na nim, jaki wpływ na parametr x_2 mają poszczególne wielkości. Najistotniejszy wpływ ma rodzaj transportowanego materiału (μ, k), a w szczególności współczynnik k , którego zmiana w niewielkim zakresie powoduje duże zmiany wartości parametru x_2 . Niewielki wpływ ma współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l . To potwierdza, że najistotniejszy wpływ na opory ruchu mają właściwości

transportowanego materiału, a jego opory ruchu w całkowitych oporach ruchu przenośnika są dominujące. Na rysunku 10.11 zaznaczono linią poziomą wartość parametru $x_2 = 0,339$. Widać, że na przecięciu prostej poziomej z poszczególnymi przebiegami $x_2(\mu)$, $x_2(\mu_l)$, $x_2(k)$, otrzymuje się wartości parametrów odpowiadające tlenkowi żelaza. To potwierdza poprawność przyjętej metody.



Rys. 10.11. Wykres zależności $x_2(\mu, k, \mu_l)$ przy $\alpha = 0^\circ$

Wyniki przeprowadzonej analizy i obliczeń pozwalają sformułować następujące wnioski:

- dla zadanych warunków pracy przenośnika (rodzaju materiału transportowanego, kąta nachylenia trasy itd.) istnieje możliwość takiego doboru wartości parametrów h i D , przy których osiąga się minimalne jednostkowe opory ruchu przenośnika, co potwierdza słuszność przyjętej tezy pracy,
- racjonalne projektowanie przenośników zgrzebłowych rurowych, zwłaszcza o złożonej konfiguracji tras (odcinki proste i nachylone, łuki przestrzenne) wymaga wyznaczenia takich ich parametrów konstrukcyjno-ruchowych, które zapewnią nie tylko możliwie najniższe opory ich ruchu, ale także małe zużycie, podana w niniejszej pracy metoda czyni zadość tym wymogom,
- dla każdego materiału, niezależnie od przyjętych wartości parametru x_1 otrzymuje się tylko jedną wartość parametru $x_2 = D/h$, przy której uzyskuje się minimalne jednostkowe opory ruchu przenośnika,

- istotny wpływ na wartość parametru x_2 mają właściwości materiału transportowanego (np. μ , k , γ_m) oraz parametry przenośnika (μ_l , α),
- wpływ parametrów μ , k , γ_m , μ_l i α na x_2 jest złożony, a podana w pracy metoda pozwala go uwzględniać przy racjonalnym projektowaniu przenośników zgrzeblowych rurowych,
- w sposób istotny można wpływać także na zmniejszenie oporów ruchu przenośnika (i jego zużycie) przez zapewnienie możliwie niskich wartości współczynników tarcia w parach ciernych: zwłaszcza materiał transportowany - rynna oraz zgrzebło – rynna (np. dzięki zastosowaniu wykładzin rynien z odpowiednich tworzyw).

11. Metoda doboru podstawowych parametrów i obliczeń oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego

Podana w poprzednim rozdziale metoda pozwala dla zadanych parametrów pracy przenośnika zgrzeblowego rurowego wyznaczyć wartości parametrów h i D , przy których uzyskuje się minimalne opory ruchu. Dobór przenośnika zgrzeblowego rurowego do określonych warunków pracy należy rozpocząć od określenia jego zadań i ustalenia głównych parametrów wyjściowych.

Do najważniejszych parametrów wyjściowych należą właściwości materiału transportowanego, określone takimi parametrami jak: współczynnik tarcia materiału o rynnę μ , współczynnik k oraz ciężar nasypowy materiału γ_m . Ze względu na to, że te parametry mają zasadniczy wpływ na opory ruchu przenośnika, istotna jest znajomość rzeczywistych ich wartości. W następnej kolejności należy określić parametry ciągu ze zgrzeblami, są to: współczynnik tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l , ciężar właściwy materiału zgrzebeł γ_z i ciężar właściwy ciągu γ_c . Kolejnym krokiem jest przyjęcie proporcji pomiędzy średnicą ciągu d i grubością zgrzebla g_z , a średnicą wewnętrzną rynny (zgrzebla) D poprzez współczynniki: $\delta = \frac{d}{D}$ i $\delta_z = \frac{g_z}{D}$. Następnie należy określić parametry geometryczne trasy przenośnika, a więc: długość i nachylenie poszczególnych odcinków prostych (L, α) jak również konfigurację i promienie łuków.

