



## Fizyka Formuły 1

*Przemysław Borys*

*Zakład Fizyki Chemicznej i Biofizyki  
Politechnika Śląska*

### 1. Wprowadzenie

Od kiedy Robert Kubica dostał się do elitarnego grona kierowców Formuły 1, w Polsce zapanowała gorączka wyścigów, która nie ominęła autora niniejszego tekstu<sup>1</sup>. Potrafimy z zainteresowaniem oglądać nawet ostatnie okrążenia, na których nic się nie dzieje, ale zawsze może komuś bolid odmówić posłuszeństwa.

Bierne oglądanie wywołuje jednak po pewnym czasie niedosyt. Chcemy więcej rozumieć. Czemu w bolidach reguluje się skrzydła, co to są dyfuzory, jaki wpływ na wyniki mają zamontowane silniki. Przybliżeniu tej tematyki służy niniejszy artykuł. Okazuje się, że w Formule 1 głównym czynnikiem decydującym o wyniku jest przyczepność samochodu. Zależy ona od współczynnika tarcia opon i docisku aerodynamicznego generowanego przez różne podzespoły. Stąd główna część fizyki Formuły 1 dotyczy poznania efektów aerodynamicznych i zachowania opon na drodze.

### 2. Przyczepność

Największym osiągnięciem bolidów Formuły 1 jest osiągnięcie fantastycznej przyczepności samochodu do podłoża. Dzięki temu bolidom w znacznie mniejszym stopniu niż normalnym samochodom grozi poślizg przy szybkim wchodzeniu w zakręty czy ślizganie kół podczas zbyt ostrego przyspieszania.

Źródłem przyczepności każdego samochodu jest oczywiście siła tarcia. Siła tarcia działająca między oponą a podłożem jest bowiem siłą dośrodkową, działającą na samochód jadący po łuku drogi. Jeśli jest ona zbyt mała, to samochód wpada w poślizg. Szkolny wzór na wartość siły tarcia ma postać:

$$F_t = fN, \quad (1)$$

gdzie  $f$  – współczynnik tarcia,  $N$  – wartość siły nacisku na podłożę. Wzór ten jest oczywiście uproszczony i w technologii Formuły 1 współczynnik tarcia nie jest stały. Może on zależeć od temperatury, stopnia poślizgu, powierzchni opony; przy lepkich materiałach opon możliwe jest nawet pojawienie się siły tarcia

---

<sup>1</sup> Tak, nie jestem odwiecznym fanem Formuły 1. Co więcej, kiedyś ten sport nie wydawał mi się interesujący. Jednak w miarę zdobywania wiedzy na ten temat rosło również zainteresowanie wyścigami. Tą właśnie wiedzą, niekiedy hermetyczną dla osób bez przygotowania fizycznego, chciałbym się podzielić z czytelnikami.

przy braku siły nacisku<sup>2</sup>. Niemniej, powyższy wzór jest pewnym punktem wyjścia do rozważań.

Oczywistym jest, że wartości współczynnika tarcia mają swoje granice. Opony wyścigowe dzięki specjalnym materiałom mogą osiągać wartości bliskie  $f = 1,7$  [1, 7] na suchej nawierzchni. Jest to praktycznie maksimum osiągalne dla opon i dlatego, aby jeszcze bardziej zwiększyć dostępną siłę tarcia, wykorzystuje się drugi czynnik wzoru (1), mianowicie siłę nacisku na podłoże.

W normalnych samochodach siła ta wynika z ciężaru samochodu (i oscyluje zależnie od akcji amortyzatorów, z czego nie każdy zdaje sobie sprawę, patrz zadanie s. 55) dając na płaskiej powierzchni  $N = Q = mg$ . W bolidach Formuły 1, oprócz siły ciężkości, na samochód działa siła aerodynamiczna. Siła ta generowana jest tak samo, jak *siła nośna* działająca w samolocie. W odróżnieniu jednak od samolotu siła aerodynamiczna w samochodzie zwrócona jest ku dołowi, dociskając samochód do podłoża. Stąd określenie „docisku” (ang. *downforce*) tak popularne w tym sporcie.

Docisk aerodynamiczny samochodu generowany jest za pomocą wielu elementów aerodynamicznych, z których największą rolę odgrywają trzy: skrzydło przednie (ok. 30% docisku), skrzydło tylne (ok. 30–35% docisku) i dyfuzor (20–40% docisku) [13]. Elementy te omówimy za chwilę, lecz najpierw poświęćmy trochę uwagi samym oponom.

### 3. Opony

Opony w Formule 1 muszą spełniać wysokie wymagania odnośnie przyczepności. Wystarczy przypomnieć współczynnik tarcia na suchej nawierzchni wynoszący  $f = 1,7$ . Dla porównania współczynniki tarcia normalnych opon samochodowych są dwukrotnie mniejsze, do  $f = 0,8$  [1, 2].

Taki duży współczynnik tarcia nie jest dany kierowcom za darmo. Opony wyścigowe charakteryzują się szybkim zużyciem. Są przeznaczone na odcinki ok. 200 km, w odróżnieniu od normalnych opon drogowych, których zadaniem jest przejechanie do kilkudziesięciu tysięcy kilometrów [2]. Wielka przyczepność osiągana jest dwoma metodami: adhezyjną (normalny mechanizm tarcia polegający na powstawaniu wiązań – głównie van der Waalsa (patrz artykuł „Spacer po suficie” Piotra Pierańskiego, *Foton* 96/2007) – między cząsteczkami trących powierzchni [4]) oraz deformacyjną związaną z histerezą gumy (mechanizm, w którym opona wgniata się do nierówności drogi i – zamiast elastycznie od nierówności odskoczyć – rozprasza energię i podciąga samochód podobnie do zapadki) [5, 3, 2]. Mechanizm deformacyjny opon obserwować

---

<sup>2</sup> Znany problem stosowania szerokich opon w samochodach wyścigowych pomimo niezależności tarcia od powierzchni styku można wyjaśnić stosowaniem lepkich materiałów na opony. Nietrudno wyobrazić sobie, że siła wiązania np. taśmy przyklepnej z podłożem zależy od powierzchni styku. Szerzej problem tarcia gumy podejmiemy w kolejny paragrafie.

można było wyraźnie w *Grand Prix* Bahrajnu, gdzie nawiewane z pustyni ziarenka wgniatały się w opony bolidów.

Normalnie główny wkład do siły tarcia pochodzi od mechanizmu adhezyjnego [3]. Mechanizm ten w przypadku opon wyścigowych jest tak mocny, że ich producenci porównują je nawet do taśmy samoprzylepnej [8]. Aby osiągnąć najlepsze własności, konieczne jest m.in. osiągnięcie przez oponę właściwej temperatury [3], ciśnienia [5] oraz poślizgu opony w ruchu ( $S - slippage$ <sup>3</sup> [2, 3, 5]). Optymalny poślizg, przy którym siła tarcia jest najwyższa, wynosi ok. 15% [2, 3], wówczas wiązania gumy z podłożem rozciągane są do maksimum<sup>4</sup> i siła sprężysta kontaktów osiąga najwyższe wartości [5].

Mechanizm adhezyjny ulega upośledzeniu, gdy droga pokryta jest wilgocią czy kurzem [3, 5] (kierowcy często narzekają na brak przyczepności na torze, po którym dopiero zaczynają jeździć). W takich przypadkach źródłem tarcia staje się mechanizm deformacyjny. Jest on jednak mniej efektywny od adhezyjnego – np. w normalnych oponach samochodowych współczynnik tarcia spada z 0,7 nawet do 0,2 przy prędkości 100 km/h. Dlatego kierowcy z bolidami o słabszej przyczepności w deszczu często upatrują sprzymierzeńca, który może wyrównać ich szanse.

W Formule 1 mamy obecnie do czynienia z trzema rodzajami opon: *slickami*, przystosowanymi do suchej nawierzchni, charakteryzującymi się najwyższą przyczepnością, oponami przejściowymi, które mogą odprowadzać do 34 l/s wody przy prędkości 300 km/h i oponami deszczowymi, które przy tej samej prędkości odprowadzają do 61 l/s wody [9]. Jeżeli opona, pomimo fantastycznej wydajności, nie odprowadzi całej wody spod koła, to między torem i oponą pojawia się poduszka wodna. Uniemożliwia ona powstanie tarcia tak adhezyjnego jak i deformacyjnego. Kierowca traci wówczas panowanie nad samochodem, a efekt nosi nazwę *aquaplaningu* (lub *hydroplaningu*) [10].

