

Kazimierz Lejda¹, Sylwia Siedlecka²
Politechnika Rzeszowska

Analiza zapotrzebowania na pracę przewozową w procesach transportowych

Wstęp

Transport samochodowy to najpopularniejszy środek przemieszczania ludzi i towarów w dzisiejszym świecie. Intensywny rozwój transportu drogowego rozpoczął się w pod koniec XX wieku. Wykorzystywanym środkiem transportu jest pojazd drogowy, którym przewozimy pasażerów i towary. Jest to usługa transportowa świadczona przez przewoźników drogowych. Główną zaletą tego rodzaju transportu jest to, że mamy możliwość dowiezienia pasażerów lub ładunków bezpośrednio do miejsca przeznaczenia. Jednakże minusem tej gałęzi transportu jest energochłonność i szkodliwy wpływ na środowisko.

Pojazd samochodowy jest trudnym obiektem technicznym, który ma określone cechy fizyczne i geometryczne. Ruch samochodu jest odpowiedzią na działanie kierowcy, jednak występują poważne zakłócenia i ograniczenia tego ruchu. Ograniczenia te wynikają z faktu, że ruch samochodu jest podporządkowany prawom fizyki, a w szczególności dynamiki. Zrozumienie tych zasad i praw jest niezbędne do wyjaśnienia procesów zachodzących podczas ruchu samochodu, a także wyjaśnienie niektórych sytuacji krytycznych, powodujących np. wywrócenie pojazdu.

Ruch samochodu można potraktować także jako pewien proces energetyczny, w którym energia jest przekazywana od silnika do kół napędowych. Znaczny wpływ na ruch samochodu mają oddziaływania zewnętrzne, np. działanie wiatru bocznego oraz oddziaływanie innych uczestników ruchu drogowego i nierówności drogi.

Opory ruchu samochodu

W celu właściwego wykonywania zadań przewozowych pojazd powinien charakteryzować się odpowiednimi właściwościami dynamicznymi, które określają największe osiągi samochodu (tzw. górne graniczne). O parametrach ruchu decyduje układ i wartość sił zewnętrznych działających na pojazd. W przypadku ruchu prostoliniowego takimi siłami są opory ruchu. Do oporów ruchu zalicza się te siły zewnętrzne, które przebiegając równoległe do kierunku ruchu pojazdu mają przeciwny zwrot, a mianowicie:

- opór toczenia (działający na linii styku koła z nawierzchnią),
- opór powietrza (działający na aerodynamiczny środek naporu, którego wysokość nad jezdnią zależy od ukształtowania bryły samochodu),
- opór wzniesienia (przypisany do środka ciężkości samochodu).

Opory toczenia i powietrza występują zawsze a ich suma stanowi tzw. opór podstawowy F_{tp} , natomiast opory wzniesienia występują okresowo. Opór wzniesienia występuje tylko podczas jazdy pod górę i stanowi go równoległa do nawierzchni składowa siła ciężkości. W przypadku zjeżdżania z pochyłości składowa ta, przyjmując zwrot zgodny z kierunkiem jazdy, staje się siłą wymuszającą ruch samochodu.

Opór toczenia

Opór toczenia jest sumą oporów toczenia wszystkich kół, również w samochodach ciężarowych o zróżnicowanych wymiarach ogumienia kół osi przedniej i tylnej, gdzie przyjmuje się jednakową dla wszystkich

¹ prof. dr hab. inż. Kazimierz Lejda – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Silników Spalinowych i Transportu; 35-959 Rzeszów; Al. Powstańców Warszawy 8

² mgr inż. Sylwia Siedlecka – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Silników Spalinowych i Transportu; 35-959 Rzeszów; Al. Powstańców Warszawy 8

kół wartość współczynnika oporu toczenia. Opór toczenia F_t w tym przypadku jest iloczynem prostopadłej do nawierzchni składowej siły ciężkości i współczynnika oporu toczenia [3]:

$$F_t = G \cdot f_t \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

a dla drogi poziomej:

$$F_t = G \cdot f_t \quad (2)$$

gdzie:

- G - siła ciężkości pojazdu [N],
- f_t - współczynnik oporu toczenia [N],
- α - kąt wzdłużnego pochylenia drogi.