Dysponując wyżej wymienionymi parametrami wyjściowymi, zgodnie z przyjętą w poprzednim rozdziale metodą, wykorzystując zależności (10.13) i (10.14) wyznacza się parametr $x_2 = \frac{D_2}{h_2}$. Należy podkreślić, że wyznaczoną wartość x_2 , wybrano spośród zbioru stosowanych przez producentów rynien o średnicach wewnętrznych D i odstępów między zgrzeblami h (określonego jako zbiór wartości parametru $x_1 = \frac{D_1}{h_1}$).

Aby obliczyć opory ruchu przenośnika, znając wyznaczony uprzednio stosunek $x_2 = \frac{D_2}{h_2}$, dla zadanej wydajności przenośnika Q jaką ma zapewnić, trzeba wyliczyć wartości parametrów D i h . Można przyjąć prędkość ciągu v i wtedy średnicę wewnętrzną rynny D wyznacza się z zależności:

$$D = \sqrt{\frac{900\pi \cdot d^2 + Q}{900\pi \cdot v}} \quad [\text{m}] \quad (10.1)$$

natomiast odstęp między zgrzeblami h :

$$h = \frac{D}{x_2} \quad [\text{m}] \quad (10.2)$$

Jeżeli natomiast przyjmie się odstęp między zgrzeblami h , to wtedy średnicę wewnętrzną rynny D wyznacza się z zależności:

$$D = x_2 \cdot h \quad [\text{m}] \quad (10.3)$$

a z kolei prędkość ciągną:

$$v = \frac{Q}{900\pi \cdot (D^2 - d^2)} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (10.4)$$

Po wyznaczeniu tych parametrów oblicza się opory ruchu dla zadanej konfiguracji trasy (proste, łuki, odcinki obciążone materiałem), a następnie moc potrzebną do napędu przenośnika.

Opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego, przy stałej jego prędkości (nominalnej), można podzielić na opory wywołane:

- siłami tarcia,
- składowymi sił ciężkości.

W proponowanej metodzie, ze względów obliczeniowych, opory ruchu podzielono na:

- opory przemieszczania materiału transportowanego,
- opory przemieszczania ciągną ze zgrzeblami,

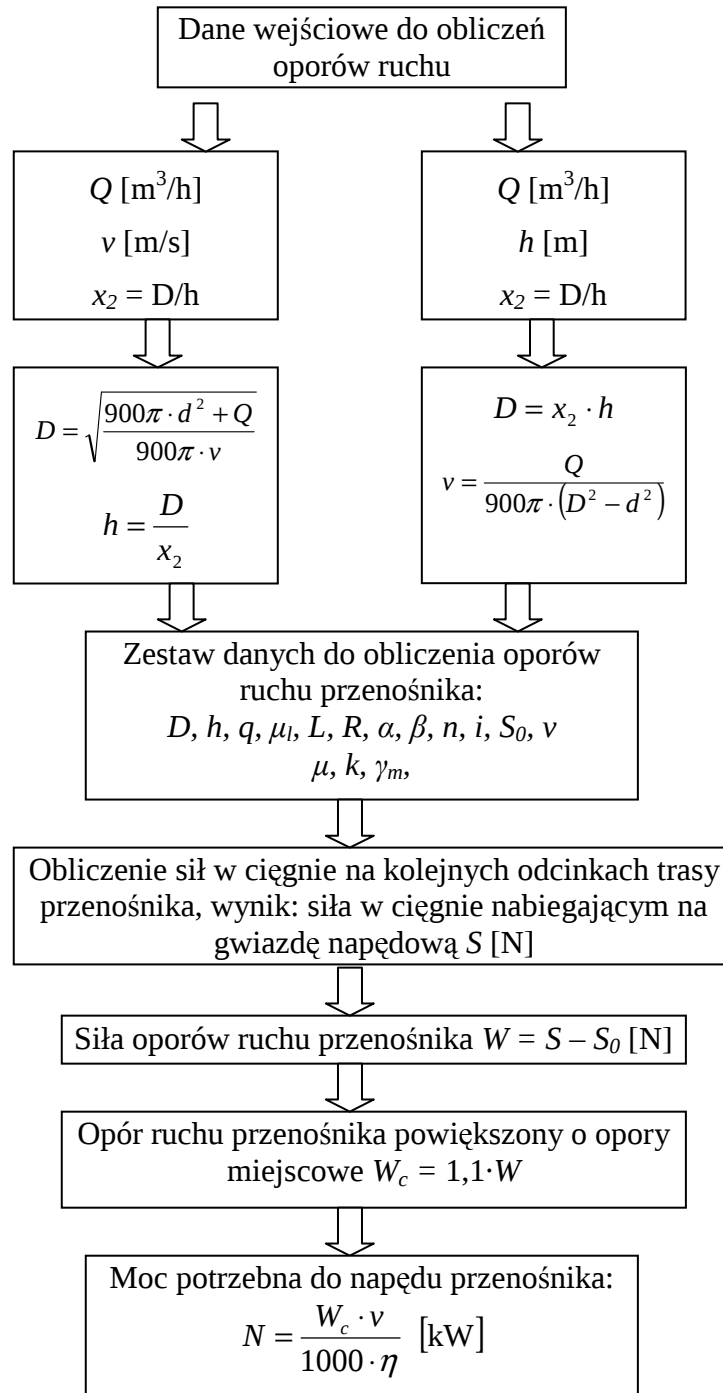
przy czym te pierwsze mają dominujący udział w całkowitych oporach ruchu przenośnika. Ze względu na to, że przenośnik zgrzeblowy rurowy może być załadowany materiałem transportowanym i rozładowywany w dowolnym punkcie trasy przenośnika, można wyróżnić opory ruchu:

- odcinków ładownych (obciążonych), wynikające z tarcia materiału i zgrzebeł o rynnę,
- odcinków próżnych (nieobciążonych), wynikające z tarcia zgrzebeł o rynnę.

Poszczególne odcinki przenośnika mogą mieć różną konfigurację trasy (proste, łuki), więc całkowite opory ruchu przenośnika będą sumą oporów ruchu przenośnika na poszczególnych odcinkach trasy. Opory ruchu przenośnika na odcinkach prostych ładownych o dowolnym nachyleniu wyznacza się z zależności (4.22), natomiast próżnych - z zależności (4.23). Opory ruchu na łukach w zależności od konfiguracji

i geometrii łuku wyznacza się: z zależności (4.40) – dla łuków poziomych, a dla odpowiedniego przypadku (rys. 4.7 i 4.8) z zależności (4.67, 4.72, 4.77 lub 4.82 oraz 4.85) – dla łuków pionowych.

W przypadku obliczania oporów na łukach (poziome i pionowe), nieobciążonych materiałem we wzorach na opory ruchu należy przyjąć $w = 0$.



Rys. 11.1. Schemat blokowy metody obliczania przenośnika zgrzeblowego rurowego

Zatem do obliczenia oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego należy uwzględnić dane wejściowe:

- rodzaj materiału transportowanego (μ, k, γ_m),
- średnicę wewnętrzną ryny D ,
- odstęp między zgrzeblami h ,
- parametry cięgna roboczego (μ_l, q),
- konfigurację trasy przenośnika: długości i nachylenia odcinków prostych trasy (L, α), geometria łuków (R, β),
- siłę napięcia wstępnego cięgna (S_0).

Całkowite opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego W_c wynoszą:

$$W_c = 1,1 \cdot W \quad (10.5)$$

a moc silnika potrzebna do napędu przenośnika:

$$N = \frac{W_c \cdot v}{1000 \cdot \eta} \text{ [kW]} \quad (10.6)$$

gdzie: η – sprawność układu napędowego.

W przypadku, gdy $W_c < 0$ moc ta wyniesie:

$$N = \frac{W_c \cdot v \cdot \eta}{1000} \text{ [kW]} \quad (10.7)$$

Wyniki metody racjonalnego doboru parametrów pracy przenośnika, zaproponowanej w rozdziale 9, można wykorzystać do obliczeń oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego. Parametr x_2 , łączący w sobie podstawowe parametry przenośnika, pozwala projektantowi na wariantowy, podczas projektowania przenośnika, dobór wartości parametrów h i D w zależności od danych wejściowych jakimi dysponuje oraz od ograniczeń konstrukcyjnych i technologicznych (podziałki gwiazd napędowych, konfiguracja trasy przenośnika), które musi uwzględnić.

12. Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy przeprowadzono analizę teoretyczną oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego, wynikiem której są ogólne zależności teoretyczne pozwalające wyznaczyć opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego na odcinkach prostych, łukach poziomych i pionowych. Otrzymane zależności pozwoliły na zbadanie wpływu wybranych parametrów na opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego. Zależności teoretyczne zostały zweryfikowane badaniami doświadczalnymi przeprowadzonymi na stanowisku badawczym oraz na przemysłowym przenośniku zgrzeblowym rurowym. Wyniki badań teoretycznych wykazały dość dobrą zgodność z wynikami badań doświadczalnych. Na tej podstawie opracowano metodę racjonalnego doboru wartości parametrów D i h przenośnika, przy których uzyskuje się minimalne jego opory ruchu. Zaproponowano także metodę obliczania przenośników zgrzeblowych rurowych.

Z przeprowadzonych badań teoretycznych i doświadczalnych oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego wynikają następujące wnioski:

a) dotyczące aspektów poznawczych:

1. dla zadanych warunków pracy przenośnika (rodzaju materiału transportowanego, kąta nachylenia trasy itd.) istnieje możliwość takiego doboru wartości parametrów D i h , przy których osiąga się minimalne opory jego ruchu, co pozwoli ograniczyć zużycie ściernych rynien i zgrzebeł; potwierdza to także słuszność przyjętej w pracy tezy,
2. opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego w sposób istotny zależą od jego parametrów konstrukcyjnych (D , h , μ_1 , α) i od własności transportowanego materiału (γ_m , k , μ),
3. odstęp h między zgrzeblami w przenośniku zgrzeblowym rurowym wpływa silniej (bo wykładniczo) na jego opory ruchu, niż w przenośniku konwencjonalnym (wpływ liniowy); podobny wpływ mają parametry: μ i k ,
4. opory ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego na łukach zależą w sposób istotny nie tylko od rodzaju transportowanego materiału, ale także od jego parametrów konstrukcyjnych (h , g_z , μ_b , S_0) oraz od promienia łuku (R), zwłaszcza w zakresie jego małych wartości ($R = 1 - 4$ m),

5. w przypadku przenośnika zapewniającego szczelność (pracującego z minimalnym luzem) opory ruchu na łukach są około trzykrotnie większe niż przy przenośniku pracującym ze znacznym luzem,

b) dotyczące aspektów praktycznych:

1. dla przenośnika prostoliniowego największe opory ruchu występują przy nachyleniu trasy przenośnika przy wartości kąta $\alpha = \sim 60 - 70^\circ$, co oznacza, że w praktyce powinno się unikać tego zakresu kąta nachyleń tras,
2. na zmniejszenie oporów ruchu przenośnika w sposób istotny można wpływać przez zapewnienie możliwie niskich wartości współczynników tarcia w parach ciernych: materiał transportowany - rynna oraz zgrzebło – rynna (na przykład dzięki zastosowaniu wykładzin rynien z nisko ciernych tworzyw),
3. ze względu na dominujący (70 - 80%) udział oporów przemieszczania materiału w całkowitych oporach ruchu przenośnika, wskazanym jest projektowanie przenośników do transportu określonego rodzaju materiału,
4. konstrukcja przenośnika zgrzeblowego rurowego zapewniająca minimalne opory pozwoli obniżyć nie tylko jego energochłonność, ale także zużycie ściernie zgrzebeł i rynien.

W dalszych badaniach teoretycznych i doświadczalnych, dotyczących podjętej problematyki, należałoby, zdaniem autora, uściślić wpływ na opory ruchu przenośników zgrzeblowych rurowych jeszcze innych parametrów charakteryzujących właściwości transportowanych materiałów.