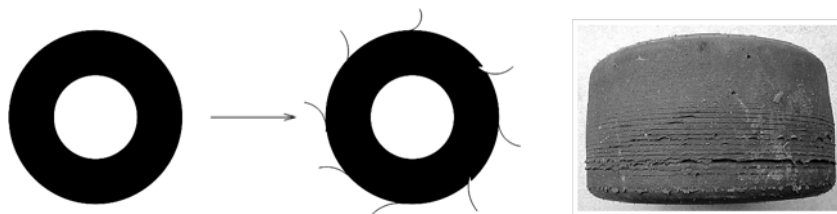
Podczas wyścigów często słyszymy też o tzw. *grainingu* (granulowaniu) opon [3, 6]. Jest to zjawisko będące efektem zbyt wysokiej plastyczności opon: guma „klei się do podłoża” i odrywa od opony, tworząc postrzępioną powierzchnię. Taka powierzchnia daje gorsze właściwości jezdne, a efekt nazywamy właśnie granulowaniem (rys. 1).

---

<sup>3</sup> *Slippage* to  $S = \frac{v - \omega R}{v} \cdot 100\%$ , gdzie  $v$  – szybkość bolidu,  $\omega$  – prędkość kątowa koła,  $R$  –

promień koła,

<sup>4</sup> Część już zaczyna się zrywać, stąd poślizg.



Rys. 1. Graining opony. Po lewej schemat powstawania granulowania przy przyspieszaniu, po prawej efekt granulowania powstałego na skutek obciążenia opony w zakrętach (www.tecnicafl.com)

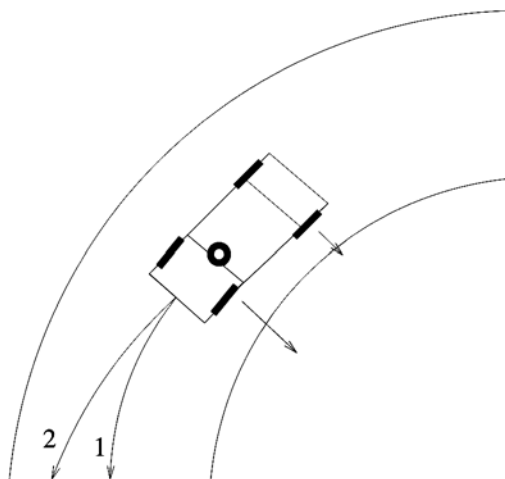
W Formule 1 znany jest problem rozgrzewania opon. Wszyscy widzieliśmy opony dogrzewane kocami do właściwej temperatury. Dzieje się tak dlatego, że guma osiąga pożądane właściwości adhezyjne i deformacyjne w określonym zakresie temperatur. Producenci projektują opony tak, by temperatury te odpowiadały normalnym temperaturom osiąganym w wyścigu; np. slicki projektowane są na ok.  $100^{\circ}\text{C}$ , opony przejściowe na  $40\text{--}100^{\circ}\text{C}$ , a opony deszczowe na  $30\text{--}50^{\circ}\text{C}$  [11]. Rozgrzewanie opon jest zatem ważnym zagadnieniem, z którym kierowcy muszą sobie radzić. Warto przy tym zauważyć, że ciśnienie w oponach musi być tak dobrane, by nacisk opony na powierzchnię nie faworyzował nagrzewania wybranych partii gumy, a ogrzewał całość równomiernie. Inaczej, różne części opony będą wykazywały różne właściwości tarcia co prowadzi do zużycia (granulowania).

Problem ciśnienia jest bardziej złożony niż się na pierwszy rzut oka wydaje: wilgoć w powietrzu może wpływać na ciśnienie wraz z temperaturą, a tlen reagując z gumą może zmniejszać ciśnienie. Trzeba przy tym pamiętać, że w Formule 1 przy optymalnym nacisku gumy na tor rzędu  $1,1\text{ kg/cm}^2$  różnica rzędu  $0,2\text{ kg/cm}^2$  może być decydująca [11].

#### 4. Zmiany nacisku na oponę podczas jazdy

Model tarcia ze stałym naciskiem w Formule 1 jest niewłaściwy, chociażby ze względu na obecność siły aerodynamicznej. Jednak nie tylko ta siła zmienia obciążenie kół samochodu [1, 2]. Zmienia się ono również podczas manewrowania samochodem: podczas przyspieszania, zwiększa się nacisk na tylną oś; podczas hamowania – zwiększa się nacisk na oś przednią. Dlatego samochody z napędem na tylną oś efektywniej przyspieszają od samochodów z napędem na oś przednią.

Położenie środka ciężkości samochodu (uzyskiwane za pomocą odpowiedniego balansu) ma również istotne znaczenie dla zachowania samochodu w zakrętach [1] (rys. 2).



Rys. 2. Samochód podsterowny: kółkiem zaznaczono środek ciężkości, strzałki to siły działające na opony. Tor „1” to tor pożądaný, natomiast tor jazdy „2” to tor uzyskany w wyniku poślizgu

Na rysunku widać auto, które ma środek ciężkości bliżej przedniej osi. Nacisk na przednią oś jest większy niż na tylną, a siły boczne na przedniej osi również są większe niż na tylnej. W przypadku stałego współczynnika tarcia samochód zakreślałby niezależnie od rozkładu masy, gdyż mniejszemu naciskowi odpowiada dłuższe ramie siły działającej wokół środka masy.

W rzeczywistości, współczynnik tarcia gumy zależy od ciśnienia opony na podłoże i dla wyższych wartości siły nacisku, maleje [5, 12]<sup>5</sup>. Stąd, bardziej obciążona oś podatna jest na szybsze wystąpienie poślizgu. Na rysunku 2 oznacza to, że oś przednia nie będzie w stanie podążyć za oczekiwanym przez kierowcę torem jazdy; promień skrętu będzie większy. Jest to efekt *podsterowności*, gdy samochód reaguje słabiej na ruch kierownicą niż życzyłby sobie tego kierowca.

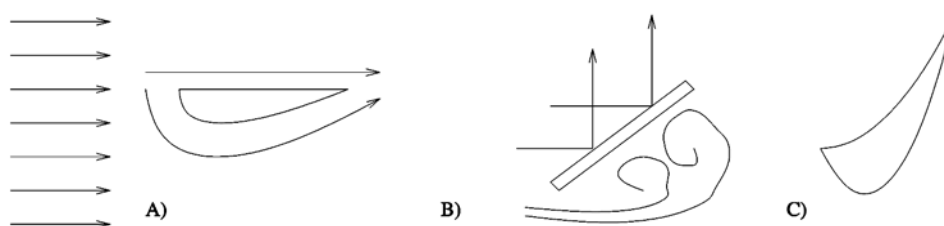
Pojęciem odwrotnym do podsterowności jest *nadsterowność*. Z efektem tym mamy do czynienia, gdy silniej obciążona jest oś tylna samochodu i to na niej następuje poślizg w zakręcie. Dochodzi wówczas do „silniejszego”, niż oczekuje kierowca, obrotu w zakręcie i możliwe jest wykonanie przez samochód piruetu, gdyż jest to zachowanie niestabilne. Brak stabilności rozumiemy tak, że o ile w samochodzie podsterownym, promień skrętu powiększa się w kierunku braku poślizgu, to w samochodzie nadsterownym, warunki poślizgu wynikłe z promienia skrętu nasilają się. Taki poślizg może nastąpić w wyścigach Formuły 1 przy źle wykonanym dohamowaniu do zakrętu.

<sup>5</sup> Wzory są zbyt skomplikowane by je tutaj przytoczyć i omówić w całości użyte w nich symbole, zainteresowanych odsyłam np. do [5].

Z podanych wyżej przyczyn wynika, że łatwiej prowadzić samochód podsterowny niż nadsterowny. Z tej przyczyny, większość samochodów użytkowych ma przesunięty ciężar do przodu [1].