Na współczynnik oporu toczenia wpływa wiele czynników i zależy on w szczególności od: ciśnienia w ogumieniu, rodzaju i konstrukcji opon, prędkości samochodu, rodzaju, stanu i jakości nawierzchni. Dokładną wartość f_t można jedynie wyznaczyć metodami doświadczalnymi na podstawie badań stanowiskowych i drogowych. Metoda drogowa polega na holowaniu specjalnej przyczepy dynamometrycznej z różną prędkością i z jednoczesnym pomiarem siły uciążu. Na wartość siły F_t składa się [1]:

- właściwy opór toczenia,
- opór wywołany tarciem elementów układu zawieszenia i tłumieniem w amortyzatorach,
- opór zbieżności kół kierowanych.

Na twardej nawierzchni, niezależnie od rodzaju opon i ciśnienia w ogumieniu, współczynnik ten zwiększa się z prędkością samochodu, począwszy od pewnej wartości początkowej bliskiej zeru. Przyrost jest stosunkowo niewielki do prędkości 80÷100km/h, ale w miarę dalszego zwiększania prędkości wartość współczynnika znacząco rośnie nieliniowo. Wartości współczynnika oporu toczenia dla różnych nawierzchni podano w tabeli 1. Wyznaczenie wartości współczynnika oporu toczenia f_t przedstawia następująca zależność:

$$f_t = f_0 + \Delta f \quad (3)$$

gdzie:

- f_0 - wartość początkowa współczynnika przy prędkości bliskiej zeru,
- Δf - przyrost wartości współczynnika ponad wartość początkową.

Tabela 1. Współczynniki oporów toczenia dla różnych nawierzchni [1]

Rodzaj nawierzchni	Samochód osobowy	Samochód ciężarowy
Gładki asfalt	0,012	0,010
Gładki beton	0,014	0,012
Szorstki beton	0,014	0,013
Kostka granitowa b.dobra	0,016	0,014
Kostka kamienna średnia	0,020	0,018
Kostka kamienna w złym stanie	0,033	0,030
Bruk z kamienia polnego	0,040	0,035
Średnia droga polna	0,050-0,140	
Droga piaszczysta wilgotna	0,080-0,150	
Suchy piasek	0,150-0,300	

Opór powietrza

Ze względu na ruch samochodu w ośrodku gazowym jakim jest otaczające powietrze, znajduje się on pod wpływem siły aerodynamicznej. Siła ta rozkłada się na 3 składowe: wzdłużną, równoległą do osi symetrii samochodu ze zwrotem przeciwnym do kierunku ruchu (czyli opór powietrza), poprzeczną, równoległą do płaszczyzny jezdni (czyli napór boczny) oraz prostopadłą do płaszczyzny jezdni (czyli siłę nośną). Siła nośna powoduje zmianę obciążenia normalnego osi, składowa poprzeczna natomiast występuje kiedy kierunek wiatru nie jest równoległy do kierunku ruchu samochodu. Opór powietrza F_p wyznacza się dla ruchu samochodu przy braku wiatru z następującej zależności [3]:

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_x \cdot A \quad (4)$$

gdzie:

- A - powierzchnia czołowa samochodu [m²],
- C_x - współczynnik kształtu nadwozia (bezwymiarowy),
- v - prędkość pojazdu [m/s],
- ρ - gęstość powietrza [kg/m³].

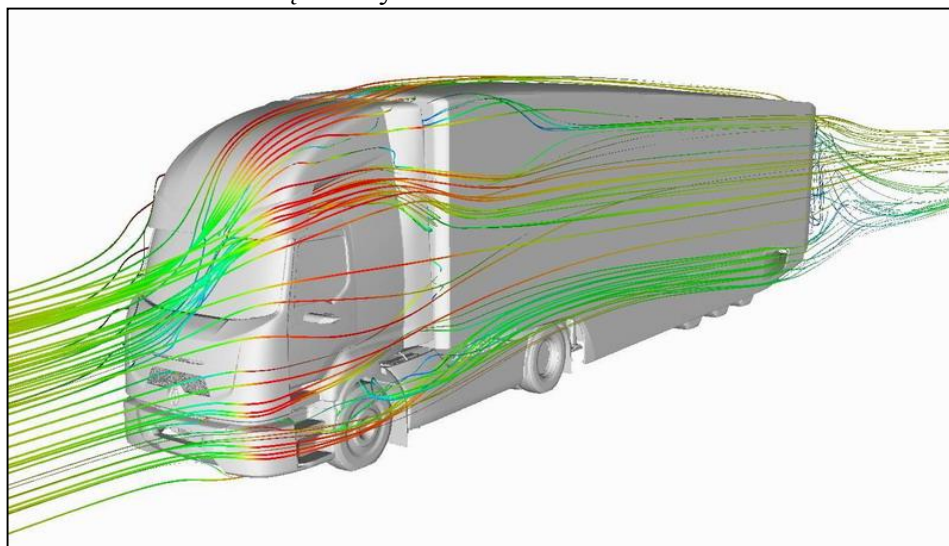
Współczynnik kształtu zależy od różnych czynników i wyznacza się go na podstawie badań wykonywanych w tunelu aerodynamicznym. Gęstość powietrza przyjmuje się dla warunków normalnych (ciśnienie atmosferyczne 0,1 MPa, temperatura 273 K), wówczas

