

SZYBCIEJ NIŻ DŹWIĘK:

ZOFIA I NAUKA O PRĘDKOŚCI —
OD PARY I PARY KONI DO WODORU

Ilustrowany kurs nauki
dla ciekawych świata:
jedenastoletnia Zofia z Krakowa
szuka odpowiedzi na jedno pytanie —
jak szybko może poruszać się
człowiek po ziemi?



PARA



PARY KONI



PRĘDKOŚĆ



WODÓR



KRAKÓW



Przegląd rozdziału

Krótki przegląd tego, czego nauczysz się w tej książce.

1. Pytanie, które uruchamia fizykę	3
2. Zanim pojawił się silnik	8
3. Ruch nie zmienia się bez przyczyny	14
4. Energia nie znika	20
5. Opór i przyczepność to nie to samo	26
6. Powietrze potrafi mocno naciskać	32
7. Dźwięk jest ruchem ośrodka	38
8. Ciąg z rozpędzonego strumienia	44
9. Samochód, który pokonał Mach 1	50
10. Rekord zaczyna się od wymagań	56
11. Najlżejszy pierwiastek	63
12. Wielka fizyka w zwykłym dniu	69
13. Jak korzystać z rejestru	76



Zofia

Pytanie, które uruchamia fizykę

Pytanie, które uruchamia fizykę

Wyobraź sobie zwyczajny powrót do szkoły. Mijas rower, obserwujesz autobus i słyszysz samolot ukryty ponad chmurami. Wszystkie te pojazdy się poruszają, lecz każdy robi to inaczej. Pytanie „co jest najszybsze?” szybko prowadzi do ciekawszego pytania: jak właściwie mierzymy prędkość?

Prędkość nie jest cechą przedmiotu taką jak kolor albo masa. Opisuje zmianę położenia w czasie. Aby ją wyznaczyć, potrzebujesz więc dwóch pomiarów: przebytej drogi i czasu podróży. Bez zegara sama liczba kilometrów nie mówi, czy ruch był szybki, czy powolny.

Droga podzielona przez czas

Najprostszy wzór na średnią prędkość zapisuje się następująco:

$$v_{\text{sr}} = s/t$$

Litera s oznacza drogę, t oznacza czas, a v średnią prędkość. Jeżeli rower przejechał 12 kilometrów w ciągu jednej godziny, jego średnia prędkość wynosi 12 km/h. Gdy tę samą drogę pokona w pół godziny, wynik wzrośnie do 24 km/h.

Jednostką prędkości w układzie SI jest metr na sekundę, zapisywany jako m/s^[1]. W życiu codziennym w Polsce częściej spotykasz kilometry na godzinę. Przeliczenie jest proste: 1 m/s



odpowiada 3,6 km/h, ponieważ godzina ma 3600 sekund, a kilometr 1000 metrów.

Samochód jadący 72 km/h porusza się z prędkością 20 m/s. W każdej sekundzie pokonuje więc odcinek długości około czterech zaparkowanych samochodów. Taki obraz pomaga zrozumieć, dlaczego nawet krótka chwila nieuwagi przy dużej prędkości oznacza sporą przebytą drogę.

Średnia i prędkość chwilowa

Średnia prędkość opisuje całą podróż jednym wynikiem. Nie mówi jednak, co działo się po drodze. Autobus mógł stać, ruszać, hamować i przez chwilę jechać szybko, a mimo to jego średnia z całej trasy mogła być niewielka. Postoje także wydłużają czas przejazdu.

Prędkościomierz pokazuje w przybliżeniu prędkość chwilową, czyli wartość dotyczącą konkretnego momentu. W fizyce dokładniejszy opis ruchu otrzymujesz, zapisując położenie wielokrotnie i sprawdzając, jak szybko zmienia się ono w krótkich odstępach czasu ^[2].

Rozwiązany przykład: autobus przejeżdża 15 km w 30 minut, lecz przez 5 minut stoi. Dla całej podróży używasz pełnych 30 minut, czyli 0,5 godziny. Obliczenie $15 \text{ km} \div 0,5 \text{ h}$ daje 30 km/h. Podczas jazdy prędkość chwilowa mogła być znacznie większa.

Kierunek też ma znaczenie

W potocznym języku pytasz głównie o wartość prędkości. Fizyka rozróżnia jednak szybkość i prędkość wektorową. Ta druga obejmuje również kierunek. Dwa pojazdy jadące po 50 km/h w przeciwne strony mają taką samą szybkość, ale różne prędkości wektorowe ^[2].

Kierunek jest ważny, gdy analizujesz zmianę ruchu. Samochód jadący po okręgu może utrzymywać stałe wskazanie prędkościomierza, lecz wciąż przyspiesza w znaczeniu fizycznym, bo nieustannie skręca. Przyspieszenie oznacza każdą zmianę prędkości: jej wartości albo kierunku.

Jeżeli pojazd zwiększa prędkość od 0 do 20 m/s w ciągu 10 sekund, jego średnie przyspieszenie wynosi 2 m/s^2 . Oznacza to, że w każdej sekundzie wartość prędkości rośnie średnio o 2 m/s. Nie oznacza natomiast pokonywania dwóch metrów w każdej sekundzie.

$$a_{\text{sr}} = \Delta v / \Delta t = 20 \text{ m/s} / 10 \text{ s} = 2 \text{ m/s}^2$$

Pomiar nie jest zgadywaniem

Każdy pomiar ma niepewność. Stoper uruchomiony ręką może wystartować odrobinę za późno, droga może być wyznaczona niedokładnie, a licznik może zaokrąślać wynik. Dobra inżynieria nie ukrywa tych ograniczeń. Powtarza próby, porównuje przyrządy i podaje warunki pomiaru.

Możesz wykonać bezpieczne doświadczenie bez ścigania się. Zmierz czas przejazdu zabawkowego samochodzika na prostym torze o długości dwóch metrów. Powtórz próbę pięć razy. Oblicz osobną prędkość dla każdego przejazdu, a potem średnią wyników. Nie wypychaj zabawki na drogę ani schody.

1. Wyznacz długość toru i zapisz ją w metrach.
2. Zmierz pięć czasów przejazdu w sekundach.
3. Dla każdej próby oblicz $s \div t$.
4. Porównaj wyniki i wskaż możliwe przyczyny różnic.

Przy rekordach prędkości ta staranność staje się najważniejsza. Nie wystarczy ujrzeć wysokiej liczby na ekranie. Trzeba wiedzieć, jak mierzono czas, na jakim odcinku, w którym kierunku i według jakich zasad. Rekord jest wynikiem fizycznym, lecz także dobrze udokumentowanym pomiarem.

Najważniejsza myśl

Prędkość łączy przestrzeń z czasem. Gdy umiesz rozróżnić drogę, czas, średnią prędkość, prędkość chwilową i przyspieszenie, otrzymujesz podstawowy zestaw narzędzi do badania wszystkiego: roweru, lokomotywy, odrzutowca oraz najszybszego samochodu świata.

Zapamiętaj: wysoka liczba bez jednostki jest prawie bezużyteczna. Wynik „100” może oznaczać 100 m/s, 100 km/h albo 100 metrów przebyte w nieznanym czasie. Fizyk zawsze dopisuje jednostkę, sprawdza warunki i dopiero potem zastanawia się, co liczba naprawdę opowiada.

Zanim pojawił się silnik

Zanim pojawił się silnik

Przez większą część historii najszybszy ruch człowieka po łądzie zależał od mięśni. Można było biec, jechać konno albo wykorzystać zwierzę do ciągnięcia pojazdu. Koń zwiększał możliwą prędkość i ładunek, ale również potrzebował pożywienia, odpoczynku oraz dobrej drogi.

Wyrażenie koń mechaniczny przypomina tę epokę, lecz nie oznacza po prostu mocy jednego konkretnego konia. Jest historyczną jednostką mocy, stworzoną po to, aby porównywać pracę maszyn z pracą zwierząt. W Polsce moc silników często podaje się w koniach mechanicznych oraz kilowatach.

Od siły mięśni do mocy maszyny

Mięśnie i silniki mogą działać na pojazd siłą, lecz do opisu tempa wykonywania pracy potrzebujesz pojęcia mocy.

Maszyna o dużej mocy potrafi przekazywać dużo energii w krótkim czasie. Nie gwarantuje to jednak dowolnej prędkości, bo pojazd stale napotyka opory.

Koń ciągnący wóz musi pokonać opór toczenia kół, tarcie w osiach, nierówności i opór powietrza. Cięższy ładunek zazwyczaj wymaga większej siły podczas ruszania i jazdy pod górę. Dobre koło i twarda nawierzchnia pozwalają wykorzystać tę samą energię skuteczniej.



To ważna lekcja inżynierii: postęp nie zawsze polega na dodaniu mocniejszego źródła napędu. Czasem równie dużo daje zmniejszenie strat. Łożysko o niewielkim tarcu, gładsza droga albo lżejsze koło mogą poprawić ruch bez dokładania kolejnego konia przed pojazdem.

Para zmienia skalę

Silnik parowy zamienia część energii chemicznej paliwa w ruch. Paliwo ogrzewa wodę, powstająca para ma wysokie ciśnienie, a ono może przesuwac tłok. Mechanizm korbowy zamienia ruch tłoka tam i z powrotem na obrót kół. To łańcuch wielu przemian energii.

W uproszczeniu przepływ energii można zapisać tak:

energia chemiczna paliwa -> energia cieplna -> energia pary
-> ruch tłoka -> obrót kół

Wczesne lokomotywy nie były jedynie szybszymi wozami. Poruszały się po stalowych szynach, które prowadziły koła i zmniejszały opór toczenia. Mogły ciągnąć znacznie cięższe ładunki niż pojazdy drogowe napędzane zwierzętami. Rozwój kolei połączył więc moc silnika z odpowiednią drogą ^[3].

Lokomotywa Rocket, zbudowana przez George'a i Roberta Stephensonów, zwyciężyła w próbach Rainhill w 1829 roku. Jej rozwiązania, między innymi wielorurkowy kocioł, pomogły zwiększyć wydajność wytwarzania pary i wpłynęły na dalszy rozwój lokomotyw ^[4].

Dlaczego szyna pomaga

Stalowe koło na stalowej szynie odkształca się mniej niż miękka opona na nierównej ziemi. Dzięki temu mniej energii ginie na ciągłe ugniatanie materiału. Niewielki opór toczenia jest zaletą kolei, choć ma też cenę: mała przyczepność utrudnia gwałtowne ruszanie i hamowanie.

Koła lokomotywy nie mogą po prostu obracać się dowolnie szybko. Jeżeli siła napędowa przekroczy możliwości styku koła z szyną, koło zacznie się ślizgać. Konstruktor musi zatem pogodzić dwa cele: zmniejszać zbędne opory, ale zachować wystarczającą przyczepność do napędu i hamowania.

Rozwiązany przykład pokazuje znaczenie czasu. Pociąg pokonuje 90 km w 1,5 godziny. Jego średnia prędkość wynosi 60 km/h. Jeśli na postoju spędzi 15 minut, a cały czas podróży nadal wynosi 1,5 godziny, odcinki jazdy muszą być pokonywane szybciej niż wskazuje średnia.

$$v_{sr} = 90 \frac{\text{km}}{1,5} h = 60 \text{ km/h}$$

Nowa prędkość, nowe problemy

Gdy pojazdy przyspieszyły, projektanci musieli rozwiązać problemy, które przy wolnym wozie były mniej groźne. Tory wymagały dokładnego ułożenia, mosty musiały przenosić większe obciążenia, a hamulce zatrzymywać długie skład. Prędkość rozwijała cały system, nie tylko silnik.

Szybki pojazd potrzebuje również stabilności. Nierówność, która przy małej prędkości powoduje lekkie kotysanie, przy dużej może wywołać silne drgania. Dlatego inżynier bada masę, zawieszenie, kształt kół i tor. Rekord nie powstaje przez samo „mocniejsze rozpędzenie” maszyny.