Literatura

- [1] Antoniak J., Suchoń J.: *Górnice przenośniki zgrzeblowe*. Katowice Wydawnictwo „Śląsk” 1983,
- [2] Antos Cz., Czubak A., Jabłoński R., Jajko A., Siedlar A.: *Współczynniki oporów ruchu przenośników zgrzeblowych transportujących rudy miedzi*. Zagadnienia Tarcia, Zużycia i Smarowania. Zeszyt 7, 1970, s. 151-162,
- [3] Bednarczyk J.: *Podstawy metrologii technicznej. Laboratorium*. Wyd. 2 popr. i rozszerz. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH Kraków 2000,
- [4] Buckingham, E.: *On Physically Similar Systems*. Physical Reviews IV, 4, 1914,
- [5] Furmanik K.: *Problem of resistance to motion of loose materials layer into a pipe of pipe conveyors*. INSYCONT '02 ZEM nr 3(131)/2002, str. 7 – 19,
- [6] Furmanik K.: *Zagadnienie oporów ruchu przenośników zgrzeblowych rurowych*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn nr 4(132)/2002, str. 9 – 26,
- [7] Furmanik K., Kasza P.: *Badania doświadczalne oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego*. IV Międzynarodowa Konferencja Techniki Urabiania TUR 2005. Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH Kraków, Krynica 20-23.IX.2005,
- [8] Furmanik K., Kasza P.: *Influence of a selected parameters on resistances to motion of a scraper pipe conveyor*, 7th International Symposium INSYCONT 2006 Energy And Environmental Aspects Of Tribology, Cracow 2006,
- [9] Furmanik K., Kasza P.: *Zagadnienie oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego na łukach poziomych*. Transport Przemysłowy nr 3(29)/2007, str. 16 – 20,
- [10] Furmanik K., Kasza P.: *Zagadnienie oporów ruchu przenośnika zgrzeblowego rurowego na łukach pionowych*. Transport Przemysłowy (w druku),
- [11] Głazer Z.: *Mechanika gruntów*. Wyd. 2. Warszawa Wyd. Geologiczne 1985,
- [12] Gładysiewicz L.: *Przenośniki taśmowe. Teoria i obliczenia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2003, str. 154 – 158,
- [13] Goździcki M.: *Przenośniki cięgnowe do transportu pionowego materiałów sypkich*. Warszawa PWN 1990,
- [14] Goździcki M., Świątkiewicz H.: *Przenośniki*. Warszawa WNT 1979,

- [15] Hryniewicz M.: *Metoda doboru pras walcowych oraz opracowania założeń do ich modernizacji lub konstrukcji*. Rozprawy Monografie, Wydawnictwa AGH, Kraków 1997,
- [16] Jabłoński R., Kulinowski P., Krajewski J.: *Przenośniki zgrzeblowe-rurowe do transportu materiałów drobno uziarnionych*. IV Międzynarodowa Konferencja Nowoczesne przenośniki dla węglowego górnictwa podziemnego, Systemy Transportu Kopalnianego. Ustroń 21-22.VI.2001, str. 107 – 114,
- [17] Kasza P.: „*O badaniach niektórych właściwości wybranych materiałów transportowanych przenośnikami zgrzeblowymi rurowymi.*”, Materiały konferencyjne, V Międzynarodowa Konferencja Techniki Urabiania TUR 2007, Kraków Krynica, wrzesień 2007, str. 553 – 560,
- [18] Katterfeld A., Krause F.: *Functional analysis of tube chain conveyors*. Particle & Particle Systems Characterization, vol. 21, no. 4/2004, str. 348 – 355,
- [19] Krause F., Banse W.: *Krzywoliniowy przenośnik rurowy z ciągnem łańcuchowym*. Transport Przemysłowy nr 1(3)/2001, str. 25 – 30,
- [20] Krause F., Banse W., Schmolke S., Werner A.: *Theoretische und Experimentelle Untersuchungen an Stauscheibenförderern (Rohrkettenförderern)*, Schüttgut 2/1999, TransTech Publications, Germany,
- [21] Malczewski J.: *Mechanika materiałów sypkich*. Wyd. 2 popr. i rozszerz. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994,
- [22] Małkiewicz A., Stężala S.: *Wpływ stopnia napełnienia i prędkości przesuwu cięgna na energochłonność zadawania pasz przenośnikiem linowo – krążkowym*. XII Międzynarodowa Konferencja Problemy Intensyfikacji Produkcji Zwierzęcej z Uwzględnieniem Ochrony Środowiska i Standardów UE. Warszawa, wrzesień 2006,
- [23] Michalczyk J.: *Maszyny vibracyjne*. Warszawa WNT 1995,
- [24] Michalczyk J., Banaszewski T.: *Oddziaływanie dynamiczne maszyn stosowanych w przeróbce surowców mineralnych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH Kraków 2006,
- [25] Müller L.: *Teoria podobieństwa mechanicznego*. Warszawa WNT 1961,
- [26] Nowak Z.: *Ogólna metoda wyznaczania zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych*. Czasopismo techniczne z. 6, s. 1 – 8, 1969,
- [27] Solski P., Ziemia S.: *Zagadnienia tarcia suchego*. PWN 1965,

- [28] Dziedzic R., Gajek M.: *Badania oporów ruchu przenośników zgrzeblowych rurowych*. Praca magisterska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Kraków 2005,
- [29] Wielgus G.: *Dobór mocy, napędu i ciągu do przenośników rurowo-zgrzeblowych*. Praca magisterska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Kraków 1999,
- [30] SCHRAGE, Rohrkettensystem GmbH, Germany [Prospekt],
- [31] www.dynametconveyor.com
- [32] www.ferind.com.pl
- [33] www.schrage.de