## 5. Jak działają skrzydła

W poprzedniej sekcji mówiliśmy, że na strukturę aerodynamiczną bolidu Formuły 1 składają się skrzydła i dyfuzor. Tu chcielibyśmy skupić uwagę na skrzydłach. Jak one działają? To problem znany z lotnictwa, gdzie odpowiedź uzyskuje się z analizy komputerowej równań Naviera-Stokesa. Problem można jednak nieco uprościć korzystając z teorii cienkiego profilu lotniczego (ang. *thin airfoil theory*) [15, 16, 17]<sup>6</sup>. Omawianie tej teorii wykracza jednak poza zakres tego artykułu (nadaje się być może na oddzielny artykuł w przyszłości). W tej sytuacji przedstawimy bardziej jakościowe wskazówki odnośnie działania profilu skrzydła, znaczenia jego wypukłości i kąta natarcia, a także wzory końcowe wynikające z teorii.



Rys. 3. Model działania skrzydła wg A) Bernoulliego, B) Newtona, C) kombinowany

Na rysunku 3 pokazane są dwa podstawowe modele skrzydła A) i B). Model A) opiera swoje działanie na równaniu Bernoulliego (patrz ramka na końcu artykułu), opisującym stan energetyczny strugi w punktach „1” i „2”:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 \quad (2)$$

gdzie  $p$  – ciśnienie,  $v$  – szybkość, a  $h$  – wysokość rozpatrywanego punktu strugi. Punkty „1” i „2” wybierzemy jako punkty na środku górnej i dolnej powierzchni profilu.

Dopóki przepływ nie wywołuje turbulencji, struga rozcięta skrzydłem na części górną i dolną łączy się powrotnie na końcu skrzydła. Ponieważ dolny profil jest dłuższy od górnego, to w jednostce czasu dolna struga musi przebyć większą drogę niż struga górna ( $\Delta x_d > \Delta x_g$ ). To z kolei wymusza na dolnej stru-

<sup>6</sup> Na początek proponuję przeczytać artykuł z Wikipedii. Jest krótki – to jego główna zaleta.

dze większą prędkość niż na strudze górnej  $\left(\frac{\Delta x_d}{\Delta t} = \beta \frac{\Delta x_g}{\Delta t}, \beta > 1\right)$ . To natomiast, w myśl prawa Bernoulliego, przy  $h_1 \approx h_2$  daje relację,

$$\Delta p = p_d - p_g = \rho \frac{v_g^2 - v_d^2}{2} = \rho(1 - \beta^2) \frac{v_g^2}{2} \rightarrow L = AC_l \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (3)$$

Ostatnia równość daje ogólny wzór na siłę nośną  $L$ , gdzie  $C_l$  – współczynnik siły nośnej (w naszych rozważaniach:  $1 - \beta^2$ ),  $A$  – powierzchnia skrzydła,  $v_\infty$  – prędkość powietrza względem skrzydła (w dużej odległości, przed podjęciem interakcji ze skrzydłem – w naszych rozważaniach tożsama z niezaburzoną prędkością  $v_g$ ).

Model B) opiera się na Newtonowskim przekazie pędu. Cząstki powietrza odbijają się od skrzydła i kierują ku górze. W myśl zasady zachowania pędu oznacza to, że skrzydło uzyskuje pęd zwrócony w dół i do tyłu. Pęd zwrócony do tyłu odzwierciedla znany fakt, że skrzydła generują opory aerodynamiczne (ang. *induced drag*), utrudniające przyspieszanie. To jedna z przyczyn, dla których bolidy Formuły 1 są znacznie mniej opływowe od samochodów, którymi jeździmy na co dzień (współczynnik oporów powietrza dla bolidu to ok. 1, dla zwykłych samochodów 0,25)<sup>7</sup>.

W modelu B) warto zwrócić uwagę na efekty związane z ciśnieniem: skrzydło o niezerowym kącie natarcia wywołuje powstawanie poza nim podciśnienia. Ten efekt dodatkowo pociąga je w dół.

Na rysunku C) pokazany jest połączony model A) i B): wykorzystujemy tu zarówno ustawienie niezerowego kąta natarcia, jak i różnicę długości profili skrzydła, sugerowaną w modelu Bernoulliego. Takich modeli używa się w rzeczywistości, a do ich modelowania wykorzystuje się wspomniane już wyżej oprogramowanie komputerowej mechaniki płynów CFD (ang. *computational fluid dynamics*). W przypadku zespołu BMW-Sauber tu właśnie zastosowanie ma słynny superkomputer Albert (4224 rdzenie, 8448 GB RAM).

Jak pokazaliśmy wyżej, siła nośna skrzydeł w bolidach zależy od ustawienia ich kąta natarcia. Teoretyczny [15, 16] współczynnik siły nośnej wynikający z teorii cienkiego profilu lotniczego to<sup>8</sup>:

$$C_l = 2\pi\alpha,$$

<sup>7</sup> Inną przyczyną zwiększającą opory powietrzne bolidu są odsłonięte koła.

<sup>8</sup> Współczynnik ten jest czysto teoretyczny i odnosi się do profilu lotniczego o nieskończonej rozpiętości. Na brzegu skończonego skrzydła ciśnienie z dołu i góry wyrównują się, zaburzając siłę nośną. Dlatego wzór nieźle stosuje się w lotnictwie przy dużych skrzydłach, natomiast w Formule 1 wielkość skrzydła jest znacznie ograniczona i czynnik  $2\pi$  należy zastąpić liczbą kilka (ok. 4–5) razy mniejszą [1].

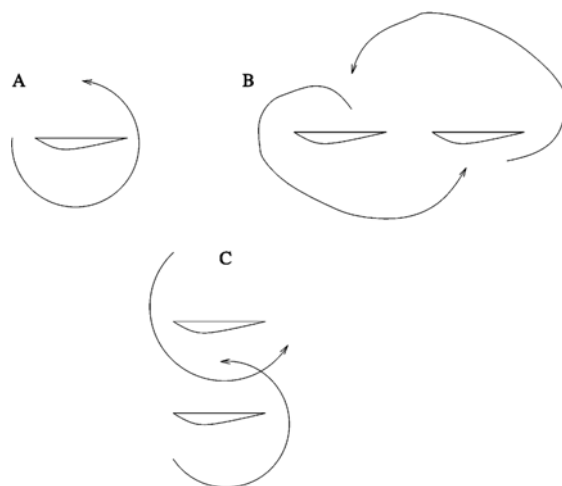
gdzie  $\alpha$  to kąt natarcia skrzydła. Wzór ten jest ograniczony do pewnego kąta granicznego  $\alpha_{max}$ , powyżej którego następuje zerwanie laminarnego opływu skrzydła i tzw. przeciągnięcie (ang. *stall*) [18]. Strugi powietrza przestają wówczas opływać skrzydło po krawędzi profilu, przestaje obowiązywać twierdzenie o różnicy prędkości strug, pojawiają się turbulencje i następuje utrata siły nośnej.

Warto zauważyć, że większy kąt natarcia oznacza większą siłę nośną, ale również i większe opory powietrzne. Stąd skrzydła ustawia się do każdego toru indywidualnie: jeżeli tor zawiera wiele zakrętów, ustawia się wyższy kąt natarcia skrzydeł (co umożliwi większą prędkość w zakrętach); z kolei jeśli tor składa się głównie z prostych odcinków, kąt natarcia skrzydeł jest obniżany, by lepiej wykorzystać przyspieszenie na prostych [1, 13].

## 6. Współpraca dwóch skrzydeł

Ciekawym problemem do rozpatrzenia jest współpraca dwóch skrzydeł pomiędzy sobą [1]. Wyjaśni to sens używania wielu płatów skrzydeł, a także efekty pojawiające się, gdy dwa bolidy jadą jeden za drugim.

Analizę rozpoczynamy od tego, że skrzydło można rozpatrywać jako źródło wiru [1, 17]. Krążenie prędkości wokół płata nie jest bowiem zerowe. Ilustruje to rysunek 4A.