Para miała ograniczenia. Kocioł, woda i paliwo ważyły dużo, a znaczna część energii uchodziła jako ciepło. Mimo to lokomotywa parowa udowodniła coś przełomowego: człowiek może zbudować maszynę zdolną długo utrzymywać ruch szybszy i potężniejszy niż transport oparty wyłącznie na mięśniach.

Lekcja z epoki pary

Historia prędkości nie jest prostą paradą coraz mocniejszych silników. Składa się z ulepszeń kotła, toru, kół, smarowania, hamulców, pomiarów i organizacji ruchu. Każde rozwiązanie usuwało inną przeszkodę, a dopiero ich współpraca pozwalała bezpiecznie jechać szybciej.

Ta sama zasada będzie wracała przy samochodach rekordowych. Ogromna moc ma znaczenie, ale potrzebuje właściwego podłoża, kół, opływowego nadwozia i kontroli. Inżynieria przypomina drużynę: jeden znakomity zawodnik nie wygra, jeśli reszta elementów nie potrafi z nim współpracować.

Podsumuj: mięśnie dostarczały energii biologicznej, para wykorzystywała energię chemiczną paliwa, a szyny ograniczały straty. Każdy krok zwiększał nie tylko prędkość, lecz również skalę transportu. Następny krok wymaga zrozumienia, co

właściwie sprawia, że ruch się zmienia.

Ruch nie zmienia się bez przyczyny

Ruch nie zmienia się bez przyczyny

Gdy piłka leży na podłodze, pozostaje w spoczynku, dopóki coś na nią nie zadziała. Gdy już się toczy, zatrzymuje ją tarcie i opór powietrza. To codzienne doświadczenie prowadzi do praw Newtona, które opisują związki między siłą, masą i zmianą ruchu ^[5].

Siła jest oddziaływaniem zdolnym zmienić prędkość albo kształt ciała. Ma wartość i kierunek. Jednostką siły jest niuton, N. Jeden niuton to siła, która masie jednego kilograma nadaje przyspieszenie jednego metra na sekundę do kwadratu.

Pierwsza zasada: bezwładność

Pierwsza zasada dynamiki mówi, że ciało pozostaje w spoczynku albo porusza się ruchem jednostajnym po linii prostej, jeśli wypadkowa działających na nie sił jest równa zeru ^[5]. Nie trzeba więc stale „dostarczać ruchu”. Trzeba za to równoważyć siły oporu.

W autobusie odczuwasz bezwładność podczas ruszania i hamowania. Kiedy pojazd przyspiesza do przodu, twoje ciało przez chwilę zachowuje poprzedni stan ruchu, dlatego czujesz wychylenie do tyłu. Podczas hamowania ciało chce poruszać się dalej. Pas bezpieczeństwa zmienia jego ruch siłą.



Nie jest to tajemnicza siła pchająca pasażera. To skutek porównania ruchu ciała z przyspieszającym pojazdem. Dlatego podczas doświadczeń w poruszającym się układzie trzeba jasno określić punkt odniesienia: drogę, autobus, wnętrze wagonu albo powierzchnię Ziemi.

Druga zasada: siła, masa, przyspieszenie

Najbardziej znany zapis drugiej zasady dynamiki ma postać:

$$F_w = m a$$

Symbol F_w oznacza siłę wypadkową, czyli wynik połączenia wszystkich sił z uwzględnieniem ich kierunków. Jeżeli napęd pcha pojazd do przodu siłą 5000 N, a opory działają do tyłu siłą 3000 N, wypadkowa wynosi 2000 N do przodu.

Dla pojazdu o masie 1000 kg taka siła wypadkowa daje przyspieszenie 2 m/s^2 . Gdyby masa wzrosła do 2000 kg, a siły pozostały takie same, przyspieszenie spadłoby do 1 m/s^2 . Cięższy pojazd nie jest „oporny z charakteru”; ma większą bezwładność.

$$a = F_w/m = 2000 \frac{\text{N}}{1000} \text{ kg} = 2 \text{ m/s}^2$$

Przy stałej prędkości wypadkowa siła wzdłuż kierunku jazdy wynosi zero. Silnik może wtedy nadal pracować, ale jego siła napędowa równoważy opór toczenia i opór powietrza. To wyjaśnia pozorną zagadkę: silnik działa, a pojazd już nie przyspiesza.

Trzecia zasada: para oddziaływań

Trzecia zasada dynamiki mówi, że oddziaływania występują parami. Jeżeli opona naciska drogę do tyłu, droga działa na oponę siłą skierowaną do przodu. Te siły mają równe wartości i przeciwne kierunki, ale działają na różne ciała, więc nie znoszą się wzajemnie ^[5].

Podobnie działa silnik odrzutowy. Przyspiesza gazy do tyłu, a gazy działają na silnik i pojazd do przodu. Odrzutowiec nie musi „odpychać się od powietrza” jak koło od drogi. Może wytwarzać ciąg także wysoko w atmosferze; rakietą potrafi działać nawet w próżni.

W samochodzie z napędzanymi kołami sprawę ogranicza przyczepność. Silnik może mieć ogromny moment obrotowy, ale jeśli opony nie zdołają przekazać siły na nawierzchnię, zaczną się ślizgać. Wtedy część energii ogrzewa opony zamiast skutecznie rozpędzać pojazd.

Cztery siły na prostym odcinku

Na pojazd jadący poziomo działają zwykle cztery główne rodzaje sił: ciężar w dół, reakcja podłoża w górę, siła napędowa do przodu oraz suma oporów do tyłu. Przy stabilnej jeździe siły pionowe w przybliżeniu się równoważą, ale aerodynamika może ten układ zmieniać.

- Ciężar wynika z oddziaływania grawitacyjnego.
- Podłoże podtrzymuje koła siłą reakcji.
- Napęd dostarcza siły skierowanej do przodu.

- Tarcie i opór powietrza zwykle przeciwdziałają ruchowi.

Jeżeli pojazd przyspiesza, nie zakładaj automatycznie, że wszystkie siły rosną. Mogła wzrosnąć siła napędowa, zmaleć siła oporu albo zmienić się masa, na przykład po zużyciu paliwa. Fizyka wymaga narysowania pełnego obrazu zamiast wybierania jednej wygodnej przyczyny.

Diagram sił jest prostym, ale potężnym narzędziem.

Zastępujesz pojazd punktem lub prostokątem, a siły strzałkami. Długość strzałki może przedstawiać wartość, a zwrot kierunek. Takie szkice pomagają wykryć brakującą siłę i uniknąć pomieszania przyczyny ze skutkiem.

Błąd, który wiele uczy

Częsty błąd brzmi: „Jeżeli coś jedzie do przodu, wypadkowa siła też musi być skierowana do przodu”. Nie zawsze. Pojazd może jechać do przodu i jednocześnie hamować, a wtedy wypadkowa jest skierowana do tyłu. Kierunek ruchu nie musi być kierunkiem przyspieszenia.

Inny błąd polega na dodawaniu wartości sił bez uwzględnienia kierunków. Gdy 4000 N działa do przodu, a 3500 N do tyłu, wypadkowa nie wynosi 7500 N, tylko 500 N do przodu. Dopiero ta różnica decyduje o przyspieszeniu całego pojazdu.

Prawa Newtona nie mówią konstruktorowi, jaki kształt ma mieć rekordowy samochód. Dają jednak język do sprawdzania każdego projektu. Pozwalają zapytać, skąd pochodzi ciąg, co ogranicza przyspieszenie, jak podłoże oddziałuje na koła i dlaczego pojazd osiąga prędkość graniczną.

Zapamiętaj: ruch opisuje prędkość, a zmianę ruchu wyjaśnia wypadkowa siła. Masa określa, jak duże przyspieszenie wywoła dana siła. To most między obserwacją wskazania prędkościomierza a inżynierskim pytaniem: co dokładnie działa na maszynę?

Energia nie znika

Energia nie znika

Aby rozpędzić pojazd, trzeba przekazać mu energię. Gdy pojazd hamuje, ta energia nie znika. Zmienia postać: ogrzewa hamulce, opony, nawierzchnię i powietrze, może zostać częściowo odzyskana przez generator albo zamienić się w dźwięk i odkształcenia.

Energia opisuje zdolność układu do wywoływania zmian, a jej jednostką jest dżul, J. Praca zostaje wykonana wtedy, gdy siła powoduje przesunięcie w swoim kierunku. Moc mówi, jak szybko energia jest przekazywana lub praca wykonywana ^[6].

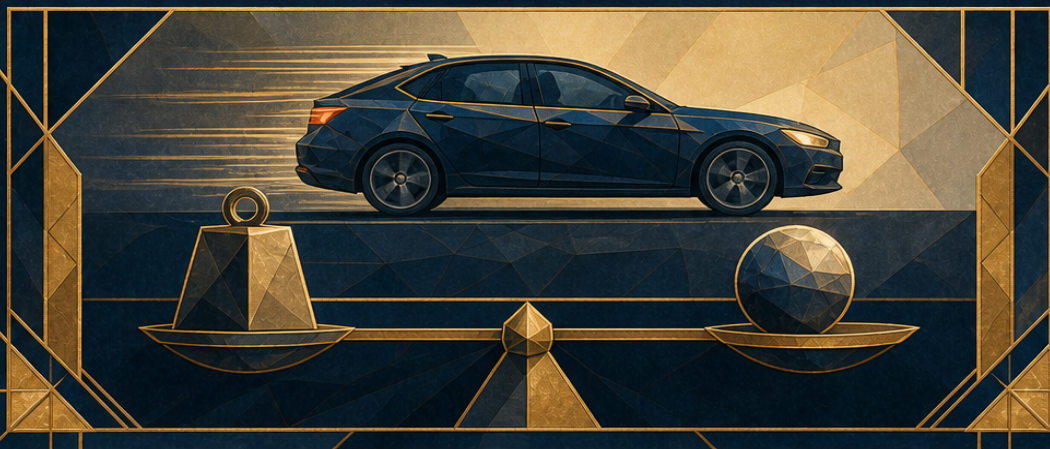
Energia ruchu

Energia kinetyczna poruszającego się ciała zależy od masy oraz kwadratu prędkości:

$$E_k = (1/2) m v^2$$

Kwadrat prędkości ma ogromne znaczenie. Jeżeli przy tej samej masie prędkość wzrośnie dwa razy, energia kinetyczna wzrośnie cztery razy. Przy trzykrotnie większej prędkości energia będzie dziewięć razy większa. Dlatego rekordowa jazda staje się coraz trudniejsza i bardziej wymagająca.

Rozwiązany przykład: pojazd o masie 1000 kg jedzie 10 m/s. Jego energia kinetyczna wynosi 50 000 J. Przy 20 m/s ma już 200 000 J. Masa się nie zmieniła, prędkość się podwoiła, a



energia wzrosła czterokrotnie.

$$E_{k1} = 0,5 \cdot 1000 \text{ kg} \cdot (10 \text{ m/s})^2 = 50\,000 \text{ J} \quad E_{k2} = 0,5 \cdot 1000 \text{ kg} \cdot (20 \text{ m/s})^2 = 200\,000 \text{ J}$$

Ta zależność wyjaśnia, dlaczego droga hamowania nie rośnie po prostu proporcjonalnie do prędkości. Hamulce i opony muszą rozproszyć znacznie większą energię. Rzeczywisty wynik zależy także od przyczepności, czasu reakcji, nachylenia, pogody oraz działania układu hamulcowego.

Moc: szybkość przekazywania energii

Moc to energia podzielona przez czas. Jeżeli dwie maszyny wykonują tę samą pracę, lecz jedna robi to dwa razy szybciej, ma dwa razy większą średnią moc. Wat, W, oznacza jeden dżul na sekundę. Tysiąc watów to jeden kilowat, kW ^[6].

$$P = E/t$$

Silnik o dużej mocy może szybko dostarczać energię potrzebną do przyspieszania oraz pokonywania oporów. Przy stałej prędkości na poziomej drodze moc użyteczna wiąże siłę oporu z prędkością. W prostym modelu można zapisać $P = F \cdot v$.