Spis rysunków i tabel

Rysunki:

- Rys. 1.1. Schemat badanego przenośnika [18] – a) oraz uzyskane z badań wyniki pomiaru siły w łańcuchu przy transporcie pszenicy – b)
- Rys. 1.2. Przebieg siły w łańcuchu dla przenośnika próżnego i przy transporcie różnych materiałów; prędkość ciągu $v = 0,3 \text{ [m/s]}$ [18]
- Rys. 3.1. Budowa przenośnika zgrzeblowego rurowego
- Rys. 3.2. Rodzaje ciągów stosowanych przez firmy: a) – Ferind, b) – Schrage, c) – Dynamet
- Rys. 3.3. Widok ciągu ze zgrzeblami współpracującego z gwiazdą napędową
- Rys. 3.4. Widok: a) stacji zwrotnej z urządzeniem napinającym, b) stacji kierunkowej
- Rys. 3.5. Zastosowanie przenośników zgrzeblowych rurowych do opróżniania elektrofiltrów
- Rys. 3.6. Przykładowe konfiguracje tras przenośników zgrzeblowych rurowych
- Rys. 4.1. Schemat sił działających na warstwę materiału przemieszczanej pionowo w górę
- Rys. 4.2. Schemat sił działających na warstwę materiału przemieszczanej w poziomej rurowej rynnie

- Rys.4.3. Schemat sił działających na warstwę materiału przemieszczanej „w górę” w rurze nachylonej
- Rys. 4.4. Układ sił działających na zgrzebło na łuku w przenośniku pracującym: a) ze znacznym luzem, b) z minimalnym luzem
- Rys. 4.5. Schemat sił do wyznaczenia oporów ruchu przenośnika na łuku poziomym
- Rys. 4.6. Układ sił działających na zgrzebło „1” w łuku poziomym, przy minimalnym luzie między zgrzebłem a rynną
- Rys. 4.7. Schematy sił dla łuku pionowego: a) wypukłego i b) wklęsłego
- Rys. 4.8. Schematy sił dla łuku pionowego: a) wklęsłego i b) wypukłego
- Rys. 4.9. Schematy do wyznaczenia oporów ruchu na łuku pionowym wypukłym przy ruchu ciągnia „w górę”
- Rys. 4.10. Schematy sił do wyznaczenia oporów ruchu na łuku pionowym wklęsłym przy ruchu ciągnia „w dół”
- Rys. 4.11. Schematy sił do wyznaczenia oporów ruchu na łuku pionowym wklęsłym przy ruchu ciągnia „w górę”
- Rys. 4.12. Schematy sił do wyznaczenia oporów ruchu na łuku pionowym wypukłym przy ruchu ciągnia „w dół”
- Rys. 4.13. Schemat sił do wyznaczenia oporów ruchu oporów na łuku pionowym:
a) wypukłym i b) wklęsłym
- Rys. 4.14. Schemat sił do wyznaczenia oporów ruchu oporów na łuku pionowym:
a) wklęsłym i b) wypukłym
- Rys. 5.1. Wpływ grubości h warstwy materiału na jej opory ruchu przy: $\alpha = 0^\circ$; $k = 0,16$; $\gamma_m = 7\ 600\ \text{N/m}^3$ (suchy popiół); $\mu = 0,45$; $D = 0,15\ \text{m}$, $d = 0,015\ \text{m}$, $w_r(h)$ - w przenośniku zgrzebłowym rurowym; $w_k(h)$ - w przenośniku konwencjonalnym
- Rys. 5.2. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy odstępach zgrzebeł $h = 0,15 - 0,3 - 0,45\ [\text{m}]$
- Rys. 5.3. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy średnicach rynny $D = 0,1 - 0,15 - 0,2\ [\text{m}]$
- Rys. 5.4. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy współczynnikach tarcia $\mu_l = 0,2 - 0,5 - 0,7$
- Rys. 5.5. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy współczynnikach tarcia $\mu = 0,2 - 0,5 - 0,7$
- Rys. 5.6. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy współczynnikach $k = 0,05 - 0,125 - 0,2$
- Rys. 5.7. Wykres zależności $w_j(\alpha)$ przy dla ciężarach nasypowych $\gamma_m = 2000 - 7000 - 12000\ [\text{N/m}^3]$