ρ = 1,293 kg/m³, a wtedy postać równania jest następująca:

$$F_p = 0,047 \cdot C_x \cdot A \cdot v^2 \quad (5)$$

Powierzchnia czołowa A jest powierzchnią rzutu obrysu samochodu na płaszczyznę pionową prostopadłą do wzdłużnej osi symetrii i jej wartość wyznacza się na podstawie rysunków konstrukcyjnych albo w sposób przybliżony (iloczyn wysokości H i rozstawu kół B):

- A = 0,9 · H · B dla samochodów osobowych,
- A = 1,1 · H · B dla samochodów ciężarowych



Rys. 1. Przepływ powietrza wokół pojazdu ciężarowego (kolorem czerwonym zaznaczono miejsca o największych oporach aerodynamicznych); źródło: [5]

Jeśli omawiamy skutki występowania zjawisk aerodynamicznych, wówczas przyjmuje się, że samochód spoczywa nieruchomo w strudze powietrza przemieszczającego się z prędkością jazdy, tak samo jak przy badaniach tunelowych. Na rys. 1 pokazano strugi powietrza natrafiające na bryłę samochodu, które zostają odchylone i równocześnie zagęszczone. Lokalne zmiany ciśnienia powietrza powstają w następstwie różnego zagęszczenia strug i ich różnej prędkości na powierzchni bryły samochodu. Na powierzchniach czołowych samochodu powstają nadciśnienia, które powodują zmiany kierunku strugi również w tych miejscach, gdzie zmienia się prędkość przepływu powietrza. Natomiast podciśnienie tworzy się w miejscach zagęszczenia strug oraz gdzie ich prędkość jest większa. Podciśnienie powstaje też w tylnej części samochodu, gdzie istnieje obszar znacznych zawirowań. Krótszą drogę do przebycia mają strugi przepływające wzdłuż spodu samochodu, dłuższą te, które opływają górną część nadwozia. Dlatego muszą poruszać się z odpowiednio większą prędkością, czego skutkiem jest powstanie różnicy ciśnień między spodem a górną powierzchnią nadwozia, co powoduje powstawanie siły nośnej. W stosunku do bocznej bryły pojazdu siła nośna działa w płaszczyźnie pionowej, przechodzącej przez jego wzdłużną oś symetrii, lecz jej wektor nie przechodzi przez środek ciężkości pojazdu, co powoduje zróżnicowanie obciążenia normalnego osi przedniej i tylnej. Wartość siły nośnej zwiększa się z kwadratem prędkości samochodu. W samochodach osobowych osiągających duże prędkości wartość siły nośnej osiąga ok. 15-20 % siły ciężkości, co powoduje

konieczność stosowania dodatkowych stateczników, czyli spojlerów w celu skorygowania wartości obciążenia normalnego osi. Natomiast w przypadku małych prędkości siła nośna przyjmuje wartość nieprzekraczającą 8-10 % siły ciężkości [3].