Jeżeli opory wynoszą 1000 N, a pojazd jedzie 20 m/s, potrzeba około 20 000 W, czyli 20 kW mocy mechanicznej na ich równoważenie. Przy większej prędkości sam opór aerodynamiczny rośnie, dlatego zapotrzebowanie na moc zwiększa się jeszcze szybciej.

$$P = F \cdot v = 1000 \text{ N} \cdot 20 \text{ m/s} = 20\,000 \text{ W}$$

Łańcuch sprawności

Żaden rzeczywisty napęd nie zamienia całej energii źródła w użyteczny ruch. Część staje się ciepłem, hałasem, ruchem płynów i drganiami. Sprawność to stosunek użytecznej energii wyjściowej do dostarczonej energii wejściowej. Jej wartość nie może przekroczyć 100 procent.

Jeśli układ otrzymuje 1000 J, a na ruch pojazdu wykorzystuje 700 J, jego sprawność wynosi 70 procent. Pozostałe 300 J nie zniknęło; przeszło do otoczenia w mniej przydatnych postaciach. W praktyce cały pojazd zawiera wiele etapów, a każdy ma własne straty.

$$\text{sprawność} = E_{\text{użyteczna}}/E_{\text{dostarczona}} = \\ 700 \frac{\text{J}}{1000} = 0,70 = 70$$

W lokomotywie parowej łańcuch obejmuje spalanie, ogrzewanie wody, rozprężanie pary, mechanizm tłokowy i koła. W samochodzie elektrycznym obejmuje magazyn energii, elektronikę, silnik i przekładnię. Porównanie wymaga określenia granic: od zbiornika, od elektrowni czy od wydobywania surowca?

Hamowanie i odzysk

W hamulcu ciernym energia kinetyczna przechodzi głównie w ciepło. Tarcze mogą stać się bardzo gorące. W pojeździe elektrycznym silnik może podczas hamowania pracować jako generator i odzyskać część energii do akumulatora. Nadal występują straty, więc nie odzyskuje się wszystkiego.

Samochód rekordowy ma szczególne zadanie. Najpierw potrzebuje ogromnego tempa dostarczania energii, potem musi bezpiecznie rozproszyć energię ruchu. Przy bardzo wysokiej prędkości stosuje się rozwiązania etapowe: zmniejszenie ciągu, opór aerodynamiczny, spadochrony hamujące, a na końcu hamulce kół.

Spadochron nie sprawia, że energia znika. Zwiększa opór powietrza, więc energia ruchu zostaje przekazana do powietrza w postaci ciepła i chaotycznego ruchu. Rozłożenie hamowania na etapy chroni elementy, które mogłyby zostać przeciążone, gdyby od razu wykonały całą pracę.

Energetyczne porównanie

Nie porównuj pojazdów wyłącznie po wielkości zbiornika lub baterii. Istotne są masa, sprawność napędu, opory, prędkość i czas działania. Paliwo może przechowywać dużo energii na kilogram, ale układ wykorzystujący je może mieć duże straty. Każdy wybór tworzy kompromisy.

Równie ważne jest odróżnienie energii od mocy. Duży magazyn energii przypomina obszerny zbiornik wody, a wysoka moc — szeroką rurę zdolną szybko ją przepuścić. Pojazd rekordowy potrzebuje odpowiedniej ilości energii oraz możliwości przekazywania jej w olbrzymim tempie.

Zapamiętaj trzy zależności: energia kinetyczna rośnie z kwadratem prędkości, moc określa tempo przekazywania energii, a sprawność opisuje użyteczną część przemiany. To dlatego przejście od „bardzo szybko” do „jeszcze szybciej”

kosztuje znacznie więcej niż podpowiada intuicja.

Opór i przyczepność to nie to samo

Opór i przyczepność to nie to samo

Tarcie często przedstawia się jako przeciwnika ruchu. Rzeczywiście powoduje straty i nagrzewanie, ale bez niego trudno byłoby chodzić, ruszać rowerem, skręcać i hamować. Inżynier nie próbuje więc usunąć całego tarcia. Ogranicza je tam, gdzie przeszkadza, i zapewnia tam, gdzie jest konieczne.

Tarcie pojawia się na styku powierzchni. Nawet materiał wyglądający na gładki ma mikroskopijne nierówności. Powierzchnie odkształcają się i oddziałują, przez co ruch wymaga siły. Wielkość tarcia zależy od materiałów, nacisku, temperatury, zanieczyszczeń oraz tego, czy powierzchnie ślizgają się, czy toczą ^[7].

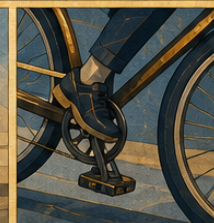
Tarcie statyczne i poślizg

Tarcie statyczne działa, gdy powierzchnie w miejscu kontaktu nie przesuwają się względem siebie. Opona tocząca się bez poślizgu dotyka drogi chwilowo nieruchomym fragmentem bieżnika. Dzięki temu może przekazywać siłę napędową, boczną przy skręcie oraz hamującą.

Tarcie statyczne dopasowuje wartość do potrzeby, ale tylko do pewnej granicy. Jeśli żądana siła jest za duża, zaczyna się poślizg. Wtedy koło może obracać się szybko bez skutecznego



1



3



4

5



6



7



8



przyspieszania albo przesuwac się po zablokowaniu podczas hamowania.

Uproszczony model maksymalnej siły tarcia statycznego zapisuje się jako iloczyn współczynnika tarcia i siły nacisku. Model pomaga myśleć, lecz nie opisuje idealnie każdej opony, ponieważ guma odkształca się, nagrzewa i działa na złożonej nawierzchni.

$$F_{t,max} \approx \mu_s N$$

Jeżeli współczynnik w uproszczonym przykładzie wynosi 0,8, a nacisk 5000 N, graniczna siła to około 4000 N. Żądanie 5000 N spowodowałoby utratę przyczepności. Nie jest to zachęta do prób drogowych, lecz sposób rozumienia pracy systemów zapobiegających poślizgowi.

Opór toczenia

Koło ułatwia ruch, bo toczenie zwykle powoduje mniejsze straty niż przesuwanie całego przedmiotu po podłożu. Opór toczenia nie jest jednak zerowy. Opona ugina się przy kontakcie z drogą, a materiał nie oddaje całej energii sprężystości. Część zmienia się w ciepło.

Zbyt niskie ciśnienie w oponie zwiększa odkształcenie i może podnieść opór toczenia oraz pogorszyć prowadzenie. Zbyt wysokie ciśnienie także nie jest uniwersalnym rozwiązaniem: wpływa na kontakt z nawierzchnią, komfort i bezpieczeństwo. Należy stosować wartości zalecane przez producenta pojazdu.

Stalowe koła pociągu mają mały opór toczenia, ale słabszą przyczepność niż gumowa opona na suchej drodze. To kompromis. Kolej sprawnie przewozi ciężkie ładunki, lecz długi skład potrzebuje odpowiedniej drogi hamowania. Mały opór nie jest automatycznie synonimem pełnego bezpieczeństwa.

Łożyska ograniczają tarcie między obracającymi się częściami. Kulki lub wałeczki zastępują część ślizgania toczeniem, a smar rozdziela powierzchnie i odprowadza ciepło. Brudne, złe ustawione albo pozbawione smaru łożysko marnuje energię oraz może ulec uszkodzeniu.

Hamowanie jest przemianą energii

Hamulce wywierają moment przeciwny do obrotu kół. Tarcie w hamulcu zamienia energię ruchu przede wszystkim w energię wewnętrzną, czyli ogrzewa elementy. Następnie ciepło musi zostać oddane powietrzu. Powtarzane silne hamowanie może przegrzać układ i zmniejszyć jego skuteczność.

Całkowite zatrzymanie obejmuje co najmniej dwa etapy: drogę przebytą podczas reakcji oraz drogę właściwego hamowania. Jeśli reakcja trwa jedną sekundę, pojazd jadący 20 m/s przejedzie w tym czasie 20 metrów, zanim hamowanie w ogóle zacznie zmniejszać prędkość.

$$s_{\text{reakcji}} = v \cdot t = 20 \text{ m/s} \cdot 1 \text{ s} = 20 \text{ m}$$

Na mokrej, zaśnieżonej lub oblodzonej nawierzchni dostępna przyczepność może być mniejsza. Dlatego bezpieczny odstęp nie jest stałą liczbą niezależną od warunków. Kierowca uwzględnia pogodę, widoczność, stan opon, masę pojazdu i

możliwość niespodziewanej zmiany ruchu.

Koła samochodu rekordowego

Zwykła opona przy ekstremalnej prędkości napotyka ogromne obciążenia. Szybki obrót wywołuje naprężenia, a nagrzewanie może osłabiać materiał. Dlatego pojazdy rekordowe korzystają ze specjalnie projektowanych kół, czasem wykonanych z metalu zamiast typowej gumowej opony.

Koło nie jest drobnym dodatkiem do silnika. Musi przenosić ciężar, znosić drgania, utrzymywać kontakt z podłożem i obracać się bez rozpadu. Niewielkie niewyważenie przy wysokiej prędkości może wytworzyć gwałtowne, powtarzające się siły. Precyzja wykonania staje się warunkiem przetrwania.

Nawierzchnia toru rekordowego również jest częścią układu. Musi być długa, równa i wystarczająco nośna. Luźny materiał może zostać wyrzucony przez koła albo strumień gazów. Każda nierówność zmienia obciążenie pojazdu i może utrudnić utrzymanie kierunku.

Pożyteczny kompromis

Zmniejszenie tarcia w łożysku jest korzystne, ale zmniejszenie przyczepności opony do zera byłoby katastrofą. Zwiększenie docisku może poprawić kontakt kół, ale zwiększa obciążenie oraz często opór. Inżynier nie wybiera „najmniej” albo „najwięcej”; szuka wartości odpowiedniej do zadania.

Możesz zbadać opór toczenia bez wsiadania na pojazd. Puść ten sam zabawkowy samochodzik z łagodnej pochylni na różnych bezpiecznych powierzchniach. Nie zmieniaj wysokości startu. Zmierz drogę toczenia i wykonaj kilka powtórzeń. Wynik porównuj, ale nie nazywaj go dokładnym pomiarem współczynnika tarcia.

Jeśli samochodzik jedzie krócej po miękkim materiale, energia szybciej przechodzi w odkształcenia i ciepło. Jeżeli wyniki mocno się różnią, sprawdź prostoliniowość startu, stan kół i równość podłoża. Nieudana próba nie jest porażką; ujawnia zmienne, których wcześniej nie zauważono.

Zapamiętaj: tarcie może zarówno umożliwiać ruch, jak i go utrudniać. Opór toczenia pochłania energię, przyczepność pozwala przekazywać siłę, a hamowanie zamienia energię kinetyczną w inne postacie. Szybkość wymaga nie tylko rozpędzenia, lecz również kontrolowanego zatrzymania.

Powietrze potrafi mocno naciskać

Powietrze potrafi mocno naciskać

Przy powolnym spacerze niemal nie zauważasz oporu powietrza. Na rowerze staje się wyraźny, a przy prędkości samochodu dominuje nad wieloma innymi stratami. Powietrze ma masę, pęd i lepkość. Pojazd musi je rozsunąć, przyspieszyć i pozostawić za sobą zaburzony przepływ.

Aerodynamika bada ruch powietrza i siły między gazem a poruszającym się ciałem. Nie chodzi wyłącznie o kształt przypominający kroplę. Liczą się także powierzchnia czołowa, podwozie, koła, szczeliny, chłodzenie oraz zachowanie strugi po bokach i za pojazdem.