Rys. 4. Współpraca dwóch skrzydeł we wspólnym układzie: A – wir wokół pojedynczego skrzydła, B – wiry wokół układu szeregowego, C – wiry wokół układu równoległego

Na rysunku widzimy, że w przypadku dwóch skrzydeł ułożonych jedno za drugim (np. gdy jeden bolid jedzie za drugim), wir skrzydła tylnego uderza w skrzydło przednie z góry (ang. *upwash*), powiększając efektywnie kąt natar-



cia i zwiększając docisk. Z kolei wir skrzydła przedniego opada na tylne od dołu (ang. *downwash*), zmniejszając docisk.

Na rysunku 4C widać układ dwóch skrzydeł ułożonych jedno nad drugim. Widać, że wiry tworzone przez skrzydła wzajemnie sobie przeszkadzają: wir górny zwiększa prędkość powietrza nad wolną częścią skrzydła dolnego, a wir dolny zmniejsza prędkość powietrza przy szybkiej części płata górnego. Skoro taki układ jest nieefektywny, dlaczego większość bolidów Formuły 1 ma dwa skrzydła z tyłu? Sprawa wyjaśni się przy omawianiu dyfuzorów.

### 7. Skrzydła wieloelementowe

W odróżnieniu od ustawiania dwóch skrzydeł, jednego nad drugim, ma sens dzielenie jednego dużego skrzydła na mniejsze. Jak wynika z poprzednich paragrafów, do powstania siły nośnej potrzebnej w modelu Bernoulliego konieczne jest wygięcie profilu. Im większe wygięcie, tym większej siły nośnej można się spodziewać. Niestety, w miarę pogrubiania skrzydła również bardziej prawdopodobne staje się zerwanie wokół niego przepływu laminarnego.

Rozwiązaniem problemu ograniczeń w wyginaniu skrzydła jest rozbięcie jednego skrzydła na dwa (lub więcej) elementów [1] (rys. 5).



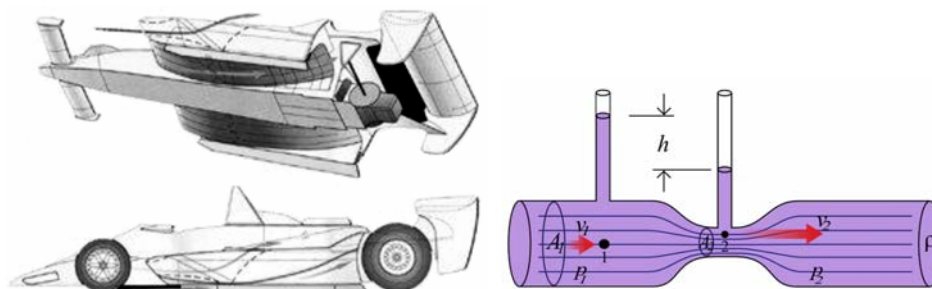
Rys. 5. Skrzydło dwuelementowe: po lewej profil, po prawej rysunek skrzydła z BMW F.07 ([www.formula1.com](http://www.formula1.com))

Rozbięcie skrzydła na dwa elementy umożliwia zwiększenie efektywnego wygięcia, a szczelina pomiędzy skrzydłami umożliwia dostarczenie energii warstwie granicznej na powierzchni skrzydła, co pomaga zachować nieoderwany przepływ wzdłuż profilu [19, 20]. Dwu lub trzelementowe skrzydła, jak jest to pokazane na rysunku 5 są szczególnie popularne w Formule Indy.

### 8. Dyfuzor

W obecnym (2009) sezonie głośna stała się sprawa dyfuzorów w Formule 1. Dyfuzor [1, 13, 21] jest wylotową częścią aerodynamicznego systemu podwozia. Historycznie wywodzi się on z koncepcji Lotusa z roku 1979 (rys. 6, po

lewej) – w tym samochodzie po raz pierwszy wykorzystano efekt zwężki Venturiego pod podwoziem [1, 21], (rys. 6, po prawej).



Rys. 6. Po lewej: układ aerodynamiczny Lotusa 79 pod wlotami bocznymi (www.ddavid.com). Po prawej, rurka Venturiego (wikipedia.pl) – zwężenie przekroju  $A$  przyspiesza przepływ  $v$  płynu zgodnie z prawem ciągłości strugi  $A_1v_1 = A_2v_2$ , a w myśl prawa Bernoulliego, zmniejsza jego ciśnienie

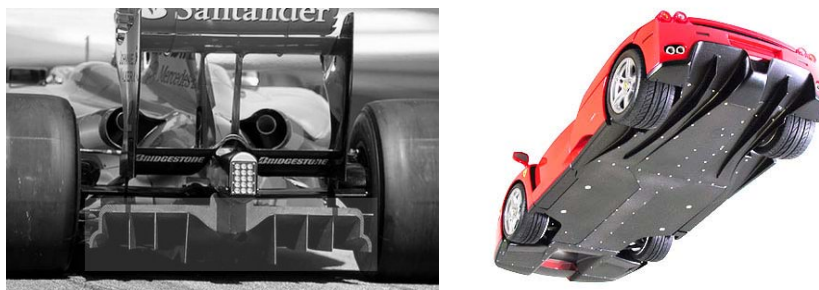
Na rysunku można zauważyć, że boczne wloty powietrza (stanowiące w bolidach system chłodzenia silnika) wyprofilowane są w taki sposób, że zmniejszają prześwit względem podłoża w pobliżu środka samochodu. Oznacza to, że powietrze płynące pod tymi wlotami przechodzi od szerokiego przekroju do wąskiego, a to, w myśl prawa ciągłości strugi, skutkuje jego przyspieszeniem w miejscu przewężenia. Przyspieszenie ruchu powietrza, zgodnie z prawem Bernoulliego, oznacza obniżenie jego ciśnienia i pojawienie się siły ssącej.

Aby układ Lotusa mógł funkcjonować, konieczne było uszczelnienie bocznych sekcji specjalnymi bocznymi koszulkami. Stanowiło to pewne niebezpieczeństwo i ostatecznie zabroniono stosowania tego mechanizmu w Formule 1. Podobnie, zabroniono profilowania podwozia (obszaru między wlotami bocznymi) w celu uzyskiwania efektu Venturiego [22].

Jedyna sekcja, która dopuszczona jest do modyfikacji w celu wykorzystania efektu „przyziemia” (ang. *ground effect*) to obszar podwozia poza tylnymi kołami. Tu właśnie inżynierowie Formuły 1 próbują wyprowadzić rozszerzający się tunel, przypominający końcówkę Venturiego<sup>9</sup>. Jeżeli tunel ten rozszerza się łagodnie i nie powstają turbulencje, to powietrze jest wysysane z podwozia w kierunku tyłu samochodu<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Część wlotowa nie jest wyprofilowana, więc powietrze po rozpruciu nosem bolidu napływa pod podwozie mniej efektywnie niż we wspomnianym modelu Lotusa.

<sup>10</sup> Jeżeli samochód przesuwa się w powietrzu do przodu to za nim powstaje pustka, która musi się wypełnić; od inżynierów zależy jak pokierują powietrze aby to wypełnienie nastąpiło.



Rys. 7. Po lewej: dyfuzor McLarena MP4-24 ([www.formula1.net](http://www.formula1.net)). Po prawej: podwozie Ferrari Enzo z rozbudowaną sekcją dyfuzora ([www.grassrootsmotorsports.com](http://www.grassrootsmotorsports.com))

Oglądając tył bolidu (rys. 7) można zaobserwować, że dyfuzor składa się z kilku kanałów, a nie tylko jednego spłaszczenia tylnej części podwozia. Te kanały są konieczne, aby zagwarantować laminarny przepływ powietrza (pojawienie się turbulencji uniemożliwia skuteczne kierowanie strug powietrza i zwiększa opory aerodynamiczne ruchu). Możliwość zaburzeń przepływu bierze się stąd, że warstwy powietrza pod podwoziem poruszają się z różną prędkością; blisko brzegu bolidu prędkość wyrównuje się z prędkością strug bocznych, a w centralnej części podwozia prędkość jest najwyższa [14]. Różnice w tych prędkościach mogłyby prowadzić do mieszania się strug powietrza – turbulencji – dlatego są one separowane oddzielnymi kanałami.