Opór wzniesienia

Opór wzniesienia występuje podczas jazdy samochodu pod górę. Stanowi ją składowa siły ciężkości pojazdu, styczna do nawierzchni drogi (rys.2), wyznaczona z równania:

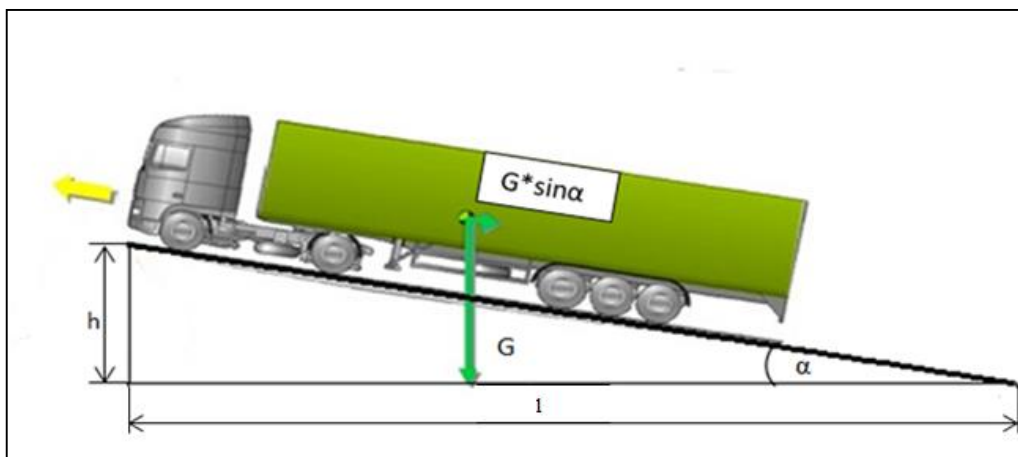
$$F_w = G \cdot \sin\alpha \quad (6)$$

Sinus kąta wzniesienia α jest stosunkiem wysokości wzniesienia do długości drogi. Ponieważ dla małych kątów typowych dla podłużnego pochylenia drogi $\sin\alpha \approx \text{tg}\alpha$, równanie przyjmuje postać:

$$F_w = p \cdot G \quad (7)$$

gdzie:

- G – siła ciężkości samochodu [N],
- $p=h/l$ – stosunek długości boków trójkąta.



Rys. 2. Składowe siły ciężkości – opór wzniesienia; źródło: [6]

Wielkość p stosowana jest w drogownictwie do oznaczenia stromości wzniesienia i spadków. Np. dla kąta $\alpha=17$ wielkość $p=0,3$; jest to wartość przekraczająca stosowane kąty pochylenia dróg (największe wzniesienia dróg przeważnie nie przekraczają wartości $p=0,26$).

Gdy samochód zjeżdża z pochyłości składowa siły ciężkości przyjmuje zwrot zgodny z kierunkiem ruchu i przestaje być oporem wzniesienia. W równaniach bilansu sił wzdłużnych wielkość tę oznacza się także symbolem F_w , tylko ze znakiem ujemnym [3].

Dobór środka transportu do konkretnego zadania przewozowego

Różnorodność zadań przewozowych w transporcie stawia aktualnie specjalne wymagania odnośnie konstrukcji, wyposażenia i funkcjonalności pojazdów użytkowych. O doborze właściwego środka transportu powinien decydować rachunek efektywności ekonomicznej przewozu.

W niniejszej publikacji podano przykład obliczeniowy dla zadania przewozowego celem wyznaczenia oporów ruchu oraz określenia zapotrzebowania na moc w różnych warunkach przy przewozie 12 ton piasku na trasie Rzeszów–Katowice, uwzględniając największe wzniesienie w Ropczycach o nachyleniu 8 %, przy prędkości jazdy 50km/h. Do obliczeń przyjęto samochód ciężarowy MAN TGA 26.400-6x6, którego dane techniczne podane są w tabeli 2.

Tabela. 2. Dane techniczne pojazdu ciężarowego

Samochód ciężarowy MAN TGA 26.400-6x6	
Dopuszczalna masa całkowita pojazdu d_{mc}	26000 kg
Masa całkowita własna pojazdu m_c	12700 kg
Dopuszczalna ładowność pojazdu d_l	13300 kg
Wysokość pojazdu H	3,25 m
Szerokość pojazdu B	2,5 m
Współczynnik oporu powietrza pojazdu C_x	0,8
Sprawność mechaniczna η_m	0,95



Rys. 3. Samochód ciężarowy MAN TAG 26.400- 6x6; źródło: [4]