Równanie oporu

W szerokim zakresie ruchu opór aerodynamiczny można przybliżyć równaniem używanym przez inżynierów ^[8]:

$$F_D = (1/2) \rho v^2 C_D A$$

Gęstość powietrza oznacza ρ , prędkość względem powietrza v , współczynnik oporu C_D , a pole powierzchni odniesienia A . Wzór pokazuje, że opór rośnie z kwadratem prędkości. Podwojenie prędkości może dać około czterokrotny opór, jeśli inne warunki się nie zmienią.



Pojazd jadący 100 km/h przy bezwietrznej pogodzie odczuwa przepływ odpowiadający mniej więcej tej prędkości. Jeśli jedzie pod wiatr 20 km/h, prędkość względem powietrza wynosi około 120 km/h. Aerodynamikę interesuje właśnie ruch względem powietrza, a nie tylko względem drogi.

Załóżmy, że przy danej prędkości opór wynosi 500 N. Przy dwukrotnie większej prędkości uproszczony model daje 2000 N. Ponieważ moc potrzebna do pokonania siły to $F \cdot v$, zapotrzebowanie na moc aerodynamiczną rośnie w przybliżeniu z trzecią potęgą prędkości.

Przy dwukrotnie większej prędkości: $F_D \rightarrow 4 F_D$ $P_D = F_D v \rightarrow 8 P_D$

Kształt kieruje strugą

Tępy przód gwałtownie zatrzymuje część powietrza i tworzy obszar wysokiego ciśnienia. Za źle ukształtowanym pojazdem może powstać szeroki, chaotyczny ślad o niskim ciśnieniu. Różnica ciśnień działa do tyłu. Łagodny kształt pomaga utrzymać uporządkowany przepływ dłużej.

Nie zawsze wystarczy zaokrąglić przód. Tył ma ogromne znaczenie, bo decyduje, jak struga opuszcza nadwozie. Koła także zaburzają powietrze, a otwory chłodzące zwiększają opór. Projektant musi chłodzić maszynę, lecz każde wypuszczenie i wypuszczenie powietrza kosztuje energię.

Tuż przy powierzchni znajduje się warstwa przyścienna, w której lepkość powietrza silnie wpływa na prędkość przepływu. Warstwa może pozostać przyczepiona do nadwozia albo się

oderwać, tworząc większe zawirowania. Jej zachowanie jest ważne dla oporu i stabilności ^[20].

Dym w tunelu aerodynamicznym lub drobne nitki na modelu pozwalają zobaczyć kierunek przepływu. Współczesne zespoły wykorzystują również czujniki ciśnienia, komputerową mechanikę płynów i testy rzeczywiste. Każda metoda ma ograniczenia, dlatego dobre wyniki porównuje się między metodami.

Docisk i unoszenie

Powietrze może działać nie tylko do tyłu, lecz także w górę lub w dół. Samolot wykorzystuje siłę nośną, aby latać. Szybki samochód musi natomiast unikać niepożądanego unoszenia, które odciąża koła i utrudnia sterowanie. Czasem kształt wytwarza celowy docisk aerodynamiczny.

Większy docisk może zwiększać zdolność opon do przekazywania sił, lecz zwykle wiąże się z dodatkowym oporem. W pojeździe wyścigowym na zakrętach taki koszt może się opłacać. Samochód rekordowy jadący po prostej potrzebuje innej równowagi: ma być stabilny bez niepotrzebnego hamowania powietrzem.

Położenie środka parcia jest równie ważne jak wartość siły. Jeśli aerodynamiczna siła boczna działa daleko od środka masy, może obracać pojazd. Niewielki podmuch przy ogromnej prędkości nie jest drobną niedogodnością, dlatego analizuje się stateczność w wielu warunkach.

Gęstość, pogoda i wysokość

Gęstsze powietrze zwiększa opór przy tej samej prędkości i geometrii. Gęstość zależy między innymi od ciśnienia, temperatury i wilgotności. Ciepłe powietrze jest na ogół mniej gęste niż zimne przy podobnym ciśnieniu. Warunki wpływają również na pracę silnika zasysającego powietrze.

Wiatr boczny może wytwarzać siłę i moment obracający. Podmuchy są trudniejsze niż stały wiatr, bo szybko zmieniają obciążenie. Próba rekordowa wymaga więc nie tylko suchej, długiej nawierzchni, lecz również odpowiedniego okna pogodowego. Atmosfera jest częścią toru, choć jej nie widać.

Owady, pył i drobne uszkodzenia mogą zmieniać powierzchnię, ale nie każdy ślad powoduje dramatyczny efekt. Inżynier ocenia skalę zjawiska pomiarem, a nie strachem. Przy ekstremalnej prędkości kontrola powierzchni jest jednak szczegółowa, bo margines bezpieczeństwa może być niewielki.

Proste doświadczenie z oporem

Weź dwie jednakowe kartki. Jedną pozostaw płaską, drugą zgnieć w kulkę. Upuść je jednocześnie z niewielkiej wysokości w bezpiecznym miejscu. Płaska kartka zwykle spada wolniej, ponieważ ma dużą powierzchnię czołową i wywołuje większy opór względem swojego ciężaru.

Doświadczenie nie dowodzi, że kulka „nie ma oporu”. Pokazuje jedynie, że kształt i powierzchnia zmieniają wynik. Aby próba była lepsza, użyj kartek o tej samej masie, puszczaj je bez

nadawania prędkości i wykonaj powtórzenia. Ruch powietrza w pomieszczeniu może zakłócić rezultat.

Najważniejsza lekcja brzmi: powietrze przestaje być łagodnym tłem, gdy rośnie prędkość. Opór wzrasta mniej więcej z v^2 , a potrzebna moc aerodynamiczna zbliża się do zależności v^3 . Dlatego opływowy kształt jest nie ozdobą, lecz jednym z głównych warunków bicia rekordów.

Dźwięk jest ruchem ośrodka

Dźwięk jest ruchem ośrodka

Gdy klaszczesz, twoje dłonie zaburzają powietrze. Cząsteczki zostają ściśnięte, przekazują zaburzenie sąsiadkom, a potem wracają w pobliże swoich położeń. To zaburzenie rozchodzi się jako fala dźwiękowa. Powietrze nie pędzi od dłoni aż do ucha; przekazywana jest energia i informacja.

Dźwięk potrzebuje ośrodka: gazu, cieczy albo ciała stałego. W próżni nie ma cząsteczek, które mogłyby przekazać falę, dlatego zwykły dźwięk się tam nie rozchodzi. Prędkość fali zależy od właściwości ośrodka, a w powietrzu szczególnie od temperatury ^[9].

Ile wynosi prędkość dźwięku

W suchym powietrzu przy temperaturze około 20°C prędkość dźwięku wynosi w przybliżeniu 343 m/s, czyli około 1235 km/h ^[9]. Nie jest to jedna niezmienna wartość obowiązująca wszędzie. W chłodniejszym powietrzu fala rozchodzi się wolniej, w cieplejszym szybciej.

Praktyczne przybliżenie dla zwykłych temperatur zapisuje się tak, gdzie T jest temperaturą w stopniach Celsjusza:

$$c \approx 331 \text{ m/s} + 0,6 T$$

Dla 20°C otrzymujesz $331 + 0,6 \cdot 20 = 343 \text{ m/s}$. Dla 0°C wynik to około 331 m/s. Różnica pokazuje, dlaczego rekordowego



wyniku naddźwiękowego nie powinno się oceniać przez porównanie z jedną zapamiętaną liczbą bez uwzględnienia warunków atmosferycznych.

Prędkość światła jest nieporównanie większa niż prędkość dźwięku. Dlatego błysk odległej burzy widzisz niemal natychmiast, a grzmot dociera później. Jeżeli dźwięk przybliżysz do 340 m/s, trzy sekundy opóźnienia odpowiadają odległości około jednego kilometra.

Liczba Macha

Zamiast podawać tylko km/h, przy szybkich przepływach używa się liczby Macha. Jest ona stosunkiem prędkości obiektu lub przepływu do lokalnej prędkości dźwięku. Mach 1 oznacza prędkość równą dźwiękowi w danych warunkach, a Mach 2 — dwukrotnie większą.

$$M = v/c$$

Jeżeli pojazd jedzie 340 m/s, a lokalna prędkość dźwięku wynosi 335 m/s, liczba Macha to około 1,015. Pojazd jest wtedy nieznacznie naddźwiękowy, nawet jeśli nie osiągnął 343 m/s. Słowo lokalna jest w tym zdaniu bardzo ważne.

$$M = \frac{340}{335} \approx 1,015$$

Zakres bliski Mach 1 nazywa się transonicznym. Nie wszystkie fragmenty powietrza wokół pojazdu osiągają tę samą prędkość jednocześnie. Przepływ może lokalnie przyspieszać nad powierzchnią, przez co na jednym obiekcie współistnieją

obszary poddźwiękowe i naddźwiękowe.

Fale uderzeniowe

Przy małej prędkości zaburzenia ciśnienia rozchodzą się przed pojazdem i „informują” powietrze o jego nadejściu. Gdy pojazd porusza się szybciej niż dźwięk, nie może wystać takiej informacji dostatecznie daleko przed siebie. Fale skupiają się w cienkich obszarach gwałtownej zmiany ciśnienia.

Taki obszar to fala uderzeniowa. Ciśnienie, gęstość i temperatura zmieniają się w niej bardzo szybko. Fala nie jest ścianą z materii, przez którą trzeba się „przebić” raz na zawsze. Towarzyszy poruszającemu się obiektowi, dopóki warunki przepływu ją wytwarzają ^[10].

Popularne określenie bariera dźwięku powstało, ponieważ wczesne szybkie samoloty napotykały w pobliżu Mach 1 gwałtowne zmiany oporu, stateczności i sterowności. Nie była to niewidzialna zaporą. Był to zestaw trudnych zjawisk, których początkowo nie umiano wystarczająco dobrze przewidywać.

Grom dźwiękowy

Fale uderzeniowe rozchodzące się od naddźwiękowego pojazdu mogą dotrzeć do obserwatora jako gwałtowna zmiana ciśnienia nazywana gromem dźwiękowym. Nie jest to pojedynczy hałas powstający tylko w chwili przekraczania Mach 1. Obiekt naddźwiękowy stale wytwarza układ fal ^[10].

Obserwator słyszy huk, gdy powierzchnia tego układu przechodzi przez jego położenie. Z tego powodu samolot może znajdować się już daleko, gdy dźwięk dociera na ziemię. Kształt, rozmiar, wysokość i tor ruchu wpływają na sygnał odczuwany w danym miejscu.

Przy pojeździe lądowym fala oddziałuje również z podłożem. Odbicia i pył komplikują przepływ. Maszyna nie ma swobody samolotu lecącego wysoko: musi pozostać stabilna kilka centymetrów nad nawierzchnią, utrzymać kierunek i nie stworzyć niebezpiecznej siły unoszącej.

Bezpieczny model fali

Falę możesz obserwować na wodzie, przesuwając powoli palec lub mały przedmiot po powierzchni w misce. Okręgi rozchodzą się od kolejnych położenia źródła. To nie jest dokładny model fali uderzeniowej w gazie, lecz pomaga zobaczyć, że ruch źródła zmienia układ rozchodzących się zaburzeń.

Nie próbuj wytwarzać bardzo głośnych huków ani przykładać źródeł dźwięku do uszu. Nauka o falach nie wymaga narażania słuchu. Bezpieczniej analizować nagrania na umiarkowanym poziomie głośności, obserwować drgania cienkiej folii albo używać prostych symulacji.

Rozwiązany przykład: jeśli fala dźwiękowa przebywa 686 metrów w temperaturze około 20°C, potrzebuje mniej więcej dwóch sekund. Obliczasz $t = s/c = 686/343$. Ten sam schemat drogi, czasu i prędkości działa dla roweru, dźwięku i pojazdu rekordowego.

$$t = 686 \frac{m}{343} m/s = 2s$$

Zapamiętaj: prędkość dźwięku zależy od ośrodka i warunków, Mach porównuje prędkość z wartością lokalną, a fala uderzeniowa jest gwałtowną zmianą w przepływie.