Na rysunku 7 oprócz samego dyfuzora widać również dolne skrzydło bolidu. Dolne skrzydło jest nieefektywne z punktu widzenia docisku generowanego skrzydłami, jednak zwiększa podciśnienie u wylotu dyfuzora. W ten sposób przyspiesza dodatkowo powietrze przepływające pod bolidem i wzmacnia efekt przyziemia.

W obecnym sezonie stała się głośna sprawa podwójnych dyfuzorów w Formule 1. Sprawa wiąże się z powiększeniem przez niektóre ekipy objętości wylotowej dyfuzora ponad objętość określoną przepisami. Umożliwia to większe przyspieszenie powietrza pod samochodem i uzyskanie większego docisku aerodynamicznego. FIA uznało te rozszerzenia za zgodne z przepisami, gdyż dodatkowe tunele nie spełniają dokładnej definicji dyfuzora, określonej jako widoczne od spodu połączenie otworów wylotowych z podwoziem. Dodatkowe kanały nie są widoczne od strony podwozia, więc są legalne [23].

## 9. Nos bolidu

Media czasami podają nam informacje w rodzaju: „w nowym modelu bolidu zmieniono tylne skrzydło i podniesiono nos bolidu”. Na pierwszy rzut oka, trudno odgadnąć, jaka jest rola nosa bolidu i czy ma być on zawieszony nisko czy wysoko. Do początku lat dziewięćdziesiątych bolidy miały nisko położone

nosy, co miało gwarantować generowanie docisku zakrzywioną ku dołowi powierzchnią nosa [14].

Później nastąpiła zmiana poglądów. Okazało się, że bardziej istotne od docisku generowanego nosem jest docisk generowany pod samochodem przy dobrym prowadzeniu strug powietrza. Strugi powietrza przechodzące pod nosem wchodziły niezaburzone pod płytę podwozia, a część biegnąca powyżej tej płyty rozdzielana jest do wlotów bocznych bolidu, odpowiedzialnych za chłodzenie silnika [14]. Podniesienie nosa również umożliwia zwiększenie efektywności przedniego skrzydła. Te wszystkie wnioski każą traktować nos bolidu jako pierwszy element, kierujący strugami powietrza w celu uzyskania rozmaitych efektów aerodynamicznych [14].

### 10. Nieosłonięte koła

Używanie w Formule 1 nieosłoniętych kół wydaje się sprzeczne ze zdrowym rozsądkiem. Takie rozwiązanie jest bardzo niekorzystne ze względów aerodynamicznych, gdyż obracające się koła generują silne wiry i, w konsekwencji, opory powietrza. Jedynym uzasadnieniem tego rozwiązania wydawałoby się to, że w Formule 1 stosowanie nieosłoniętych kół wymusza regulamin.

W latach pięćdziesiątych nie istniały jednak regulacje dotyczące osłaniania kół i można było porównać samochody obydwu typów. W 1954 J.M. Fangio na torze Silverstone w Mercedesie W196 Streamliner (rys. 8) z zabudowanymi kołami przegrał z bolidami o odsłoniętych kołach. Powód był prozaiczny: kierowca nie widział dokładnie toru jazdy opony i nie mógł w pełni wykorzystać miejsca w zakrętach [24]. Ten sam samochód we wcześniejszym GP Francji (Reims) zdobył jednak dwa pierwsze miejsca, co wskazywało na przewagę w jego aerodynamice [25, 26, 27].



Rys. 8. Mercedes Benz W196 Streamliner ([www.conceptcarz.com](http://www.conceptcarz.com))

Inne, często wymieniane zalety samochodów z odsłoniętymi kołami, to dobre chłodzenie hamulców i opon, redukcja masy, możliwość umieszczenia nisko środka ciężkości i mniejsza powierzchnia frontalna.

## 11. Rola zawieszenia dla aerodynamiki

Omawialiśmy niedawno dyfuzor bolidu Formuły 1. Jego działanie silnie uzależnione jest od odległości podłogi bolidu od toru. Podobnie sprawa ma się z przednim skrzydłem, które w znacznej mierze wykorzystuje efekt bliskości podłoża.

Podczas hamowania, przyspieszania i wchodzenia w zakręty zwykłego samochodu obserwujemy z reguły jego kołysanie się. W przypadku bolidu oprócz braku komfortu jazdy, oznaczałoby to zaburzenia w docisku. Z tej przyczyny w bolidach wyścigowych w latach osiemdziesiątych Lotus wprowadził aktywne zawieszenie, automatycznie regulujące wychylenie amortyzatorów.

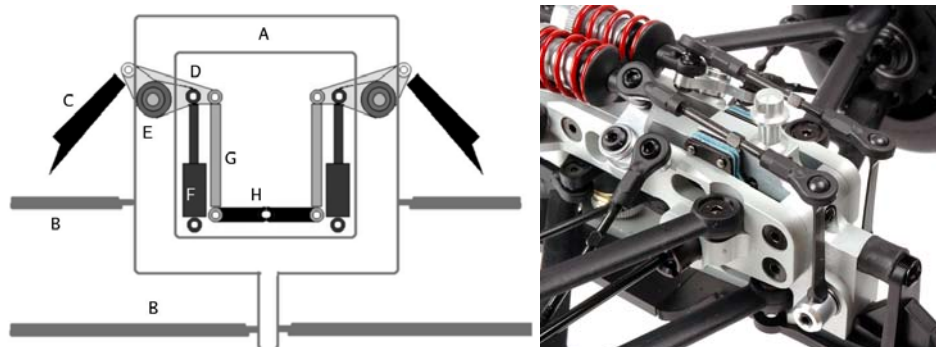
Technologię dopracował Williams na początku lat dziewięćdziesiątych. Niestety, w roku 1993 aktywne zawieszenie zostało w Formule 1 zabronione przepisami. Uzasadniano to osiąganiem przez bolidy nadmiernej prędkości w zakrętach i spowodowanymi tym wypadkami. Technologia jednak przetrwała i pojawiła się nawet w samochodach codziennego użytku [1, 28, 29].

W obliczu niemożności zastosowania systemów aktywnych, w Formule 1 stosuje się bardzo sztywne zawieszenie oparte o podwójne trójkątne wahacze poprzeczne (ang. *double wishbone suspension*), gwarantujące równoległe prowadzenie opon do podłoża w trakcie pracy zawieszenia<sup>11</sup>, połączone prętem popychacza<sup>12</sup> (ang. *pushrod*) z dźwignią (ang. *rocker*) opartą na drążku skrętnym (ang. *torsion bar*), połączonym z amortyzatorem i stabilizatorem zapobiegającym pochyłaniu w zakrętach (ang. *anti-roll bar*).

Schemat tego zawieszenia ilustruje rysunek 9. W zawieszeniu tym popychacz naciska dźwignię, która obraca się. Obrotowi dźwigni przeciwdziała drążek skrętny, pełniący rolę sprężyny. Następnie dźwignia łączy się z amortyzatorem, który składa się z zanurzonego w oleju tłoka. Ten element wytłumia drgania drążka skrętnego (sprężyny). Dodatkowo, zawieszenia lewego i prawego koła połączone są ze stabilizatorem.

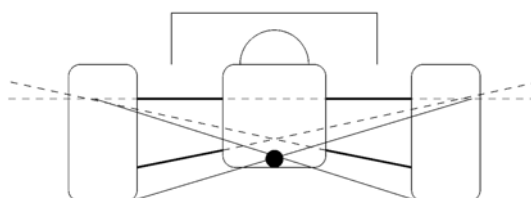
<sup>11</sup> W praktyce jest to prawda jedynie dla wahaczy prowadzonych równoległe. Ze względów technicznych jednak stosuje się wahacze nie w pełni równoległe, które umożliwiają mniejsze ścieranie opon [30, 31]. W wahaczach równoległych ścieranie opon jest efektem zbliżania się koła do samochodu podczas amortyzowania wyboju. Ścieranie opon i dobra trakcja to dwa czynniki, które trzeba dobrze zrównoważyć w projekcie zawieszenia.

<sup>12</sup> Wykorzystanie pręta zamiast zwykłej sprężyny wiąże się z kwestiami aerodynamiki w tej odsłoniętej części bolidu.



