

dr hab. Piotr Pawłowski
Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
w Krakowie

Dyrekcja
Tatrzańskiego Parku Narodowego
Zakopane

Opinia

w sprawie pomiaru sił działających na fasiał wykorzystywany do przewozu turystów na trasie do Morskiego Oka

Wstęp

Na prośbę mgr inż. Beaty Czerskiej zapoznałem się z dokumentacją dotyczącą pomiaru sił oporowych, występujących podczas transportu turystów wozami konnymi do Morskiego Oka. Podałem również analizie ocenę tych pomiarów wykonaną przez prof. Ryszarda Kolstrunga w opracowaniu z dnia 05.11.2014 r. Celem niniejszej opinii jest ocena poprawności wykonania pomiarów oraz wyciągniętych wniosków.

Pomiary zostały wykonane w dniu 23.10.2014 r. przez firmę Eldex. Do pomiarów użyto czujnika Sensocar S-2B, o zakresie pomiarowym 6000 kG. W odniesieniu do techniki wykonania pomiaru podniesiono dwa zarzuty [1]:

1. Wartości zmierzone przyrządem znajdowały się poniżej zakresu pomiarowego przyrządu, który producent określa jako zakres od 20% do 80% wartości maksymalnej;
2. Urządzenie zostało zaczepione w okolicach tylnej osi wozu, po czym siłę przeniesiono taśmą holowniczą, pod przednią osią wozu, na jego przód. Taki sposób zaczepienia przyrządu powoduje, że czujnik mierzy jedynie część rzeczywistych oporów, jakie musi pokonać zaprzęg konny w czasie ruchu wozu. Pozostałe siły są przenoszone przez inne elementy konstrukcyjne wozu.

W swojej ocenie wyników pomiaru prof. Ryszard Kolstrung stwierdził, że nawet po zawyżeniu wyników pomiaru o 30 % warunki pracy koni nie przekraczają dopuszczalnych norm, ani w zakresie dopuszczalnej pracy dziennej, ani dopuszczalnej siły uciążu na najbardziej stromych odcinkach drogi [2].

W niniejszej opinii nie będę odnosił się do zagadnień dotyczących samej techniki pomiaru, jako że w nim nie uczestniczyłem i nie posiadam wystarczającej wiedzy na temat metodologii jego przeprowadzenia. Ograniczę się jedynie do oceny wiarygodności uzyskanych wyników poprzez porównanie ich z wartościami, które można wyliczyć z podstawowych praw fizyki, jak również zasadności wniosków wyciągniętych na ich podstawie w ocenie sporządzonej przez prof. Kolstrunga. Będąc jedynie fizykiem, nie posiadam znajomości zagadnień zootechniki, niezbędnych do określenia parametrów wydolnościowych konia pociągowego. Tam, gdzie to niezbędne, opieram się więc na podręczniku inżynierii lądowej i wodnej [3], dokładniejsze analizy pozostawiając specjalistom.

Dynamika ruchu zaprzęgu konnego

Rozpatrzmy ruch wozu, o ciężarze Q , ciągniętego przez konia, o ciężarze G , po drodze o kącie nachylenia α . Aby wóz mógł poruszać się pod górę, koń musi przezwyciężyć działanie trzech sił przeciwdziałających ruchowi: 1) składowej ciężaru wozu równoległej do drogi, $Q\sin\alpha$, 2) składowej ciężaru konia równoległej do drogi, $G\sin\alpha$, oraz 3) oporu ruchu wozu, który jest proporcjonalny do nacisku wozu na

drogę, $fQ\cos\alpha$, gdzie f jest współczynnikiem oporów ruchu, zależnym m.in. od rodzaju nawierzchni drogi. Tak więc całkowita siła uciągu konia P powinna wynosić:

$$P = Q \sin \alpha + G \sin \alpha + f Q \cos \alpha \quad (1)$$

W tego typu zagadnieniach, gdy kąt nachylenia drogi α jest mniejszy od 10 stopni, można bez utraty dokładności przyjąć $\cos\alpha \approx 1$, za miarę kąta przyjąć zaś $\lambda = \sin\alpha$, czyli nachylenie drogi, wyrażane zazwyczaj w procentach. Wtedy otrzymujemy uproszczony wzór:

$$P \approx (Q+G)\lambda + fQ = Q(\lambda+f) + G\lambda \quad (2)$$

Należy zaznaczyć, że P wyraża **całkowitą siłę, z jaką koń działa kopytem na podłoże** – a więc siłę potrzebną do przesunięcia wozu, jak również do przemieszczenia ciała zwierzęcia. Dynamometr zaczepiony pomiędzy koniem a wozem wskaże **jedynie siłę działającą na wóz**, równą $F_w = Q(\lambda + f)$. Jest to siła, z jaką trzeba ciągnąć wóz, aby utrzymać go w ruchu jednostajnym. Siła ta zależy jedynie od masy wozu, bez względu na to jak ciężkie jest zwierzę pociągowe (lub np. ciągnik). Tej właśnie części siły pociągowej miał dotyczyć pomiar. **Jednak zwierzę potrzebuje dodatkowej siły**, o wielkości $F_k = G\lambda$, aby dokonać samoprzemieszczenia. Podkreślam to, ponieważ w opracowaniu [2] ta część siły uciągu została zaniedbana. Zagadnienie to omówię dokładniej w ostatniej części opinii.

Wciągając wóz na górę o wysokości H po drodze o długości L koń wykonuje pracę mechaniczną, związaną ze zmianą energii potencjalnej układu wóz+koń, oraz pracę na pokonanie oporów ruchu wozu:

$$W = (Q+G)H + QfL \quad (3)$$

Pracę tę można również obliczyć inaczej: jako sumę pracy potrzebnej do przeniesienia wozu oraz pracy „samoprzenoszenia” konia:

$$W = Q(H+fL) + W_p \quad (4)$$

Praca samoprzenoszenia W_p jest w rzeczywistości większa niż sama praca związana ze zmianą energii potencjalnej konia GH . Rzeczywista ilość pracy samoprzenoszenia jest zależna od prędkości, z jaką porusza się koń. Wg. podręcznika [3], ciągnąc wóz stępa, koń wydatkuje około 54% mocy na pracę użyteczną, zaś pozostałe 46% na pracę wewnętrzną. Przy kłusowaniu praca użyteczna to jedynie 13-16% całkowitej wykonywanej pracy (por. [3] str. 83).

Ocena wiarygodności pomiarów oporu ruchu

W warunkach pomiarowych ruch zaprzęgu dwukonnego odbywał się na trasie o długości $L=6760$ m, od parkingu w Palenicy Białczańskiej do parkingu na Włosienicy. Różnica wzniesień tych dwóch punktów wynosi $H=325.5$ m. Ciężar ciągnionego wozu wynosił $Q=1868$ kG, a sumaryczny ciężar obu koni to $G=1380$ kG.

Minimalna praca, potrzebna na przeniesienie **samego wozu** na wysokość H wynosi $W_{\min}=QH = 608065$ kGm. Jest to praca związana jedynie ze zmianą energii potencjalnej wozu, przy zaniedbaniu oporów ruchu. W swoim opracowaniu prof. Kolstrung obliczył pracę wykonaną nad wozem na podstawie wykonanych pomiarów, otrzymując wartość $W_m=542926$ kGm. Wynik ten pokazuje, że **wskazania przyrządu faktycznie były zaniżone**, jako że tak otrzymana wartość pracy jest niższa od minimalnej pracy W_{\min} potrzebnej do wyniesienia wozu na tę wysokość. Deficyt pracy wynosi tu $W_m - W_{\min} = -65159$ kGm. Dla urealnienia pomiaru prof. Kolstrung arbitralnie zwiększył wskazania tensometru o 30%, uzasadniając to sugestią ze strony firmy wykonującej pomiar. Nie jest jednak jasne, na czym została oparta ta sugestia. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że jest to typowe szacowanie „na oko”, a więc pozbawione jakiegokolwiek wartości naukowej. Biorąc jednak za dobrą monetę to szacowanie, prof. Kolstrung otrzymał pracę zaprzęgu