Przekroczenie bariery dźwięku na łodzi oznaczało opanowanie aerodynamiki, napędu, pomiaru i stabilności jednocześnie.

Ciąg z rozpędzonego strumienia

Ciąg z rozpędzonego strumienia

Zwykły samochód przekazuje siłę na drogę przez napędzane koła. Pojazd odrzutowy działa inaczej: silnik przyspiesza strumień gazu do tyłu, a reakcja pcha silnik do przodu. Ta siła nazywa się ciągiem i wynika ze zmiany pędu przepływającej masy ^[11].

Pęd ciała to iloczyn masy i prędkości. Możesz silnie zmienić pęd, przyspieszając małą masę do bardzo dużej prędkości albo większą masę do mniejszej prędkości. Silnik odrzutowy wykonuje to zadanie w sposób ciągły, zasysając, sprężając i wyrzucając powietrze.

Droga powietrza przez silnik

Wlot kieruje powietrze do sprężarki. Obracające się stopnie sprężarki podnoszą ciśnienie. W komorze spalania paliwo miesza się z powietrzem i uwalnia energię chemiczną. Gorące gazy przepływają przez turbinę, która napędza sprężarkę, a następnie wypływają przez dyszę ^[11].

1. Wlot porządkuje dopływ powietrza.
2. Sprężarka zwiększa jego ciśnienie.
3. Spalanie podnosi temperaturę gazów.
4. Turbina odbiera część energii do napędu sprężarki.
5. Dysza przyspiesza strumień wylotowy.



Turbina nie zabiera całej energii, bo część musi pozostać w strumieniu wylotowym. Dysza zamienia dostępne ciśnienie i energię cieplną na dużą prędkość gazu. Materiały pracują w wysokiej temperaturze, dlatego konstrukcja wymaga chłodzenia, wytrzymałych stopów i bardzo dokładnego wykonania.

Uproszczony ciąg zależy od masowego przepływu oraz różnicy prędkości strumienia. Pełne równanie uwzględnia także różnicę ciśnień na wylocie, ale prosty zapis dobrze pokazuje zasadę:

$$F_{\text{ci}} \approx \dot{m} (v_{\text{wylotu}} - v_{\text{wlotu}})$$

Jeżeli silnik przyspiesza 100 kg powietrza na sekundę o 200 m/s, uproszczona wartość ciągu wynosi 20 000 N. Rzeczywiste obliczenie wymaga dokładnych warunków, geometrii i ciśnień. Przykład pokazuje jednak, że liczy się masa przepływu w każdej sekundzie, nie jednorazowy „wybuch”.

Samolot, rakietę i samochód odrzutowy

Silnik turboodrzutowy pobiera tlen z atmosfery, więc potrzebuje powietrza. Rakietę wiezie utleniacz razem z paliwem i dlatego może działać poza atmosferą. Samochód odrzutowy korzystający z silnika lotniczego pozostaje na ziemi, ale jego napęd jest bliższy samolotowi niż zwykłemu autu.

Koła takiego samochodu mogą nie przekazywać głównej siły napędowej. Toczą się, podtrzymują pojazd i umożliwiają kierowanie, podczas gdy ciąg pochodzi z gazów. Usuwa to ograniczenie trakcji napędowej, ale nie usuwa problemów z kołami, podłożem, stabilnością i oporem powietrza.

Odrzut nie oznacza braku kontaktu z ziemią. Pojazd nadal musi pozostać pojazdem lądowym i utrzymywać kontrolowany kontakt z nawierzchnią zgodnie z regułami danej kategorii. Jeśli aerodynamika zacznie go unosić, rekordowa maszyna może utracić sterowność zamiast zamienić się w samolot.

Wlot przy prędkości naddźwiękowej

Sprężarka nie może otrzymać dowolnie chaotycznego strumienia. Wlot musi dostarczyć powietrze o odpowiednich parametrach. Przy dużej prędkości przed wlotem i wewnątrz niego powstają fale uderzeniowe. Ich położenie wpływa na ciśnienie, przepływ i stabilność pracy silnika.

Jeśli przepływ do sprężarki zostanie silnie zaburzony, może dojść do utraty stabilności sprężania. Dlatego kształt wlotu jest częścią silnika, choć z zewnątrz wygląda jak otwór w nadwoziu. Projektuje się go razem z całym pojazdem i przewidywanym zakresem prędkości.

Strumień wylotowy także oddziałuje z otoczeniem. Jest bardzo szybki, gorący i głośny. Może podnosić pył oraz działać na nawierzchnię. Układ silników trzeba więc umieścić tak, aby siła ciągu była właściwie skierowana, a spaliny nie uszkadzały ważnych elementów pojazdu.

Ciąg kontra opór

Pojazd przyspiesza, gdy ciąg przewyższa sumę oporów. W miarę wzrostu prędkości opór aerodynamiczny rośnie, więc różnica maleje. Gdy ciąg i opór się zrównają, przyspieszenie wzdłuż toru spada do zera. To jedna z dróg do osiągnięcia maksymalnej prędkości.

$$F_w = F_{\text{ciągu}} - F_{\text{oporu}}$$

Założmy, że dwa silniki dają razem 200 kN ciągu, a wszystkie opory przy pewnej prędkości wynoszą 160 kN. Wypadkowa wynosi 40 kN do przodu. Dla masy 10 000 kg chwilowe przyspieszenie w tym uproszczeniu to 4 m/s².

$$a = 40000 \frac{N}{10000 kg} = 4 m/s^2$$

W dalszej części przejazdu opory mogą wzrosnąć do 195 kN. Zostaje jedynie 5 kN siły wypadkowej, więc przyspieszanie jest słabsze. To dlatego ostatnie kilometry na godzinę bywają najtrudniejsze: niemal cała zdolność silnika służy już walce z powietrzem.

Hałas, temperatura i bezpieczeństwo

Silnik odrzutowy wytwarza hałas zdolny uszkodzić słuch. Testy wymagają dużej strefy bezpieczeństwa, ochrony słuchu, procedur pożarowych i zdalnych pomiarów. Nie jest to urządzenie do domowych eksperymentów. Jego fizykę można bezpiecznie poznawać dzięki modelom, danym i obserwacji

przepływu.

Wysoka temperatura obciąża komorę spalania, turbinę i dyszę. Części rozszerzają się cieplnie, a wirniki obracają się bardzo szybko. Awaria małej części może uszkodzić sąsiednie elementy, dlatego prowadzi się inspekcje, badania materiałowe i próby stopniowo zwiększające obciążenie.

Najważniejsza myśl: silnik odrzutowy nie tworzy siły „z niczego”. Zmienia pęd strumienia gazów, wykorzystując energię paliwa. W samochodzie rekordowym ogromny ciąg musi współpracować z wlotami, aerodynamiką, kołami, podłożem i systemami zatrzymania. Sam silnik nie bije rekordu.

Samochód, który pokonał Mach 1

Samochód, który pokonał Mach 1

15 października 1997 roku pojazd ThrustSSC ustanowił oficjalny rekord prędkości na lądzie, osiągając średnią 1227,985 km/h w dwóch wymaganych przejazdach. Kierował nim Andy Green. Wynik został uznany za pierwsze oficjalne przekroczenie bariery dźwięku przez pojazd lądowy ^[12].

Rekord ustanowiono na rozległej, płaskiej powierzchni Black Rock Desert w Stanach Zjednoczonych. Nie była to podróż drogowa ani wyścig obok innych samochodów. Była to kontrolowana próba pomiarowa na specjalnie przygotowanym torze, z zespołem technicznym i strefami bezpieczeństwa.

Dlaczego ThrustSSC wyglądał inaczej

ThrustSSC przypominał bardziej samolot bez skrzydeł niż samochód rodzinny. Miał długie nadwozie, cztery specjalne metalowe koła i dwa silniki turbodrzutowe Rolls-Royce Spey umieszczone po bokach. Układ musiał zachować kierunek oraz ograniczać niepożądane unoszenie ^[14].

Dwa silniki dawały ogromny ciąg, ale stwarzały też pytanie o symetrię. Jeśli jeden działałby inaczej niż drugi, różnica sił mogłaby obrócić pojazd. Rozmieszczenie napędu, sterowanie i procedury awaryjne musiały więc uwzględniać zachowanie nie



tylko podczas idealnej pracy.

Metalowe koła nie były napędzane przez silniki. Ich zadaniem było przenoszenie obciążeń, utrzymywanie kontaktu z powierzchnią i umożliwienie kierowania. Przy prędkościach bliskich Mach 1 zwykle pneumatyczne opony nie nadawały się do takiego zastosowania ze względu na obroty, temperaturę i naprężenia.

Kierowanie przy takiej prędkości musi być delikatne. Gwałtowny skręt wytworzyłby ogromne siły boczne. Sterowanie nie przypomina omijania przeszkód na ulicy; tor powinien być oczyszczony, a kierowca wykonuje małe korekty, korzystając z oznaczonej linii i informacji zespołu.

Dwa przejazdy, nie jeden błysk

W oficjalnych rekordach nie wystarcza pojedynczy szczyt prędkości. Przepisy określają kategorię, odcinek pomiarowy, dokładność czasu i sposób obliczania wyniku. W rekordach lądowych stosuje się przejazdy w przeciwnych kierunkach, aby ograniczyć wpływ wiatru i nachylenia ^[13].

Średnia dwóch przejazdów sprawia, że sprzyjający wiatr w jednym kierunku nie daje całej przewagi. Drugi przejazd odbywa się przeciw podobnemu wiatrowi. Warunki mogą zmienić się pomiędzy próbami, dlatego regulamin ogranicza czas i wymaga starannej dokumentacji.

Jeżeli wyniki dwóch przejazdów wyniosłyby 1210 km/h i 1240 km/h, średnia byłaby równa 1225 km/h. Nie wybiera się szybszego przejazdu. Rekord nagradza wynik możliwy do

potwierdzenia w obu kierunkach, a nie najbardziej efektywną liczbę zauważoną przez chwilę.

$$V_{rekordu} = (1210 + 1240)/2 = 1225 \text{ km/h}$$

Wartość rekordowa ThrustSSC także była średnią zgodną z zasadami, a nie maksymalną chwilową prędkością na wyświetlaczu ^[12]. To rozróżnienie chroni sens porównań. Bez wspólnej procedury dwa zespoły mogłyby użyć odmiennych definicji i oba ogłosić zwycięstwo.

Przejęcie przez zakres transoniczny

Podczas rozpędzania ThrustSSC przechodził od ruchu poddźwiękowego przez zakres transoniczny do naddźwiękowego. Układ fal uderzeniowych zmieniał się wraz z prędkością. Zmieniały się również rozkład ciśnień, opór i siły działające blisko podłoża.

Samochód nie mógł unieść się jak samolot. Aerodynamicy musieli pilnować pionowej równowagi oraz momentów pochylających. Nawet gdy całkowita siła pionowa wydawała się właściwa, jej nierówny podział między przód i tył mógł odciążyć jedną parę kół.

Fala uderzeniowa uderzała również w powierzchnię toru, wzbijając pył. Obserwowane ślady pomagały badaczom rozumieć przepływ, ale pył był też zagrożeniem dla widoczności i silników. Tor musiał być sprawdzany pod kątem nierówności oraz obcych przedmiotów.

Kierowca doświadczał długiego przyspieszania, hałasu, drgań i ograniczonej widoczności. Jego zadanie nie polegało na bohaterskim improwizowaniu. Musiał działać według przeciwiczonych procedur, odczytywać zachowanie maszyny i przerwać próbę, gdy warunki przekraczały ustalone granice.

Jak zatrzymać rekord

Osiągnięcie odcinka pomiarowego było dopiero połową zadania. Pojazd potrzebował wielu kilometrów na wytracenie prędkości. Najpierw zmniejszano ciąg i wykorzystywano opór aerodynamiczny. Następnie można było uruchomić spadochrony hamujące, a hamulce kół stosować przy niższej prędkości.