Rys. 9. Zawieszenie typu pushrod (www.scrabsfl.com). Rysunek po lewej obrazuje przekrój przez bolid. Widać obrys nadwozia A, a także wahacze trójkątne B, na których zawieszono koła. Od koła, ponad górny wahacz wychodzi pręt popychacza C, który łączy się z dźwignią D opartą na drążku skrętnym E. Dźwignia wymusza ruch amortyzatora F, a także ruch dodatkowych popychaczy G, połączonych przez środek nadwozia za pomocą stabilizatora H. Rysunek po prawej obrazuje przykładową realizację zawieszenia w rzeczywistym bolidzie (www.serpent.com)

Stabilizator to belka, zawieszona na sprężynie torsyjnej, która stawia opór obrotom. Jego działanie polega na eliminowaniu pochyłu samochodu w zakrętach. W zakręcie na środek ciężkości bolidu działa siła odśrodkowa. Powoduje ona obrót samochodu wokół osi obrotu (wynikającej z geometrii zawieszenia – rys. 10). Obrót następuje dopóty, dopóki ugięcie sprężyn zawieszenia nie spowoduje pojawienia się momentu siły, równoważącego moment siły odśrodkowej [32].



Rys. 10. Wyznaczanie osi obrotu samochodu podczas pochylenia w zakręcie. Ponieważ koła są zamocowane na dwóch wahaczach, przedłużamy te wahacze aż do punktu spotkania. Wówczas możemy uważać, że samochód jest połączony z kołami za pomocą pojedynczych „wirtualnych punktów”. Ponieważ koła pozostają na podłożu (nie mówimy o dachowaniu), chwilowa oś obrotu powstaje tam, gdzie możliwy jest naraz ruch wokół obydwu kół, tj. na przecięciu linii, wyznaczonej jako połączenie „wirtualnego punktu” zaczepienia wahacza i opony

Sprężyna torsyjna stabilizatora daje w takiej sytuacji zawieszeniu dodatkową sztywność w porównaniu z samodzielnym działaniem drążka skrętnego na dźwigni zawieszenia. Wadą tej konstrukcji jest usztywnienie nadwozia również przy pokonywaniu nierówności jednym kołem. Wówczas koła powinny pochy-

lić się względem podwozia, a temu przeciwdziała stabilizator. W efekcie jazda bolidem Formuły 1 nie należy do komfortowych i kierowca odczuwa najmniejsze nierówności.

Omawiane zawieszenie łatwo regulować zależnie od charakterystyki toru. Zmieniać można sztywność sprężyny stabilizatora, drążka skrętnego i długość ramion dźwigni (im dłuższe, tym szybciej tłok porusza się w oleju i silniej tłumione są drgania lub, po zwiększeniu drugiego ramienia, silniej obracany jest drążek skrętny i uzyskuje się większą sztywność).

## 12. KERS

Rewolucją sezonu 2009 miało być wprowadzenie do Formuły 1 systemu KERS (ang. *Kinetic Energy Recovery System*). System ten dopuszcza odzyskanie w ciągu okrążenia do 400 kJ energii, którą można wykorzystać na przyspieszanie samochodu dodatkową mocą 80 KM w ciągu 6 s. Obecnie wydaje się, że system ten jest zbyt ciężki, by dać kierowcom zdecydowaną przewagę, lecz zmiany regulaminu lub dopracowanie technologii mogą odwrócić ten trend w sezonach następnych.

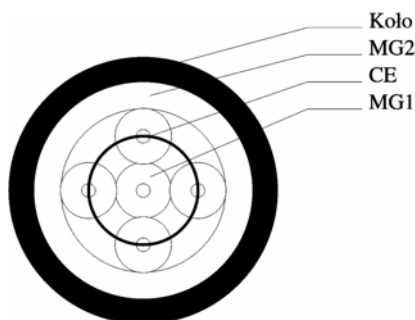
KERS polega na odzyskiwaniu energii kinetycznej traconej podczas hamowania. W normalnym samochodzie, siła hamowania generowana jest klockami hamulcowymi, trącymi o tarcze. W samochodach z regenerowanymi hamulcami [33, 34], po zwolnieniu pedału gazu i na pierwszych etapach hamowania, do obracających się kół podłączany jest silnik elektryczny, który działa jak generator siły elektromotorycznej Faradaya [41]. Generowaniu elektryczności odpowiada pojawienie się przepływu prądu w uzwojeniu silnika, a to ze wzoru na siłę Lorentza generuje siłę hamującą, która przeciwstawia się (zgodnie z regułą Lenza) obrotom.

Generowany przepływ ładunku wykorzystywany jest do ładowania baterii lub superkondensatorów. Energię elektryczną można również wykorzystać na rozpędzenie dodatkowym silniczkiem mechanicznego cylindra, jak uczynił to zespół Williamsa [35] w swojej „baterii mechanicznej”.

Sposób przechowywania zebranej energii zależy od dwóch podstawowych czynników: ciężaru systemu baterii i możliwości szybkiego składowania i uwalniania dużych ilości energii. Wirujące dyski mają pewną przewagę w możliwości szybkiego transferowania energii, natomiast baterie przeważają w stosunku magazynowanej energii na kilogram [37]. Z tej przyczyny, większość zespołów zdecydowała się na używanie baterii.

Zmagazynowaną energię można uwolnić podczas przyspieszenia. Klasyczny projekt hybrydy, jakim jest Toyota Prius, wykorzystuje dwie jednostki elektryczne do konstrukcji systemu CVT (ang. *Continuously Variable Transmission*), płynnej przekładni, umożliwiającej zmianę prędkości samochodu przy zachowaniu

waniu obrotów silnika spalinowego na stałym (np. optymalnym) poziomie (rys. 11).



Rys. 11. Przekładnia planetarna Toyoty Prius [39, 40]: Jednostka MG2 podłączona jest do koła i nadaje mu prędkość obrotową. Może być wspomagana silnikiem spalinowym CE, który „odpycha się” od MG1 (nie rozkręca jednak się nieograniczenie, a kontrykuje nacisk, gdyż pracuje jako generator, a „wyciekający” tak moment siły wraca do MG2 w postaci energii elektrycznej)

Stosowanie CVT w Formule 1 jest jednak zabronione. Ograniczona jest też ilość mocy, którą można odzyskiwać w hamowaniu, więc wszystkie znane zespoły podłączają bezpośrednio elektryczną jednostkę motoryczną (MGU, *Motor Generator Unit*) do wału napędowego [38]. Szczegóły połączenia nie są znane. Wymaga to zapewne odpowiedniego sterowania z jednostki KCU (ang. *KERS control unit*), która powinna synchronizować obroty silnika (trójfazowego lub bezszczotkowego silnika prądu stałego) z obrotami wału napędowego, aby zapewnić ciągłe sumowanie momentów siły jednostki elektrycznej i spalinowej.

### 13. Bolid w ruchu

W tym paragrafie skrótowo omówimy wpływ siły docisku aerodynamicznego na zachowanie samochodu w warunkach drogowych. Z uwagi na ograniczoną objętość artykułu, szczegóły obliczeniowe przerzucone zostały do zadań z rozwiązaniami.

Dla danej mocy silnika (dla bolidów Formuły 1 jest to obecnie  $P = 750 \text{ KM}^{13}$  [42]), można obliczyć siłę ciągu  $F = \frac{P}{v}$ , jaką bolid może rozwijać przy danej prędkości  $v$ . Dla niskich wartości prędkości, siła ta jest bardzo duża, ale nie oznacza to nieograniczonego przyspieszenia bolidu. Przyspieszenie jest bowiem ograniczone tarciem. Zbyt szybko kręcące się koła powodują poślizg

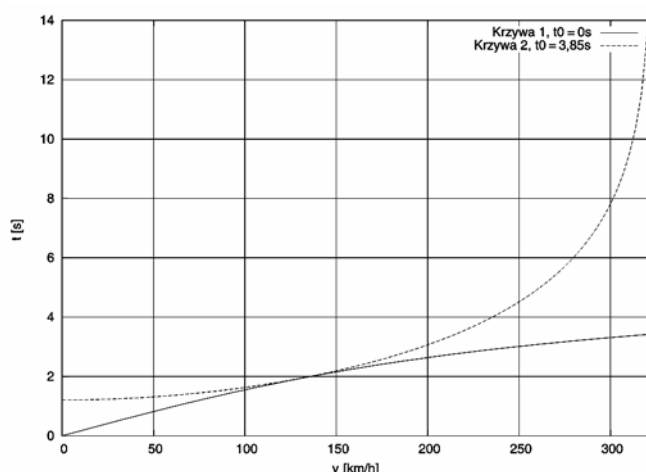
<sup>13</sup> Dawniej dopuszczano nawet moc  $P = 1000 \text{ KM}$ . Tak duża moc silnika wymaga efektywnych systemów chłodzenia: powietrze do układów chłodzenia napływa przez potężne wloty boczne bolidu. Z kolei powietrze do spalania mieszanki wnika przez wlot znajdujący się nad kokpitem kierowcy.



i rozpędzanie nie jest skuteczne. Dlatego przy niskich prędkościach to nie moc silnika ogranicza przyspieszenie bolidu, ale dostępna siła tarcia.