Obliczenie współczynnika oporu toczenia f_t :

$$f_t = f_0[1 + A_d \cdot v^2] \quad (8)$$

gdzie:

f_0 – wartość początkowa współczynnika oporu toczenia dla prędkości jazdy bliskich zero,

A_d – współczynnik zależny od rodzaju nawierzchni,

v – prędkość pojazdu [m/s].

$$f_t = 0,012[1 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot 50^2]$$

$$f_t = 0,0135$$

Obliczenie oporu toczenia pojazdu dla prędkości 50 km/h (wg. wzoru 2):

$$F_t = G \cdot f_t = m_c \cdot g \cdot f_t$$

gdzie:

m_c – masa pojazdu + ładunek [kg]

g – przyspieszenie ziemskie [m/s²]

$$F_t = 24700 \cdot 9,81 \cdot 0,0135 = 3271,14 \text{ [N]}$$

Obliczenie oporów powietrza pojazdu dla prędkości 50km/h (wg. wzoru 5):

$$F_p = 0,047 \cdot C_x \cdot A \cdot v^2$$

$$A = 0,9 \cdot h \cdot b$$

$$A = 0,9 \cdot 2,5 \cdot 3,22 = 7,25$$

$$F_p = 0,047 \cdot 0,8 \cdot 7,25 \cdot 2500 = 681,03 \text{ [N]}$$

Obliczenie oporu wzniesienia pojazdu dla prędkości 50km/h (wg. wzoru 6):

Dla małych wzniesień $\sin\alpha$ zastępujemy wartością w ; siła oporu wzniesienia o nachyleniu 8% dla pojazdu:

$$F_w = G \cdot w$$

gdzie:

w – wzniesienie.

$$F_{w8\%} = 24700 \cdot 9,81 \cdot 0,08 = 19384,6 \text{ [N]}$$

Obliczenie sumy oporów powietrza i toczenia pojazdu dla prędkości 50km/h:

Siła oporu ruchu dla wzniesienia o nachyleniu 8 % dla pojazdu:

$$\sum F_{OP} = F_p + F_t + F_w \quad (9)$$

$$\sum F_{OP} = 681,03 + 3271,14 + 19384,6 = 23336,73 \text{ [N]}$$

Obliczenie zapotrzebowania na moc:

Moc niezbędna do pokonania oporów ruchu dla wzniesienia o nachyleniu 8 % przy prędkości 50km/h dla przyjętego samochodu:

$$N_0 = F_{op} \cdot v \quad (10)$$

$$N_0 = 23336,73 \cdot 13,8889 \frac{m}{s} = 32412 \text{ [W]} = 324,12 \text{ [kW]}$$

Moc niezbędna do pokonania oporów ruchu z uwzględnieniem sprawności układu napędowego N_s dla wzniesienia o nachyleniu 8 % dla pojazdu:

$$N_s = \frac{N_0}{\eta_n}$$

$$N_s = \frac{324,12}{0,95} = 341,18 \text{ [kW]}$$

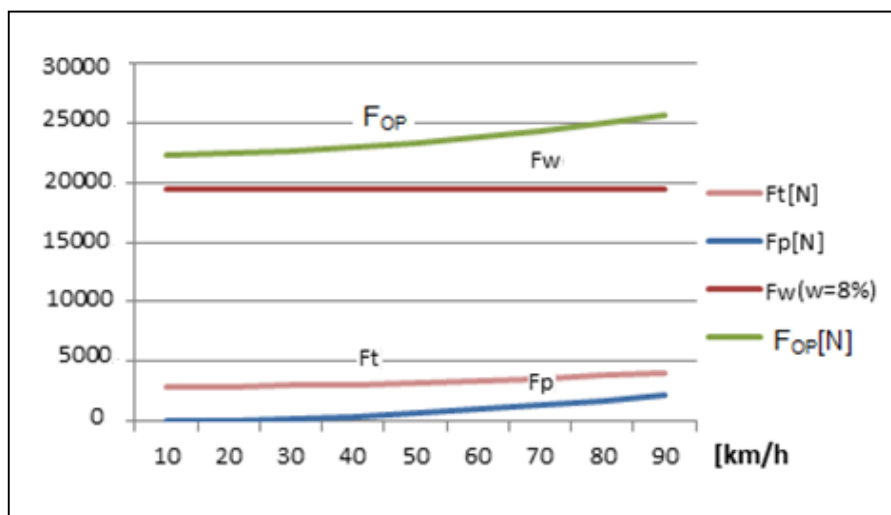
W tabeli 3 i 4 przedstawiano wyniki dla poszczególnych oporów ruchu oraz zapotrzebowania na moc dla prędkości od 10 do 90 km/h.