nad wozem $W_m' = 705804$ kGm. Ta wartość jest już bardziej realistyczna, jako że przewyższa pracę minimalną W_{\min} o 97739 kGm. Różnica ta powinna odpowiadać pracy potrzebnej na pokonanie oporów ruchu wozu, wynoszącej $W_{op} = QfL$. Znając długość drogi L i ciężar wozu Q możemy stąd policzyć średni współczynnik oporów ruchu: $f = 0.008$. Wartość taka byłaby do przyjęcia w przypadku nowej, dobrze wykonanej nawierzchni asfaltowej i technicznie sprawnego wozu. Jednak wobec faktu daleko posuniętej erozji nawierzchni drogi do Morskiego Oka, trudno przyjąć tę wartość za wiarygodną. Bardziej realistyczna jest typowa wartość przyjmowana w ruchu wozów konnych po nawierzchniach utwardzonych: $f' = 0.025$. Zakładając taką wielkość współczynnika oporów ruchu możemy obliczyć pracę $W_{op}' = Qf'L = 315691$ kGm. Stąd całkowita praca przeniesienia wozu wyniosłaby $W = W_{\min} + W_{op}' = 923757$ kGm. Taki wynik otrzymano by jednak zwiększając wskazania tensometru nie o 30%, ale aż o 70%. O tyle bowiem wartość ta jest wyższa od pierwotnie obliczonej wartości W_m .

Reasumując, uważam za głęboko uzasadnione wątpliwości co do poprawności przeprowadzenia pomiaru i wiarygodności otrzymanych w ten sposób wyników. Wobec braku jakiegokolwiek uzasadnienia dla oszacowania systematycznego błędu pomiaru, wynikającego głównie z niewłaściwego umocowania tensometru, należy uznać, że błąd pomiaru jest po prostu nieokreślony. Zgodnie z zasadami metrologii taki pomiar należy odrzucić.

Dyskusja analizy uciągu zaprzęgu

Po analizie opracowania [2] chciałbym jeszcze zwrócić uwagę na nieprawidłowe porównanie tzw. normalnej siły uciągu zaprzęgu (zdefiniowanej tamże jako 13% sumarycznego ciężaru koni użytych w zaprzęgu) z siłą, jaka na trasie działa na wóz. Jak już wspomniałem w dyskusji wzoru (2), siła uciągu w ruchu pod górę jest podzielona na siłę ciągnącą wóz $F_w = Q(\lambda + f)$ oraz siłę potrzebną do samoprzenoszenia konia $F_k = G\lambda$. Koń, podobnie jak silnik, ma określoną „moc znamionową”, równą iloczynowi normalnej siły uciągu i prędkości ruchu. Idąc pod górę koń używa części mocy na samoprzenoszenie. Siłą rzeczy moc dostępna na toczenie wozu jest mniejsza, a co za tym idzie, mniejsza jest dostępna siła F_w ciągnąca wóz. W efekcie siła uciągu, jaką dysponuje koń w terenie płaskim, musi być uszczuplona przy podejściu pod górę, i to dokładnie o tyle, ile wynosi siła ściągająca konia w dół zbrocza – czyli $G\sin\alpha$ (por. wzór 1). Takie podejście jest właśnie prezentowane w podręczniku [3]. W opracowaniu [2] Autor popełnił błąd, polegający na tym, że uwzględnił pracę samoprzenoszenia w ogólnym bilansie pracy, jednak w analizie sił uciągu nie uwzględnił dodatkowej siły, jaką koń musi użyć na przemieszczanie swego ciała. Zresztą Autor zdaje sobie chyba sprawę z tego mankamentu, czemu daje wyraz stwierdzeniem: „*Niewątpliwie zmęczenie koni powodował dodatkowy wysiłek związany z samoprzenoszeniem*”. Ostatecznie jednak Autor zaniedbuje ten wysiłek. Tymczasem nie jest on zaniedbywalny, gdyż **ciężar dwóch koni w zaprzęgu jest porównywalny z ciężarem wozu**. Aby właściwie ocenić całkowitą siłę uciągu wymaganą od zaprzęgu konnego, należy zastosować wzór (2). Poprawnie wyliczone wartości znajdują się w tabeli poniżej. Dla porównania zestawiono wyniki otrzymane dla różnych współczynników oporu ruchu $f = 0, 0.008, \text{ oraz } 0.025$. W tabeli drukiem wytłuszczonym zaznaczono wartości uciągu, które przekraczają 13% ciężaru koni (179 kG). Jak widać, norma ta jest przekroczona co najmniej na trzech ostatnich odcinkach drogi, o całkowitej długości 2945 m, i to **bez względu na to jaką przyjmujemy wartość współczynnika oporów ruchu f** .