Zbyt wczesne otwarcie spadochronu w nieodpowiednich warunkach mogłoby wywołać zbyt duże obciążenie albo utratę stabilności. Zbyt późne pozostawiłoby za mało miejsca. Sekwencję oparto na zakresach prędkości i procedurach, a systemy projektowano z myślą o możliwych awariach.

Po przejeździe zespół sprawdzał pojazd przed kolejną próbą. Rekord wymagał powrotu i drugiego przejazdu w określonym czasie, więc kontrola musiała być dokładna oraz sprawna. Inżynieria rekordowa łączy cierpliwość z presją zegara — pośpiech nie może usunąć ważnej kontroli.

Co naprawdę pobiło rekord

Łatwo powiedzieć, że rekord pobiły dwa silniki. Dokładniej: pobił go cały system. Silniki dostarczyły ciąg, nadwozie zarządzało przepływem, koła przeniosły obciążenia, kierowca utrzymał tor, a aparatura pomiarowa potwierdziła wynik. Bez któregośkolwiek elementu nie byłoby oficjalnego rekordu.

Wynik 1227,985 km/h można przeliczyć na około 341,1 m/s. To ponad 340 metrów w każdej sekundzie. Na odcinku długości jednego kilometra pojazd przebywałby przy takiej średniej mniej niż trzy sekundy. W tym czasie układy musiały działać stabilnie, nie tylko imponująco.

$$v = 1227,985 \text{ km/h} / 3,6 \approx 341,1 \text{ m/s}$$

ThrustSSC pokazał, że bariera dźwięku na lądzie była problemem możliwym do rozwiązania, ale nie stała się przez to łatwa. Rekord pozostał punktem odniesienia dla kolejnych projektów. Każdy następny zespół musi zmierzyć się z jeszcze większą energią, oporem, ryzykiem i potrzebą wiarygodnego pomiaru.

Rekord zaczyna się od wymagań

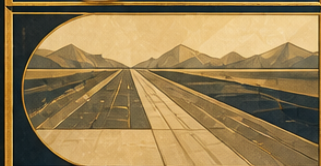
Rekord zaczyna się od wymagań

Inżynieria nie zaczyna się od rysowania najbardziej niezwykłego pojazdu. Najpierw trzeba zdefiniować zadanie. Jaka kategoria rekordu jest celem? Jaki odcinek będzie mierzony? Jakie są warunki nawierzchni, limit czasu między przejazdami i wymagania dotyczące kontaktu z ziemią? Reguły zmieniają konstrukcję ^[13].

Wymagania powinny być mierzalne. Zdanie „pojazd ma być bardzo stabilny” jest zbyt ogólne. Lepsze określa dopuszczalne odchylenie toru, obciążenie kół, prędkość wiatru i reakcję na awarię. Gdy wymagania są jasne, można sprawdzić, czy projekt je spełnia.

Od pytania do modelu

Zespół dzieli wielki problem na mniejsze: napęd, aerodynamikę, konstrukcję nośną, koła, sterowanie, paliwo, pomiar, hamowanie i bezpieczeństwo. Każda grupa pracuje nad swoim obszarem, ale wyniki trzeba łączyć. Zmiana jednego elementu prawie zawsze wpływa na pozostałe.



Większy silnik może zwiększyć ciąg, ale dodaje masę, potrzebuje więcej paliwa i powietrza, wydziela więcej ciepła oraz wymaga większej konstrukcji. Większe wloty karmią silnik, lecz podnoszą opór. To przykład kompromisu, czyli wyboru najlepszego układu, a nie najlepszego pojedynczego elementu.

Model matematyczny przewiduje zachowanie jeszcze przed zbudowaniem pojazdu. Może zacząć się od prostego bilansu ciągu i oporu, a potem uwzględniać zmienną masę, pogodę i geometrię. Model nie jest rzeczywistością. Jest celowym uproszczeniem, które trzeba sprawdzać danymi.

$$F_{wypadkowa}(v) = F_{napędu}(v) - F_{oporów}(v)$$

Symulacja komputerowa pozwala przeprowadzić tysiące wirtualnych prób, ale zły model może szybko wyprodukować tysiące mylących wyników. Dlatego inżynier pyta, jakie założenia wprowadzono, czy siatka obliczeniowa jest wystarczająca i czy wynik zgadza się z eksperymentem.

Testuj stopniowo

Nie zaczyna się od pełnej prędkości. Najpierw bada się materiały, części i podzespoły. Potem wykonuje się próby statyczne silnika, testy toczenia, przejazdu z małą prędkością i kolejne szybsze etapy. Po każdym etapie dane decydują, czy wolno przejść dalej.

Stopniowanie ogranicza skutki błędu. Jeśli czujnik pokazuje drgania koła wcześniej niż przewidywano, zespół może zatrzymać program, znaleźć przyczynę i zmienić konstrukcję.

Zignorowanie sygnału, bo „prawie osiągnęliśmy cel”, zamienia ambicję w nieodpowiedzialność.

Próba może się nie udać bez katastrofy. Silnik może nie osiągnąć wymaganego ciągu, pogoda przerwie przejazd albo dane okażą się niepełne. Taki wynik kosztuje czas, ale dostarcza informacji. Dobra kultura inżynierska pozwala zgłaszać problem, zamiast ukrywać go dla zachowania pozorów sukcesu.

Kontrolna lista nie zastępuje wiedzy, lecz chroni przed pominięciem czynności pod presją. Obejmuje stan nawierzchni, koła, paliwo, instalację przeciwpożarową, komunikację, pogodę i gotowość ekip ratowniczych. Każda pozycja powinna mieć odpowiedzialną osobę i sposób potwierdzenia.

Pomiar i telemetria

Pojazd rekordowy może mieć czujniki prędkości, przyspieszenia, ciśnienia, temperatury, drgań i obciążenia. Dane przesyła się lub zapisuje do późniejszej analizy. Jeden czujnik bywa zawodny, dlatego kluczowe wielkości mierzy się niezależnymi metodami i porównuje.

Czujnik nie podaje „czystej prawdy”. Ma zakres, rozdzielczość, częstotliwość próbkowania i niepewność. Jeśli mierzy zbyt rzadko, może pominąć krótkie drganie. Jeśli jego zakres jest zbyt mały, odczyt osiągnie granicę i przestanie pokazywać rzeczywisty wzrost.

Kalibracja polega na porównaniu przyrządu ze znanym wzorcem. Bez niej liczby mogą wyglądać dokładnie, ale być przesunięte. Oficjalny pomiar rekordu musi spełniać wymagania organizacji zatwierdzającej, a niezależni obserwatorzy i dokumentacja pomagają zapewnić wiarygodność ^[13].

Załóżmy, że system rejestruje położenie co 0,1 s. Między dwoma zapisami pojazd przemieścił się o 30 m. Średnia prędkość w tym krótkim przedziale wynosi 300 m/s. To wartościowy pomiar chwilowego ruchu, ale nie musi być oficjalną średnią na wymaganym odcinku.

$$v = 30 \frac{m}{0,1 s} = 300 m/s = 1080 km/h$$

Myślenie o awarii

Bezpieczeństwo nie polega na wierze, że nic się nie zepsuje. Polega na pytaniu: co stanie się po awarii? Jeśli jeden czujnik zamilknie, czy drugi wykryje problem? Jeśli nie otworzy się pierwszy spadochron, czy istnieje zapasowy? Jeśli wiatr wzrośnie, kto przerywa start?

Analiza zagrożeń ocenia prawdopodobieństwo zdarzenia i dotkliwość skutków. Rzadkie zdarzenie o katastrofalnych konsekwencjach nadal wymaga uwagi. Zespół może zmienić projekt, dodać osłonę, stworzyć redundancję albo ustalić ostrzejszą granicę przerwania próby.

Redundancja oznacza zapasową drogę wykonania ważnej funkcji. Nie zawsze polega na prostym podwojeniu części, bo dwa identyczne elementy mogą ulec tej samej wadzie. Lepsze

zabezpieczenie czasem wykorzystuje inną technologię pomiaru lub oddzielne zasilanie.

Człowiek także jest elementem systemu. Interfejs musi przekazywać najważniejsze informacje bez przeciążania uwagi. Procedury powinny być ćwiczone, komunikaty jednoznaczne, a odpowiedzialność za decyzję jasna. Zmęczenie, stres i presja sukcesu są rzeczywistymi czynnikami ryzyka.

Rekord jako praca zespołowa

Przy wielkim projekcie nie ma jednej osoby rozumiejącej każdy szczegół równie głęboko. Potrzebna jest współpraca aerodynamików, mechaników, chemików, programistów, meteorologów, ratowników i specjalistów od pomiaru. Ważna jest umiejętność tłumaczenia problemu między dziedzinami.

Spór techniczny nie musi być konfliktem osobistym. Jeśli dane podważają pomysł, zmiana zdania jest oznaką siły.

Najgroźniejszy jest zespół, w którym nikt nie odważa się powiedzieć, że wynik wygląda źle. Ciekawość i ostrożność powinny działać razem.

Przepisy FIA dotyczące rekordów tworzą wspólną podstawę klasyfikacji i pomiaru^[13]. Regulamin nie zabija wynalazczości. Określa, co właściwie ma zostać osiągnięte, aby wynik można było porównać z wcześniejszymi. Innowacja rozwija się wewnątrz jasno opisanych warunków.

Zapamiętaj: rekord jest końcem długiego łańcucha decyzji. Wymagania prowadzą do modeli, modele do testów, testy do poprawek, a dopiero potem przychodzi oficjalna próba.

Najbardziej inżynierskie słowo nie brzmi „szybciej”, lecz „dlaczego” — i zaraz po nim „jak to sprawdzimy?”.

Najlżejszy pierwiastek

Najlżejszy pierwiastek

Wodór jest najprostszym i najlżejszym pierwiastkiem. Pojedynczy atom ma jeden proton i jeden elektron, a wodór cząsteczkowy występuje jako H_2 . Na Ziemi jest zwykle związany w wodzie i związkach organicznych, więc paliwowy wodór trzeba najpierw wyprodukować ^[15].

Wodór nie jest pierwotnym źródłem energii podobnym do promieniowania słonecznego. Jest nośnikiem energii. Trzeba zużyć energię, aby go uzyskać, sprężyć, skroplić lub przetransportować. Potem można odzyskać część tej energii w ogniwie paliwowym albo przez spalanie.

Spalanie wodoru

W reakcji z tlenem wodór może tworzyć wodę i uwalniać energię. Zbilansowane równanie chemiczne wygląda tak:



Dwie cząsteczki wodoru reagują z jedną cząsteczką tlenu, tworząc dwie cząsteczki wody. Liczba atomów każdego pierwiastka jest taka sama po obu stronach równania. Energia nie występuje tu jako atom; uwalnia się wskutek przejścia do układu wiązań o niższej energii.



Spalanie wodoru nie emituje dwutlenku węgla z samego paliwa, ponieważ wodór nie zawiera węgla^[15]. W wysokiej temperaturze powietrza mogą jednak powstawać tlenki azotu. Całkowity wpływ środowiskowy zależy również od sposobu produkcji wodoru, energii pomocniczej i wycieków.

Płomień, wysokie ciśnienie i łatwa palność wymagają specjalnych czujników, wentylacji, zaworów oraz procedur. Wodór ma bardzo małe cząsteczki i może wydostawać się przez nieszczelności trudne dla innych gazów. Bezpieczeństwo musi być zaprojektowane, a nie dopisane po zbudowaniu pojazdu.