- Rys. 5.8. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika ze znacznym luzem
- Rys. 5.9. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika z minimalnym luzem
- Rys. 5.10. Wykres zależności $W(h)$ na łuku poziomym dla przenośnika ze znacznym luzem
- Rys. 5.11. Wykres zależności $W(h)$ na łuku poziomym dla przenośnika z minimalnym luzem
- Rys. 5.13. Wykres zależności $W(D)$ na łuku poziomym dla przenośnika z minimalnym luzem
- Rys. 5.12. Wykres zależności $W(D)$ na łuku poziomym dla przenośnika ze znacznym luzem
- Rys. 5.14. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika ze znacznym luzem przy $\mu_l = 0,2 - 0,5 - 0,7$
- Rys. 5.15. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika z minimalnym przy $\mu_l = 0,2 - 0,5$
- Rys. 5.16. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika ze znacznym luzem przy $\mu = 0,2 - 0,5 - 0,7$
- Rys. 5.17. Wykres zależności $W(R)$ na łuku poziomym dla przenośnika z minimalnym luzem przy $\mu = 0,2 - 0,5 - 0,7$
- Rys. 5.18. Wykres zależności oporu $W(gz)$
- Rys. 5.19. Wykres zależności oporu $W(S_0)$ przy pominiętych oporach przemieszczania materiału
- Rys. 5.20. Wykres zależności $W(R)$ dla przenośnika ze znacznym luzem
- Rys. 5.21. Wykres zależności $W(R)$ dla przenośnika z minimalnym luzem
- Rys. 5.22. Wykres zależności $W(h)$ dla przenośnika ze znacznym luzem
- Rys. 5.23. Wykres zależności $W(h)$ dla przenośnika z minimalnym luzem
- Rys. 5.24. Wykres zależności $W(R)$ dla przenośnika ze znacznym luzem dla łuku wypukłego przy ruchu „w górę” przy różnych współczynnikach tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l
- Rys. 5.25. Wykres zależności $W(R)$ dla przenośnika ze znacznym luzem dla łuku wypukłego przy ruchu „w górę” przy różnych współczynnikach tarcia materiału o rynnę μ

- Rys. 5.26. Wykres porównawczy zależności $W(R)$ dla przenośnika ze znacznym luzem dla łuków pionowych i poziomego (linia przerywana)
- Rys. 7.1. Aparat typu AB do bezpośredniego ścinania próbki
- Rys. 7.2. Schemat naczynia pomiarowego (celka Jenikego)
- Rys. 7.3. Widok naczynia pomiarowego
- Rys. 7.4. Schemat naczynia pomiarowego aparatu AB przy wyznaczaniu: a) kąta tarcia wewnętrznego, b) współczynnika tarcia zewnętrznego
- Rys. 7.5. Wykresy z próby bezpośredniego ścinania: 1 – węgiel kam. zanieczyszczony, 2 – węgiel kam. suchy, 3 – politroksan, 4 – pył węgla brunatnego.
- Rys. 7.6. Wykresy z próby bezpośredniego ścinania dla węgla kamiennego suchego i wilgotnego przy wyznaczaniu współczynnika tarcia zewnętrznego μ .
- Rys. 7.7. Schemat stanowiska badawczego
- Rys. 7.8. Widok stanowiska badawczego z aparaturą pomiarowo-rejestrującą
- Rys. 7.9. Przykładowy zapis przebiegu siły oporu w i prędkości v w czasie
- Rys. 7.10. Wyniki pomiarów uzyskane dla tlenku żelaza
- Rys. 7.11. Wyniki pomiarów uzyskane dla pyłu węgla brunatnego
- Rys. 8.1. Widok przenośnika zgrzeblowego rurowego f-my *Ferind* Rys. 8.2. Schemat układu pomiarowego
- Rys. 8.3. Widok urządzenia pomiarowego RPM wraz komputerem pomiarowym
- Rys. 8.4. Zapis poboru mocy czynnej przez przenośnik nieobciążony przy różnych siłach naciągu wstępnego ciągu roboczego
- Rys. 8.5. Wykres zależności $W(S)$ uzyskany z pomiarów
- Rys. 8.6. Zapis poboru mocy czynnej przez przenośnik obciążony węglem suchym
- Rys. 8.7. Zapis poboru mocy czynnej przez przenośnik obciążony węglem wilgotnym
- Rys. 8.8. Schemat przenośnika zgrzeblowego rurowego f-my *Ferind*
- Rys. 8.9. Rozkład sił w ciągu przenośnika
- Rys. 8.10. Wykres zależności $N(\mu_l)$
- Rys. 9.1. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy różnych odstępach zgrzebeł dla tlenku żelaza
- Rys. 9.2 Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 1D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98688$)
- Rys. 9.3 Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 2D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98543$)