Tabela. 3. Przedstawienie wyników oporów ruchu dla prędkości od 10 do 90 km/h [2]

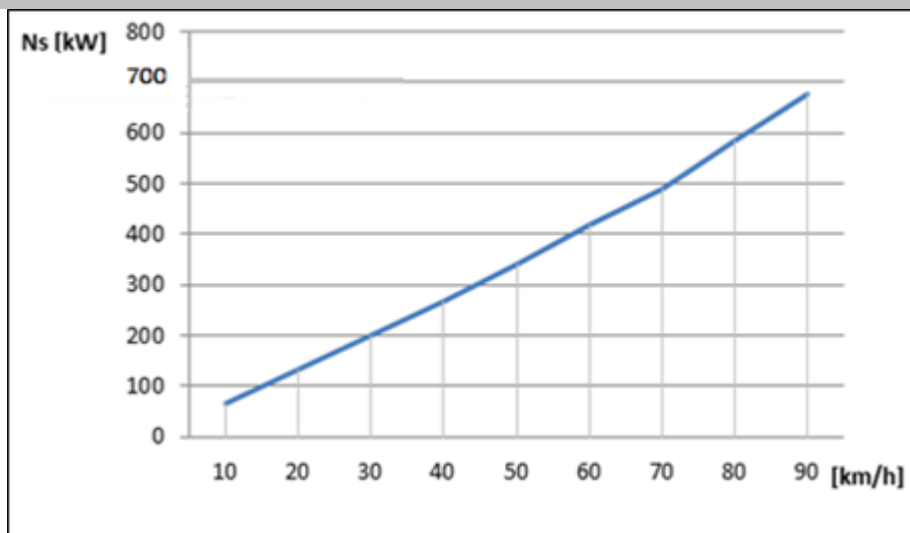
v[km/h]	v [m/s]	ft[N]	Ft[N]	Fp[N]	Fw(w=8%)
10	2,77778	0,0121	2931,9	33,31	19384,56
20	5,55556	0,0122	2965,84	108,96	19384,56
30	8,33333	0,0125	3038,53	245,17	19384,56
40	11,1111	0,0130	3140,30	435,86	19384,56
50	13,8889	0,0135	3271,14	681,03	19384,56
60	16,6667	0,0142	3431,07	980,68	19384,56
70	19,4444	0,0149	3620,07	1334,82	19384,56
80	22,2222	0,0158	3838,14	1743,44	19384,56
90	25	0,0169	4085,30	2206,54	19384,56

Tabela. 4. Przedstawienie wyników niezbędnej mocy dla prędkości od 10 do 90 km/h

v[km/h]	v [m/s]	F _{OP} [N]	No(w=8%)[kW]	Ns(w=8%)[kW]
10	2,77778	22349,81	62,08	65,30
20	5,55556	22459,36	124,77	131,34
30	8,33333	22668,26	188,90	198,84
40	11,1111	22960,72	255,12	268,55
50	13,8889	23336,73	324,12	341,18
60	16,6667	23796,31	396,61	417,48
70	19,4444	24339,45	473,27	498,18
80	22,2222	24966,14	554,80	584,00
90	25	25676,39	641,91	675,69



Rys. 4. Siły oporu ruchu samochodu (dla wybranego zadania przewozowego); źródło: [2]



Rys. 5. Zapotrzebowanie na moc samochodu (dla wybranego zadania przewozowego); źródło: [2]

W wyniku przeprowadzonych obliczeń należy stwierdzić, że opory ruchu rosną wraz z prędkością, natomiast wartość stałą przyjmują opory wzniesienia. Ze wzrostem prędkości najmniejszy przyrost ma opór toczenia. Opory powietrza natomiast wraz ze wzrostem prędkości mają znaczny przyrost wartości. Analizując zapotrzebowanie na moc widać wyraźnie, że wartość ta wzrasta wraz ze wzrostem prędkości pojazdu. W przypadku większych kątów wzniesienia wartości N_s będą większe.