Dostępna siła tarcia w bolidzie rośnie z prędkością (dzięki dociskowi aerodynamicznemu). Przy prędkości 183 km/h docisk jest tak silny, że równy jest ciężarowi bolidu i bolid mógłby wówczas jeździć po suficie (zadanie 1). W efekcie, przy prędkości ok. 130 km/h (patrz zadanie 3), silnik może już wykorzystać pełną moc bez ryzyka poślizgu. Niestety jednak pełne wykorzystanie mocy na rozpędzanie masy bolidu ograniczone jest oporami powietrza, które bolid musi pokonać. Opory te dla bolidu są niebagatelne biorąc pod uwagę wysoki współczynnik oporów<sup>14</sup> ( $C_D = 1$  w porównaniu do  $C_D = 0,25$  osiąganego przez samochody seryjne – patrz zadanie 2) i w wysokich prędkościach dynamika bolidu ulega znacznemu osłabieniu.

Przyspieszenie bolidu, wyznaczone w obecności tych efektów pokazane jest na wykresie 12 (same obliczenia są treścią zadań 4 i 5). Wynika z tego, że bolid osiąga prędkość 100 km/h po 1,8 s, 200 km/h po 3,1 s, 300 km/h po 8 s, co potwierdzają dane doświadczalne [42].



Rys. 12. Wykres zależności prędkości i czasu podczas przyspieszania. Do prędkości 130 km/h obowiązuje krzywa „1”, dla wyższych prędkości – krzywa „2”

Oprócz możliwości przyspieszania ciekawe jest również rozpatrzenie zależności promienia skrętu od prędkości. Promień skrętu wyznaczamy z równowagi siły tarcia i siły odśrodkowej

<sup>14</sup> Niezwykłe? Aerodynamiczny samochód nie jest opływowy? Trzeba uświadomić sobie, że bolidy prezentują odsłonięte koła, a aerodynamika jest wykorzystywana również aktywnie do generowania docisku, co generuje dodatkowe opory powietrza.

$$R = \frac{mv^2}{f(mg + qv^2)} \quad (5)$$

Wykres zależności promienia skrętu od prędkości przedstawia rys. 13. Z rysunku wynika, że zakręt, który zwykły samochód pokonuje z prędkością 100 km/h, bolid Formuły 1 pokonuje z prędkością blisko 160 km/h. Dla wyższych prędkości różnice są jeszcze większe; zakręt dostępny dla zwykłego auta z prędkością 150 km/h bolid może pokonać z prędkością 280 km/h. Wszystko jest zasługą liniowego wzrostu  $R$  w zakresie dużych prędkości dla bolidu i parabolicznego dla zwykłego samochodu. To dlatego w wyścigu bolidu BMW M5 E60 ( $P = 507$  KM,  $v_{max} = 330$  km/h po zdjęciu blokady prędkości) i bolidu Williams-BMW, kierujący bolidem redaktor programu Fifth-Gear, Tiff Needell, krzyczał że „przyczepność jest niezwykła, [...] E60 jest tak straszliwie pokonany” [43].

Z wykresu można też odczytać prędkość, z jaką bolid może przejechać przez skrzyżowanie w mieście. Biorąc skrzyżowanie czteropasmowej drogi o szerokości pasa 2,5 m z zaokrąglonym na 5 m chodnikiem, mamy do dyspozycji promień skrętu rzędu  $R = 15$  m. Bolid może przejechać to skrzyżowanie przy prędkości 60 km/h, gdy zwykłe auto musi zwolnić do 38 km/h.

Ciekawe jest policzenie maksymalnego przyspieszenia bolidu przy docisku aerodynamicznym, który możliwy jest do wykorzystania przez silnik. W zadaniu 3 wykazujemy, że równość siły tarcia i maksymalnego ciągu silnika osiągnięta jest dla 131,5 km/h = 36,5 m/s. Podstawiając tę prędkość do wzoru na siłę docisku i oporu aerodynamicznego, z drugiego prawa Newtona uzyskujemy przyspieszenie:

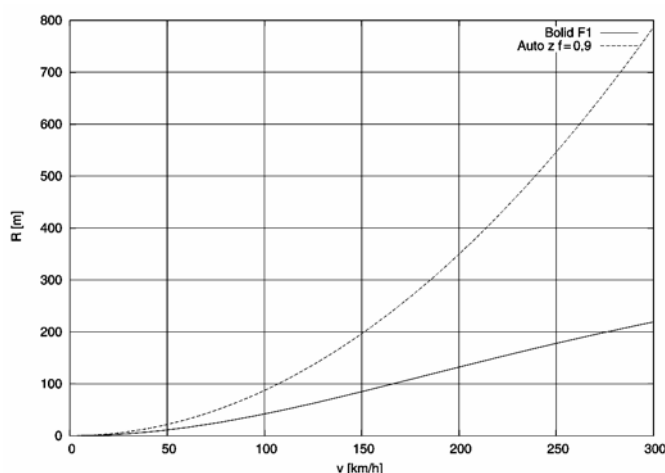
$$a = \left[ f + \frac{(fq - r)v^2}{mg} \right] g = 2,4g \quad (6)$$

To lepiej niż w samolocie (Boeing 777 rozpędza się na pasie startowym z przyspieszeniem 1,6 g [44], a to już wystarcza by solidnie wcisnąć pasażera w fotel). Możliwości hamowania bolidu są jeszcze większe, bo możemy rozpocząć hamowanie przy najwyższej możliwej prędkości, rzędu 320 km/h (90 m/s). Hamowanie nie jest ograniczone mocą silnika, sprzyjają nam opory powietrza i mamy możliwość uzyskania przeciążenia

$$a_h = \left[ f + \frac{(fq + r)v^2}{mg} \right] g = 8g \quad (7)$$

a to już jak w rakiecie kosmicznej (człon główny rakiety Wostok generował 912 kN ciągu przy masie po wypaleniu paliwa równej 8240 kg, licząc ze stat-

kiem kosmicznym i członem końcowym, daje teoretyczne przyspieszenie 11 g [45]<sup>15</sup>, a lądownik wchodzi w atmosferę hamując z przeciążeniem 8 g [46]).



Rys. 13. Wykres zależności promienia skrętu od prędkości. Przedstawiono krzywą dla omawianego bolidu Formuły 1 oraz dla zwykłego samochodu bez docisku aerodynamicznego z współczynnikiem tarcia równym  $f=0,9$

#### 14. Podsumowanie

Artykuł przedstawia elementy fizyki Formuły 1; wraz z podanymi odnośnikami powinien stanowić dobry punkt wyjścia dla dalszych studiów własnych. W pracy opierałem się w małym stopniu na źródłach książkowych i drukowanych artykułach. Niestety, w tych materiałach trudno znaleźć wszystkie możliwe informacje, jakie najczęściej przeciekają do opinii publicznej w wypowiedziach inżynierów udzielanych w wywiadach dla mediów. Stąd bardzo duża liczba podanych źródeł internetowych.

W przypadku stosowania źródeł internetowych starałem się każdą informację poprzeć kilkoma cytowaniami, aby zredukować prawdopodobieństwo cytowania prywatnych opinii jednego autora.

Bibliografia jest rozległa, więc pozwolę sobie trochę o niej opowiedzieć. Najważniejszą referencją, którą wykorzystywałem we wszystkich rozdziałach była oczywiście pozycja [1]. Fragmenty tej książki można znaleźć online w Internecie.