Ogniwo paliwowe

Ogniwo paliwowe nie spala paliwa płomieniem. W typowym ogniwie z membraną protonowymienną wodór jest rozdzielany na protony i elektrony. Elektrony płyną zewnętrznym obwodem, wykonując pracę elektryczną, a protony przechodzą przez membranę. Po drugiej stronie powstaje woda^[16].

wodór -> ogniwo paliwowe -> energia elektryczna -> silnik elektryczny -> koła

Ogniwo paliwowe zasila silnik elektryczny, więc koła mogą być napędzane podobnie jak w pojeździe bateryjnym. Różnica dotyczy magazynowania energii. Zamiast przechowywać większość energii w akumulatorze, pojazd wiezie wodór i wytwarza elektryczność na bieżąco.

Układ zwykle ma także niewielki akumulator lub superkondensator. Pomaga on podczas gwałtownego zapotrzebowania na moc i może przyjmować energię z hamowania odzyskowego. Ogniwo, zbiornik, chłodzenie, elektronika oraz napęd tworzą jeden system, którego masa i sprawność muszą być bilansowane.

Zaletą ogniwa jest bezpośrednia przemiana energii chemicznej w elektryczną bez klasycznego cyklu silnika cieplnego. Nadal występują straty związane z reakcjami, oporem elektrycznym, sprężaniem powietrza, chłodzeniem i sterowaniem. Słowo „bezpośrednia” nie znaczy „bez strat”.

Skąd bierze się wodór

Wodór może być produkowany różnymi metodami. Obecnie duża część światowej produkcji pochodzi z paliw kopalnych, co wiąże się z emisjami gazów cieplarnianych ^[18]. Można też rozdzielać wodę w elektrolizerze przy użyciu energii elektrycznej ^[17].



Jeśli energia elektryczna do elektrolizy pochodzi ze źródeł niskoemisyjnych, ślad emisji może być znacznie mniejszy niż przy produkcji z paliw kopalnych. Nie wystarczy więc zapytać, co wydobywa się z rury wydechowej. Trzeba zbadać cały cykl od wytworzenia energii do ruchu kół.

Nazwy kolorystyczne wodoru, takie jak zielony, szary czy niebieski, są skrótami opisującymi sposoby produkcji, ale ich

definicje bywają różne. Dokładniejsza ocena podaje zużycie energii i emisje na jednostkę wyprodukowanego wodoru zamiast polegać wyłącznie na kolorowej etykiecie.

Sprężenie wodoru także wymaga energii. Skroplenie wymaga bardzo niskiej temperatury i izolowanego zbiornika. Wybór postaci magazynowania zależy od zastosowania. Rekordowy pojazd może zaakceptować rozwiązanie niepraktyczne dla szkolnego autobusu, jeśli jego zadaniem jest krótka, specjalna próba.

Wodór w pojazdach rekordowych

W 2009 roku eksperymentalny Venturi Buckeye Bullet 2 z wodorowym ogniwem paliwowym osiągnął rekordową średnią 487,672 km/h dla swojej kategorii na lotnym kilometrze ^[19]. Nie pobił ogólnego rekordu ThrustSSC, ponieważ należał do innej klasy napędu i osiągnął inną prędkość.

To rozróżnienie jest kluczowe. „Najszybszy pojazd wodorowy w kategorii ogniw paliwowych” nie znaczy „najszybszy pojazd lądowy bez żadnego dodatku”. Rekordy technologiczne pozwalają porównywać podobne rozwiązania i rozwijać nowe układy, zanim zaczną rywalizować o najwyższy wynik ogólny.

487,672 km/h odpowiada około 135,46 m/s. W ciągu jednej sekundy pojazd pokonywał więc długość większą niż typowe boisko piłkarskie. Nadal była to prędkość wyraźnie poddźwiękowa, lecz ogromna dla samochodu wykorzystującego wodorowe ogniwo paliwowe.

$$v = \frac{487,672}{3,6} \approx 135,46 \text{ m/s}$$

Co wodór zmienia, a czego nie

Wodór zmienia sposób magazynowania i przetwarzania energii. Może zasilać ogniwo paliwowe albo silnik spalający wodór. Nie usuwa praw Newtona, oporu aerodynamicznego, energii kinetycznej ani konieczności hamowania. Każdy pojazd nadal musi pokonać te same podstawowe ograniczenia fizyczne.

Duża energia wodoru na kilogram paliwa brzmi korzystnie, ale wodór ma małą gęstość objętościową. Zbiorniki i osprzęt zajmują miejsce oraz dodają masę. Ocena samego paliwa bez zbiornika byłaby jak ważenie zeszytu bez okładki i ogłaszenie, że cały plecak jest lekki.

Nie ma jednego napędu najlepszego dla wszystkich zadań. Bateria może być dobra dla krótszych tras i łatwego dostępu do elektryczności, wodór może być badany tam, gdzie liczy się szybkie uzupełnianie lub inny profil masy, a transport publiczny może korzystać z wielu rozwiązań zależnie od systemu.

Zapamiętaj: wodór jest nośnikiem, a jego wpływ zależy od produkcji, przechowywania i wykorzystania. Ogniwo paliwowe wytwarza elektryczność elektrochemicznie, spalanie wykorzystuje płomień, a oba warianty mają odmienne wymagania. Pytanie „czy wodór jest czysty?” zawsze potrzebuje dopowiedzenia: „w jaki sposób powstał?”.

Wielka fizyka w zwykłym dniu

Wielka fizyka w zwykłym dniu

Po rekordach przekraczających tysiąc kilometrów na godzinę rower może wydawać się skromny. Jednak działają w nim te same prawa: siła, przyspieszenie, energia, moc, tarcie i opór powietrza. Szkolny autobus także nie potrzebuje silnika odrzutowego, aby stać się znakomitym laboratorium fizyki.

Nauka nie polega na zapamiętywaniu osobnych reguł dla każdego pojazdu. Największą siłą modeli fizycznych jest to, że jeden zestaw pojęć wyjaśnia bardzo różne skale. Zmieniają się liczby, materiały i rozwiązania, lecz energia nadal się zachowuje, a wypadkowa siła nadal zmienia ruch.

Fizyka roweru

Naciskając pedały, wykonujesz pracę mięśniami. Mechanizm korbowy obraca przednią zębatkę, łańcuch przekazuje siłę, a tylna zębatka napędza koło. Opona naciska drogę do tyłu, a droga działa na rower do przodu. Bez wystarczającej przyczepności koło się ślizga.

Przełożenie zmienia relację między siłą na pedale a obrotami koła. Niski bieg ułatwia ruszanie i podjazd, lecz wymaga wielu obrotów pedałów. Wysoki bieg pozwala pokonać większy odcinek na obrót, ale wymaga większej siły. Przekładnia nie tworzy energii; zmienia sposób jej przekazywania.



Podczas jazdy pod górę zwiększasz energię potencjalną grawitacji. Na zjeździe energia ta może przejść w kinetyczną, dlatego rower przyspiesza nawet bez pedałowania. Hamowanie zamienia później część energii w ciepło. Ten sam łańcuch przemian dotyczy pojazdu rekordowego, tylko przy innych wartościach.

$$E_p = m g h$$

Dla roweru z osobą o łącznej masie 60 kg i podjazdu o wysokości 10 m przyrost energii potencjalnej wynosi około 5886 J. W uproszczeniu używasz $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Rzeczywista praca mięśni jest większa, bo pokonujesz także opory i występują straty.

$$\Delta E_p = 60 \text{ kg } 9,81 \text{ m/s}^2 10 \text{ m} = 5886 \text{ J}$$

Pozycja ciała wpływa na aerodynamikę. Bardziej wyprostowana sylwetka ma zwykle większą powierzchnię czołową niż pochylona. Nie należy jednak poświęcać widoczności i kontroli dla odrobiny szybkości. Na drogach najważniejsze są przepisy, sprawny rower, kask, przewidywalność i dostosowanie prędkości do warunków.

Autobus jako układ fizyczny

Autobus ma dużą masę, więc zmiana jego prędkości wymaga znacznej siły i energii. Gdy rusza, pasażerowie odczuwają bezwładność. Gdy hamuje, pasy i uchwyty pomagają zmieniać ruch ciał wraz z pojazdem. Dlatego podczas jazdy należy siedzieć lub trzymać się zgodnie z zasadami bezpieczeństwa.

Masa pasażerów wpływa na całkowitą masę, ale nie oznacza, że pełny autobus zawsze jedzie niebezpiecznie. Konstrukcja, hamulce i dopuszczalne obciążenie są projektowane dla określonych warunków. Kierowca nadal potrzebuje odpowiedniego odstępu, bo duża energia ruchu nie daje się usunąć natychmiast.

Częste zatrzymywanie zwiększa znaczenie sprawności. Autobus elektryczny może odzyskiwać część energii podczas hamowania, ale każdy cykl ma straty. Płynna jazda ogranicza niepotrzebne gwałtowne przyspieszanie i hamowanie. Oszczędność energii często wynika bardziej z rozsądnego sterowania niż z efektownego gadżetu.

Opór powietrza autobusu jest większy niż opór smukłego samochodu, między innymi ze względu na dużą powierzchnię czołową. Pojazd musi jednak pomieścić wiele osób, drzwi i wyposażenie. Jego zadaniem nie jest rekord. Dobłą konstrukcję ocenia się według celu: pojemności, bezpieczeństwa, dostępności, kosztu i zużycia energii.

Prędkość nie zawsze oznacza krótszą podróż

Jeśli odcinek ma 10 km, idealny przejazd ze stałą prędkością 50 km/h trwa 12 minut. Przy 100 km/h trwałby 6 minut. W rzeczywistym ruchu występują skrzyżowania, postoje, ograniczenia i inni uczestnicy, więc podwojenie prędkości maksymalnej nie musi skrócić całej podróży o połowę.

$$t = s/v = 10 \frac{\text{km}}{50} \text{ km/h} = 0,2 \text{ h} = 12 \text{ min}$$

Duża prędkość podnosi energię kinetyczną, opór i wymagania bezpieczeństwa. Dlatego inżynieria transportu nie pyta jedynie „jak szybko może jechać pojazd?”, lecz „jak sprawnie, bezpiecznie i niezawodnie przewieźć ludzi?”. Rekord i codzienny transport mają inne funkcje, choć korzystają z tej samej fizyki.

W Polsce codzienny wybór środka transportu zależy od odległości, pogody, dostępności i bezpieczeństwa. Rower może być efektywny na krótszej trasie, transport zbiorowy przewozi wiele osób naraz, a kolej wykorzystuje mały opór tocznienia. Nie istnieje jedna odpowiedź właściwa dla każdej podróży.

Zaprojektuj bezpieczne badanie

Możesz przeprowadzić szkolne badanie bez mierzenia maksymalnej prędkości człowieka. Zbuduj papierowe osłony o różnych kształtach dla jednakowych zabawkowych pojazdów i pozwól im zjeżdżać z tej samej łagodnej pochylni. Zmieniaj jedną rzecz naraz i mierz czas na tym samym odcinku.

1. Zapisz pytanie i przewidywanie.
2. Ustal zmienną zmienianą, mierzoną i kontrolowaną.
3. Wykonaj co najmniej pięć powtórzeń każdego wariantu.
4. Oblicz średnie i pokaż rozrzut wyników.
5. Wyjaśnij ograniczenia zamiast ukrywać niewygodne dane.

Jeśli osłona A daje średnio 1,8 s, a B 1,7 s, różnica może wynikać z aerodynamiki, ale także z niejednakowego startu lub tarcia kół. Powtórzenia pomagają ocenić, czy wynik jest stały. Dobry wniosek mówi „dane sugerują”, gdy doświadczenie nie

rozstrzyga wszystkiego.

Nie testuj prędkości na ulicy, stromych zjazdach ani w pobliżu schodów. Prawdziwa nauka nie wymaga ryzykowania zdrowia. Najlepszy eksperyment dla młodego badacza ma małą energię, prostą kontrolę i łatwy sposób przerywania. Bezpieczeństwo jest częścią metody, nie nudnym dodatkiem.