Przykład obliczeniowy zapotrzebowania mocy niezbędnej do pokonania oporów ruchu, z uwzględnieniem sprawności układu napędowego N_s oraz wzniesienia o nachyleniu 8 %, dla pojazdu ciężarowego MAN TAG 26.400-6x6 na wyznaczonej trasie o określonym ładunku pozwala na określenie możliwości eksploatacyjnych tego samochodu. Zgodnie z katalogiem producenta pojazdu firmy MAN, dla podanego pojazdu maksymalna moc wynosi 294 kW. Dlatego też dla prędkości 50km/h, gdzie ta moc wynosi 341,18 kW, wymieniony samochód nie będzie w stanie pokonać wzniesienia o pochyleniu 8%. Dyspozycyjna moc silnika równa 268,55 kW pozwala pokonać przez wybrany pojazd przyjęte warunki przewozowe przy tym wzniesieniu dla prędkości 40km/h.

Wnioski

Transport jest tą dziedziną gospodarki, która wiąże wszystkie gałęzie przemysłu i związana jest ze społeczeństwem w sposób zbiorowy i indywidualny. Związek ten nie musi być za każdym razem bezpośredni i łatwo zauważalny, np. kiedy dostawca surowca się spóźnia, czego skutkiem jest zatrzymanie produkcji. Transport może też oddziaływać w sposób pośredni i wówczas dostrzeżenie jego niezbędności jest trudniejsze. Oddziaływanie transportu bezpośrednie czy też pośrednie ma olbrzymi wpływ na sytuację ekonomiczną w każdym kraju.

Transport samochodowy jest kluczową dziedziną całego transportu, który jest bardziej efektywny przy bezpośrednich przewozach ładunków, przy nie stałych potrzebach przewozowych oraz przy małych masach towarowych. Porównując transport drogowy z innymi gałęziami tej branży, charakteryzuje się on znacznie lepszymi wskaźnikami, a mianowicie:

- dostosowywaniem do niemal wszystkich rodzajów ładunków,
- gęstością rozmieszczenia dróg, co zapewnia szeroką dostępność dostarczenia usług,
- stosunkowo dużą szybkością eksploatacyjną i szybką realizacją w czasie,
- możliwością wyboru tras przewozu przy przewozie ładunków wymagających szybkości dostaw (bez czasochłonnych działań przeładunkowych).

Transport samochodowy, a szczególnie międzynarodowy, napotyka również ograniczenia wynikające z nierównomierności w przestrzennym rozwoju dróg i sieci drogowych oraz ich niskim stanem technicznym w krajach rozwijających się, natomiast w krajach wysokorozwiniętych wynika to ze znacznego przeciążenia ruchem na drogach.

Środki transportu drogowego wyróżniają się dużą różnorodnością, w szczególności pod względem konstrukcji nadwozia i ładowności pojazdu, a co za tym idzie, możliwym jest odpowiedni dobór środka przewozowego do właściwości technicznych i naturalnych przewożonego ładunku. Wprowadzenie jako źródeł napędu nowych i alternatywnych paliw sprawia, że obniżają się koszty ekonomiczne oraz sukcesywnie poprawia się ekologia transportu samochodowego.

Streszczenie

W artykule przedstawiono charakterystykę oddziaływań zewnętrznych na przemieszczanie się środka transportowego (oporu toczenia, oporu powietrza oraz oporu wzniesienia). Dokonano doboru pojazdu do konkretnego zadania przewozowego przez wyznaczenie oporów ruchu i określenie zapotrzebowania na moc w różnych warunkach eksploatacji.

ANALYSIS OF DEMAND FOR WORK IN TRANSPORT PROCESSES

Abstract

The article presents characteristics of rolling resistance, air resistance and resistance hill. In addition selection was also described a vehicle to transport tasks, by determining the resistance to motion and determine the demand for power in various traffic conditions.

Literatura

- [1] Prochowski L.: Mechanika ruchu. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005.
- [2] Praca dyplomowa: Siedlecka Sylwia.: Dobór środków transportowych do zadań pod kątem zapotrzebowania na pracę przewozową, Rzeszów 2012.
- [3] Siłka W.: Teoria ruchu samochodu. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [4] www.truck.pl
- [5] www.4trucks.pl
- [6] www.dafecodrive.pl