Z punktu widzenia aerodynamiki wartościową pozycją jest artykuł [13] i artykuły techniczne [14]. Te pozycje wraz z książką [1] stanowiły początkowy trzon opisu aerodynamiki samochodu w tym artykule. Podkład teoretyczny do

<sup>15</sup> We współczesnych raketach ciąg rakiety w miarę zmniejszania jej masy jest ograniczany, aby nie przekraczał „komfortowych” 3 g.

teorii skrzydła stanowią książki [15, 16, 20], ale dla osób niemających wiele czasu na czytanie, ciekawy może być wpis w Wikipedii [17].

Informacje ogólne o oponach najprościej uzyskać z dostępnej online książki [2]. Ważne informacje o oponach *stricte* wyścigowych można uzyskać z pracy [3], której fragmenty są dostępne online w Internecie. Szczegóły fizyczne dotyczące tarcia gumy o podłoże można następnie doczytać w [4, 5].

Rozdział dotyczący zawieszenia nie jest oparty o jakąś jedną wyczerpującą biblię, choć cytowana jest pozycja [31], która pretenduje do tej nazwy. Niestety, konieczne było zebranie informacji cząstkowych z różnych podanych źródeł. Podobnie sytuacja ma się z systemem KERS: jest to technologia zbyt świeża, by istniały dla niej kompleksowe opracowania i również trzeba wyszukiwać informacje z rozproszonych źródeł.

W sekcji literaturowej dotyczącej materiałów uzupełniających, cytuję różne dane, które służą ilustracji przedstawianych wyników i nie są bezpośrednio związane z teorią budowy bolidów wyścigowych. Wśród tych pozycji warto obejrzeć film [43], który naprawdę robi wrażenie.

Mam głęboką nadzieję, że ten artykuł zbuduje większą świadomość na temat czynników decydujących o zwycięstwie w Formule 1, a także zainteresuje czytelników ciekawymi zagadnieniami fizycznymi.

## Literatura

### [A] Ogólne materiały o samochodach wyścigowych

- [1] J. Katz, Racing car aerodynamics – designed for speed, Bentley Publishers, 1995.

### [B] Materiały dotyczące ogólnych informacji o oponach i tarcu

- [2] T. White, Getting to grips with tires, <http://www.gwocgb.co.uk>  
[3] P. Haney, The racing and high performance tire, Sports Car Magazine, 1, 2004.  
[4] R.H. Smith, Analyzing friction in the design of rubber products and their paired surfaces. CRC Press, 2008.  
[5] G. Heinrich, M. Klueppel, Rubber friction, tread deformation and tire traction, Wear, 265, 1052, 2008.  
[6] P. Symonds (Renault), Blistering and graining, first approximation,

### [B1] Materiały dotyczące informacji szczegółowych o oponach i tarcu

- [7] D. Wright, Formula 1 and road cars compared, <http://www.grandprix.com>  
[8] B. Erck, Wide Tyres, opis rozmowy z producentem opon dragsterów, <http://www.newton.dep.anl.gov>  
[9] Bridgestone, <http://www.bridgestonemotorsport.com>  
[10] Wikipedia, Hydroplaning (tires)  
[11] Bridgestone, Tyre use in Formula One, <http://www.fltechnical.net>  
[12] D. Weitzenhof, Suspension handling – basic suspension and set up principles, NEOHIO comp. clinic, 2005.

**[C] Materiały dotyczące aerodynamiki bolidów**

- [13] G. Seljak, Race car aerodynamics <http://www-fl.ijs.si/~rudi/sola/RaceCarAerodynamics.pdf>
- [14] W. Gray, Taking the lid off F1: Formula one technical analysis, <http://atlasf1.autosport.com>

**[C1] Materiały dotyczące mechaniki płynów i aerodynamiki ogólnej**

- [15] L.D. Landau, E.M. Lifszyc, Hydrodynamika, PWN 1994.
- [16] B.W. McCormick, Aerodynamics, aeronautics and flight mechanics, Wiley 1995.
- [17] Wikipedia: Powstawanie siły nośnej
- [18] Wikipedia: Przeciągnięcie

**[C2] Materiały dotyczące specjalizowanych urządzeń aerodynamicznych**

- [19] D. Esser, High lift devices, Woman Pilot, 1998.
- [20] D.F. Anderson, S. Eberhardt, Understanding Flight, McGraw-Hill, 2001.
- [21] R. Smith, Secrets of underbody tunnels, rear diffusers and Venturis, <http://www.symscape.com>
- [22] J. Saward, Applying science and commonsense to overtaking, <http://www.grandprix.com>
- [23] L. Butcher, Diffusers: They are legal, Racecar engineering 2009, <http://www.racecar-engineering.com>

**[C3] Materiały dotyczące sensu stosowania odsłoniętych kół w Formule 1**

- [24] W. Melissen, Mercedes-Benz W196, <http://www.ultimatecarpage.com>
- [25] Why open-wheelers? (forum) <http://f1db.com>
- [26] Były mistrz świata Juan Manuel Fangio, <http://www.f1wm.pl>
- [27] Wikipedia: Mercedes-Benz W196

**[D] Materiały dotyczące zawieszenia bolidów**

- [28] K. Collantine, Banned! Active suspension, <http://www.f1fanatic.co.uk>
- [29] D. Wright, Formula 1 suspension trends, <http://www.grandprix.com>
- [30] Double wishbones suspension <http://www.ukar.com>
- [31] Car suspension bible, <http://www.carbibles.com>
- [32] T. Foale, Spring into action, w Performance, Tuning and Sports Car, 1988, <http://www.tonyfoale.com/Articles/carstuff/spring.htm>

**[E] Materiały dotyczące KERS**

- [33] Toyota Prius: Hybrid system overview
- [34] Wikipedia, Hybrid synergy drive
- [35] Williams hybrid power KERS system, YouTube
- [36] Wikipedia, Regenerative Brake
- [37] Tackling KERS in Formula One, <http://www.f1technical.net>
- [38] Renault answer 10 questions about KERS, <http://www.formula1.com>
- [39] E.A. Hart, Toyota Prius – power split device, <http://eahart.com/prius/psd>
- [40] G. Davies, Heretical mode from a different perspective, <http://prius.ecrostech.com>

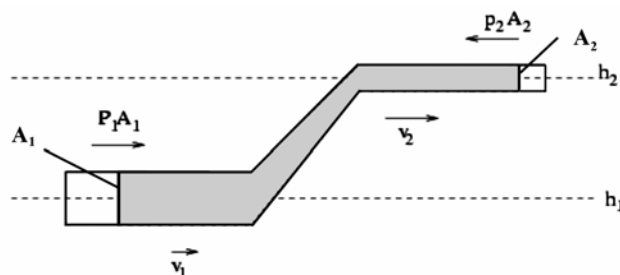
**[F] Materiały uzupełniające**

- [41] R. Resnick, D. Halliday, Fizyka, PWN.
- [42] Wikipedia, Samochód Formuły 1
- [43] YouTube, Fifth Gear BMW F1 vs. BMW M5
- [44] Boeing 777 facts, [http://www.boeing.com/commercial/777family/pf/pf\\_facts.html](http://www.boeing.com/commercial/777family/pf/pf_facts.html)
- [45] Wikipedia: Wostok (rocket family)
- [46] Wikipedia: Wostok spacecraft

Jednym z podstawowych praw jest *prawo Bernoulliego*. Dla danej strugi płynu (np. powietrza opływającego bolid), możemy napisać równanie wiążące stan dwóch punktów takiej strugi:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2$$

gdzie  $p_1$ ,  $v_1$ ,  $h_1$  – ciśnienie, szybkość, wysokość elementu powierzchni  $A_1$  strugi, a  $p_2$ ,  $v_2$ ,  $h_2$  dla powierzchni  $A_2$  strugi. Na rysunku element strugi zamknięty w rurze o zmiennym przekroju  $A$ .



Kolejna ważna relacja: prawo ciągłości strugi. Objętość, która w jednostce czasu ubywa w dolnej części rury musi pojawić się u góry (zakładając nieściśliwość płynu):

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta t} = \frac{\Delta V_2}{\Delta t}$$

co można przepisać jako

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$