Co może napędzać następny rekord

Przyszły rekord może wykorzystywać silnik odrzutowy, raketowy, układ hybrydowy albo technologię, która dziś dopiero dojrzewa. Wodór może odegrać rolę jako paliwo lub nośnik energii, ale wybór będzie zależał od regulaminu, wymaganej mocy, masy, objętości, kosztu i bezpieczeństwa.

Sam rekord nie rozwiąże problemów codziennego transportu. Może jednak rozwijać materiały, czujniki, symulacje i zainteresowanie nauką. Trzeba uczciwie odróżniać demonstrację od gotowego produktu. Pojazd działający przez kilkadziesiąt sekund na specjalnym torze ma inne wymagania niż autobus pracujący codziennie.

Najciekawsze pytanie nie brzmi tylko „jaki będzie następny rekord?”. Możesz zapytać: ile energii zużyje, jak zostanie zmierzony, skąd weźmie paliwo, jak się zatrzyma i czego nauczy się zespół po nieudanej próbie. Tak zmieniasz zachwyt prędkością w dojrzałą ciekawość.

Powrót do szkoły jest więc powrotem do prawdziwego laboratorium pytań. Rower pokazuje przekładnię i opór, autobus bezwładność i energię, a odległy rekord łączy fizykę z chemią

oraz inżynierią. Nie musisz podróżować z Mach 1, aby nauczyć się myśleć jak osoba, która kiedyś zaprojektuje coś przełomowego.

Jak korzystać z rejestru

Jak korzystać z rejestru

Ten rozdział odpowiada znacznikom ^[1]–^[20] umieszczonym przy ważnych twierdzeniach. Źródła wybrano przede wszystkim spośród publikacji instytucji naukowych, organizacji ustanawiających standardy, muzeów techniki i urzędów zajmujących się energią. Każda pozycja zawiera krótką wskazówkę, do czego służy.

Źródło nie staje się bezbłędne tylko dlatego, że ma elegancką stronę internetową. Warto sprawdzić autora, instytucję, datę aktualizacji, zakres dokumentu i zgodność z innymi opracowaniami. Przy rekordach szczególnie ważne jest odróżnienie oficjalnego wyniku od zapowiedzi projektu lub chwilowego odczytu.

Jednostki, ruch i siły

^[1] Bureau International des Poids et Mesures, The International System of Units, SI Brochure, wydanie 9 z aktualizacjami. Oficjalne opracowanie Międzynarodowego Układu Jednostek definiuje metr, sekundę i jednostki pochodne. To podstawa zapisu m/s, niutona, dżula oraz wata.

^[2] OpenStax, College Physics 2e, rozdziały o kinematyce w jednym wymiarze i wektorach. Otwarty podręcznik akademicki wyjaśnia położenie, przemieszczenie, średnią i chwilową prędkość oraz przyspieszenie. Materiał jest bardziej



szczegółowy niż książka, lecz wzory pozostają te same.

[5] OpenStax, College Physics 2e, rozdziały o dynamice i prawach Newtona. Źródło omawia bezwładność, siłę wypadkową, zależność $F = ma$ oraz pary oddziaływań. Pomaga sprawdzić, dlaczego siły trzeciej zasady nie znoszą się: działają na różne ciała.

[6] OpenStax, College Physics 2e, rozdziały o pracy, energii i mocy. Zawiera definicje dżula i wata, twierdzenie o pracy i energii oraz wzór na energię kinetyczną. To podstawa objaśnienia, dlaczego podwojenie prędkości daje czterokrotnie większą energię ruchu.

[7] OpenStax, College Physics 2e, część dotycząca tarcia. Opisuje tarcie statyczne i kinetyczne oraz uproszczone modele współczynnika tarcia. W zastosowaniach oponiarskich model szkolny ma ograniczenia, dlatego w tekście zaznaczono wpływ odkształceń, temperatury i nawierzchni.

Historia pary i kolei

[3] Science Museum Group, materiały kolekcji i opracowania dotyczące silników parowych oraz rozwoju kolei. Muzeum przedstawia przemianę energii w maszynach parowych i znaczenie kolei dla transportu ciężkich ładunków. Materiały historyczne warto łączyć z podręcznikiem fizyki.

[4] National Railway Museum, materiały o lokomotywie Stephenson's Rocket i próbach Rainhill z 1829 roku. Źródło opisuje konstruktorów, konkurs oraz rozwiązania techniczne Rocket. Podana historia służy jako przykład współdziałania

kotła, przepływu spalin i toru.

Muzealne opisy mogą różnić się poziomem szczegółu od dokumentów inżynierskich. Są szczególnie użyteczne do ustalania chronologii, nazw obiektów i kontekstu. Gdy potrzebujesz dokładnej sprawności albo mocy maszyny, szukaj katalogu technicznego i sprawdzaj sposób wykonania pomiaru.

Aerodynamika i dźwięk

[8] NASA Glenn Research Center, Beginner's Guide to Aeronautics, dział Drag Equation. Materiał przedstawia równanie $F_D = 1/2 \rho v^2 C_{DA}$ i wyjaśnia znaczenie gęstości, prędkości, współczynnika oporu oraz powierzchni. NASA podkreśla, że współczynnik zależy od warunków i definicji pola.

[9] NASA Glenn Research Center, materiały Speed of Sound. Źródło objaśnia zależność prędkości dźwięku od właściwości gazu i temperatury oraz użycie liczby Macha. Wartość około 343 m/s dotyczy powietrza w pobliżu 20°C, nie każdej atmosfery i wysokości.

[10] NASA, materiały edukacyjne o falach uderzeniowych i gromie dźwiękowym. Wyjaśniają, że grom nie powstaje tylko w chwili „przebicia bariery”, lecz jest skutkiem układu fal wytwarzanego przez obiekt naddźwiękowy. Sygnał zależy od geometrii i toru lotu.

[20] NASA Glenn Research Center, Beginner's Guide to Aeronautics, materiały Boundary Layer. Źródło opisuje obszar przepływu przy powierzchni, wpływ lepkości oraz oderwanie strugi. Pojęcie pomaga połączyć mikroskopijne oddziaływania

powietrza z oporem całego pojazdu.

Silniki odrzutowe i rekord

[11] NASA Glenn Research Center, materiały Turbine Engine Thermodynamic Cycle oraz General Thrust Equation. Wyjaśniają rolę wlotu, sprężarki, komory spalania, turbiny i dyszy, a także związek ciągu ze zmianą pędu strumienia oraz różnicą ciśnień.

[12] Guinness World Records, wpis dotyczący rekordu prędkości ThrustSSC. Rejestr podaje 1227,985 km/h, datę 15 października 1997 roku i kierowcę Andy'ego Greena. Wynik jest średnią oficjalnych przejazdów, a nie dowolnie wybraną prędkością chwilową.

[13] Fédération Internationale de l'Automobile, Appendix D — Regulations for Land Speed Record Attempts. Dokument określa kategorie, pomiary, przejazdy i procedury zatwierdzania. Regulaminy mogą być aktualizowane, dlatego przy planowaniu rzeczywistej próby trzeba korzystać z bieżącej wersji FIA.

[14] ThrustSSC Project oraz archiwalne materiały zespołu i brytyjskich instytucji inżynierskich dotyczące konstrukcji pojazdu. Opisują dwa silniki Rolls-Royce Spey, metalowe koła, testy i problemy stabilności. Dane techniczne warto porównywać z rejestrem rekordu [12].

W przypadku stron poświęconych historycznemu projektowi odróżniaj materiały powstałe podczas programu od późniejszych wspomnień. Relacje członków zespołu są cenne, lecz oficjalną wartość rekordu najlepiej potwierdzać w

organizacji zatwierdzającej lub uznanym rejestrze.

Wodór i ogniwa paliwowe

[15] U.S. Department of Energy, Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, Hydrogen Fuel Basics. Opracowanie przedstawia wodór jako nośnik energii, jego właściwości i sposoby użycia. Wyjaśnia też, że emisje całego cyklu zależą od sposobu produkcji, a nie tylko pracy pojazdu.

[16] U.S. Department of Energy, Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, Fuel Cell Basics. Źródło opisuje działanie ogniw, w tym transport protonów i przepływ elektronów przez obwód zewnętrzny. Omawia produkty reakcji, sprawność oraz zastosowania transportowe.

[17] U.S. Department of Energy, Hydrogen Production: Electrolysis. Materiał wyjaśnia rozdzielanie wody na wodór i tlen przy użyciu energii elektrycznej. Podkreśla, że korzyści środowiskowe zależą od źródła elektryczności i sprawności całego procesu.

[18] International Energy Agency, Global Hydrogen Review 2024. Raport przedstawia światową produkcję i wykorzystanie wodoru, projekty niskoemisyjne oraz bariery rozwoju. Dane zmieniają się z roku na rok, więc nowsze wydanie należy preferować przy aktualizowaniu statystyk.

[19] Guinness World Records oraz materiały projektu Ohio State University i Venturi dotyczące Buckeye Bullet 2. Źródła podają rekordową średnią 487,672 km/h dla pojazdu z wodorowym ogniwem paliwowym w 2009 roku. Kategorię trzeba zawsze

podawać razem z wynikiem.

Jak samodzielnie sprawdzać twierdzenia

Zacznij od dokładnego pytania. Zamiast wpisywać „najszybszy samochód”, zapytaj o oficjalny rekord prędkości na lądzie, kategorię napędu, średnią z przejazdów i datę. Precyzyjne pytanie ogranicza ryzyko pomieszania samochodu produkcyjnego, wyścigowego, prototypu oraz pojazdu odrzutowego.

Następnie znajdź źródło pierwotne lub możliwie bliskie pierwotnemu: regulamin organizacji, oficjalny rejestr, raport techniczny albo dokument instytucji naukowej. Artykuł prasowy może pomóc znaleźć temat, lecz sensacyjny nagłówek nie powinien być jedynym dowodem liczby.

Sprawdź jednostki i definicje. Mila na godzinę nie jest kilometrem na godzinę, prędkość chwilowa nie jest średnią, a rekord kategorii nie jest rekordem ogólnym. Warto samodzielnie wykonać przeliczenie i zobaczyć, czy wynik ma właściwy rząd wielkości.

Porównaj co najmniej dwa niezależne źródła. Jeśli liczby się różnią, nie wybieraj od razu tej bardziej imponującej. Poszukaj przyczyny: zaokrąglenia, innej daty, odmiennej kategorii albo zmiany regulaminu. Rozbieżność jest początkiem dochodzenia, nie przeszkodą do zamiecenia pod dywan.

Na końcu zapisz źródło tak, aby inna osoba mogła je odnaleźć. Podaj instytucję, tytuł dokumentu, rok lub wersję oraz dział. Adres internetowy może się zmienić, natomiast pełny tytuł

ułatwia ponowne wyszukanie. Przy szybko rozwijających się technologiach dopisz datę dostępu.

Ostatnia lekcja

Źródła nie są ozdobą dodawaną po napisaniu tekstu. Pozwalają oddzielić to, co wiadomo, od tego, co dopiero przewidujemy. W tej książce oficjalny rekord ThrustSSC jest faktem historycznym, natomiast rodzaj napędu przyszłego rekordzisty pozostaje otwartym pytaniem.

Możesz wracać do rejestru po każdym rozdziale. Otwórz wskazane opracowanie, znajdź odpowiedni termin i spróbuj wyjaśnić go własnymi słowami. Jeśli nie potrafisz, nie oznacza to braku zdolności. Być może trzeba cofnąć się do prostszego modelu, rysunku lub rozwiązania liczbowego.

Rzetelna ciekawość łączy zachwyt ze sprawdzaniem. Wolno ci ekscytować się naddźwiękowym samochodem, a jednocześnie pytać o procedurę pomiaru. Wolno zachwycić się wodorem i badać koszt jego produkcji. To właśnie dzięki takim pytaniom nauka pozostaje szybsza od pochopnych odpowiedzi.



Stworzone z ❤️ w 🇳🇴 przez Plyx



Zeskanuj, aby uzyskać swoją
wersję cyfrową i audio