Nr Odcinka	Długość L (m)	Nachylenie λ (%)	Przewyższenie H (m)	Uciąg w kG (obliczony wg. wzoru 2), przy:		
				$f=0$	$f=0.008$	$f=0,025$
1	590	1,53	9,0	50	65	96
2	1 970	5,21	102,6	169	184	216
3	475	0,78	3,7	25	40	72
4	780	2,07	16,1	67	82	114
5	1 095	6,01	65,8	195	210	242
6	880	7,16	63,0	233	248	279
7	970	6,72	65,2	218	233	265
Razem	6 760		325,5			

We wnioskach Autor opracowania powołuje się na liczne prace, dowodzące, że wysiłek konia może być znacznie większy, niż założone przez niego 13% masy ciała, osiągając w ekstremalnych warunkach nawet czynnik 80%. Nie mając kompetencji w tej kwestii, mogę się tu jednak odwołać, już po raz ostatni, do podręcznika [3]: „*Siła pociągowa konia w stosunku do jego siły pociągowej normalnej może być powiększona nawet 3 - 4 razy, jednak bez szkody dla zdrowia konia można ją tylko podwoić (...), z warunkiem, aby praca w tych warunkach nie była zbyt długa (np. aby odcinek drogi ze wzniesieniem, wymagającym podwojenia siły pociągowej nie był dłuższy niż 500 - 600 m).*” (por. [3] str. 84, podkr. moje). W tym kontekście należy uznać, że praca koni na ostatnim odcinku przekracza dopuszczalne obciążenia.

Wnioski

1. Wyniki pomiarów wykonanych w dniu 23.10.2014 r. przeczą podstawowym prawom fizyki, nie są więc wiarygodne i z punktu widzenia zasad prowadzenia pomiarów fizycznych nie przedstawiają rzeczywistej wartości, ani nie uprawniają do wyciągania wniosków.
2. Analiza niezbędnego wysiłku koni na trasie do Morskiego Oka pokazuje, że norma sił uciągu na poziomie 13% ciężaru konia, wskazana przez prof. Kolstrunga, jest przekraczana nawet przy zaniedbaniu oporów ruchu. Poważne przekroczenie normy siły uciągu występuje na blisko 3-kilometrowym odcinku końcowym trasy. Należy rozważyć taką organizację transportu, aby przynajmniej na tym odcinku ruch był ograniczony do lekkich powozów/bryczek.

Literatura

1. B. Czerna, „Ocena sposobu wykonania pomiarów masy wozu oraz sił uciągu koni z Morskiego Oka wraz z wnioskami”, Zakopane, 26.10.2014.
2. R. Kolstrung, „Ocena wyników pomiarów oporów wozów-fasjągów wykorzystywanych do przewozu turystów na trasie do Morskiego Oka”, Lublin, 05.11.2014.
3. "Podręcznik inżynierski w zakresie inżynierii lądowej i wodnej. Tom 1", red. S. Bryła, Lwów 1927.

dr hab. Piotr Pawłowski

Do wiadomości:

mgr inż. Beata Czerna

dr hab. Ryszard Kolstrung