- Rys. 9.4. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 3D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98686$)
- Rys. 9.5. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy różnych odstępach zgrzebeł dla pyłu węgla brunatnego
- Rys. 9.6. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 1D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98553$)
- Rys. 9.7. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 2D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98187$)
- Rys. 9.8. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 3D$ (współczynnik korelacji $R = 0,98723$)
- Rys. 9.9. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 1D$ (współczynnik korelacji $R = 0,97034$)
- Rys. 9.10. Wykresy zależności $f = w(\alpha)$ sporządzone w oparciu o badania teoretyczne i doświadczalne przy $h = 2D$ (współczynnik korelacji $R = 0,94545$)
- Rys. 10.1. Wykresy zależności $k_w(c)$ przy: $h_1 = 0,15$ [m], $D_1 = 0,08; 0,1; 0,125; 0,16; 0,2; 0,22; 0,25$ [m], $\mu_l = 0,3$, $\alpha = 0^\circ$, $\gamma_m = 4707,2$ [N/m³], $\mu = 0,578$, $k = 0,153$ (tlenek żelaza)
- Rys. 10.2. Wykres zależności $k_w(c)$ przy: $x_1 = 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2$, $\alpha = 0^\circ$, $\gamma_m = 7357,5$ [N/m³], $\mu = 0,563$, $k = 0,085$ (węgiel kamienny suchy)
- Rys. 10.3. Wykres 3D zależności $k_w(x_1, c)$ przy: $\gamma_m = 7457,5$ [N/m³], $\mu = 0,517$, $k = 0,162$ (węgiel kamienny wilgotny)
- Rys. 10.4. Wykresy zależności parametru x_2 od parametru x_1 dla różnych materiałów przy $\alpha = 0^\circ$
- Rys. 10.5. Wykres zależności parametru x_2 od kąta nachylenia α przenośnika dla różnych materiałów
- Rys. 10.6. Wykresy zależności $k_w(c)$ przy różnych wartościach współczynnika tarcia μ dla pyłu węgla brunatnego ($k = 0,168$) przy $\alpha = 0^\circ$
- Rys. 10.7. Wykresy zależności $x_2(\mu)$ przy $\alpha = 0^\circ$
- Rys. 10.8. Wykresy zależności $x_2(k)$ przy $\alpha = 0^\circ$
- Rys. 10.9. Wykresy zależności $x_2(\mu_l)$ przy $\alpha = 0^\circ$
- Rys. 10.10. Wykresy zależności $x_2(\gamma_m)$ przy $\alpha = 0^\circ$ Rys. 10.11. Wykres zależności $x_2(\mu, k, \mu_l)$ przy $\alpha = 0^\circ$
- Rys. 11.1.1. Schemat metody obliczania przenośnika zgrzeblowego rurowego

Tabele:

Tab. 6.1 Zmienne uwzględnione w analizie

Tab. 6.2. Wyniki rozwiązań

Tab.7.1. Wyznaczone w pomiarach wartości siły ścinającej próbkę

Tab.7.2. Zestawienie wyników uzyskanych w badaniach pomocniczych

Tab. 7.3. Przyjęte w badaniach wartości wielkości zmiennych

Tab. 8.1. Wyniki pomiarów i obliczeń dla przenośnika nieobciążonego

Tab. 8.2. Wyniki pomiarów i obliczeń dla przenośnika obciążonego węglem suchym

Tab. 8.3. Wyniki pomiarów i obliczeń dla przenośnika obciążonego węglem wilgotnym

Tab. 8.4. Wyniki pomiarów i obliczeń dla przenośnika obciążonego przenośnika obciążonego

Tab. 8.5. Rzeczywiste wartości współczynnika tarcia zgrzebeł o rynnę μ_l

Tab 9.1. Zestawienie wyników badań teoretycznych i doświadczalnych dla tlenku żelaza

Tab 9.2. Różnice między wynikami teoretycznymi a doświadczalnymi

Tab. 9.3. Zestawienie wyników badań teoretycznych i doświadczalnych dla pyłu węgla brunatnego

Tab. 9.4. Różnice między wynikami teoretycznymi a doświadczalnymi