



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

AERODYNAMIKA AUTOMOBILŮ V POVÁLEČNÉM OBDOBÍ

POST-WAR AUTOMOTIVE AERODYNAMICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Šmerda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Čavoj

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Ondřej Šmerda
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Čavoj
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Aerodynamika automobilů v poválečném období

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled vývoje automobilové aerodynamiky v poválečném období – principy, kterými se řídil návrh aerodynamiky automobilu, dobové trendy a vozy aerodynamicky významné nebo neobvyklé.

Cíle bakalářské práce:

Zmapování poválečné fáze vývoje automobilové aerodynamiky (cca 50. až 80. léta 20. století) včetně závodních nebo rekordních vozů.

Srovnání tehdejších "aerodynamických" automobilů s dnešními.

Seznam doporučené literatury:

HUCHO, W. H. Aerodynamics of road vehicles. 4. ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. ISBN 07-680-0029-7.

An Illustrated History Of Automotive Aerodynamics: Part 2 (1940 – 1959). Curbside Classic [online]. 2012 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z:

<http://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-part-2-1940-1959/>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá zmapováním vývoje automobilové aerodynamiky v poválečném období. Je zaměřena na principy, kterými se návrh automobilu řídil. Vývoj je demonstrován automobily aerodynamicky významnými a neobvyklými, a to včetně závodních a rekordních vozů. V neposlední řadě práce srovnává tehdejší vozy s těmi dnešními a uvádí nedostatky automobilů daného období z dnešní perspektivy.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamika, osobní automobil, proudění, aerodynamický odpor, historický vývoj

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with charting the development of the automotive aerodynamics in the post-war period. It focuses on principles that go along with car design. The development is demonstrated by aerodynamically significant and unusual cars including racing and record cars. Last but not least, the work compares those cars with today's cars and describes drawbacks of the cars of the given period from today's perspective.

KEYWORDS

aerodynamics, passenger car, flowing, aerodynamic drag, historic development

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠMERDA, O. Aerodynamika automobilů v poválečném období. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 48 s. Vedoucí diplomové práce Ondřej Čavoj.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Čavoje a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Ondřej Šmerda

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Čavojovi za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

OBSAH

Úvod	10
1 Teorie aerodynamiky	11
1.1 Aerodynamický odpor	11
1.1.1 Metody měření aerodynamického odporu	13
1.2 Vizualizace proudění	13
1.3 Venturiho efekt	14
2 Vývoj v Americe	15
2.1 Vývoj před ropnou krizí 1973	15
2.1.1 Nash Airflyte	16
2.1.2 Tucker Torpedo	17
2.1.3 Lakester	17
2.1.4 Norman Timbs Special	18
2.1.5 GM Firebird XP-21	18
2.2 Vývoj po ropné krizi 1973	19
2.2.1 Ford Ghia Probe	19
3 Vývoj v Evropě	22
3.1 40. léta	22
3.1.1 Tatra 87	22
3.1.2 Tatra 600 Tatraplan	24
3.1.3 Saab Ursaab	25
3.1.4 Saab 92	26
3.1.5 Panhard Dynavia	26
3.2 50. léta	27
3.2.1 Tatra 603	27
3.2.2 Citroen DS	28
3.2.3 Alfa Romeo Disco Volante	29
3.2.4 Alfa Romeo BAT	30
3.2.5 Mercedes-Benz 300 SLR	32
3.3 60. léta	33
3.3.1 Jaguar E-type	33
3.3.2 Alfa Rome Giulia	34
3.3.3 Pininfarina BMC-1800 Berlina Aerodinamica	35
3.3.4 Panhard CD LM64	36
3.4 70. léta	36
3.4.1 BMW 3.0 CSL	36

3.4.2	Citroën CX.....	37
3.5	Aerodynamika ve Formuli 1	38
3.5.1	Lotus 49	38
3.5.2	Tyrrel P34	39
3.5.3	Lotus 78	40
3.5.4	Brabham BT46B	41
	Závěr.....	42
	Seznam použitých zkratek a symbolů	48

ÚVOD

Automobil při svém vývoji urazil dlouhou a složitou cestu. Z různých variací kočáru taženého koňmi se vyvinul v moderní komfortní automobil schopný dosáhnout vysokých rychlostí. Už v počátcích automobilismu bylo jasné, že tvar automobilu má vliv na maximální rychlost vozu. První aerodynamické vozy přejímaly své tvary z letectví a vznikaly za účelem dosažení vyšších rychlostí. Později se přišlo na to, že aerodynamické vlastnosti vozu ovlivňují nejen výkon automobilu, ale také jeho ovladatelnost, bezpečnost a pohodlí. Nízký odpor vzduchu je důležitý pro hospodárnost provozu a nízké emise. Se stále zvyšujícími cenami pohonných hmot a přísnějšími předpisy se aerodynamika stala jednou z nejdůležitějších vlastností automobilu. Dnešní kvalitní automobil musí splňovat nespočet požadavků, jako jsou např. nízká spotřeba paliva a emisí, směrová stabilita, nízký aerodynamický hluk, dostatečné chlazení motoru a jiných teplem namáhaných součástí a další. Všechny tyto parametry do jisté míry závisí na proudění vzduchu kolem vozidla, ale i vlastním vozidlem. Proto se dnes věnuje aerodynamice značné úsilí a finanční prostředky. S výjimkou závodního automobilu není tvar vozu primárně určený k vytvoření konkrétní aerodynamické vlastnosti, jako je tomu např. u křídel letadla, která jsou tvarována tak, aby vytvářela vztlak. Aerodynamika vozu obvykle není vytvářena úmyslně, ale je důsledkem designově navrženého tvaru. Tvar vozu mnohdy podléhá moderním trendům doby, ve které je vyvíjen.

Cílem této práce by mělo být zhodnotit vývoj automobilové aerodynamiky v poválečném období, a to včetně rekordních a závodních vozů. Práce se zaměřuje na dobové trendy a principy, kterými se návrhy automobilů řídily. Pro velké množství a různorodost vyráběných automobilů v období po 2. světové válce jsou přelomové aerodynamické principy a prvky popisovány na vybraných automobilech.

1 TEORIE AERODYNAMIKY

Aerodynamika je fyzikální disciplína, která se zabývá silovým působením vzduchu na pohybující se tělesa a zkoumá proudění či obtékání atmosférického vzduchu kolem nich. Je jednou z klíčových disciplín při vývoji vozidel. Aerodynamika ovlivňuje výkon, hospodárnost provozu, emise, maximální rychlost a do jisté míry i design vozidla. Aerodynamika zajišťuje také chlazení motoru, brzd, výfukových plynů ve výfukovém systému a v neposlední řadě vytváří příjemné klima pro pasažéry uvnitř vozidla. Správné obtékání vzduchu kolem vozidla přispívá ke stabilitě vozidla v přímém směru a také k zabránění hromadění dešťových kapek na čelním skle a vnějších zrcátkách, pomáhá zamezit nadzvednutí stěračů, udržet přední světlomety v čistotě a v neposlední řadě snížit aerodynamický hluk. Aerodynamika vozidel má kořeny v aerodynamice letadel.

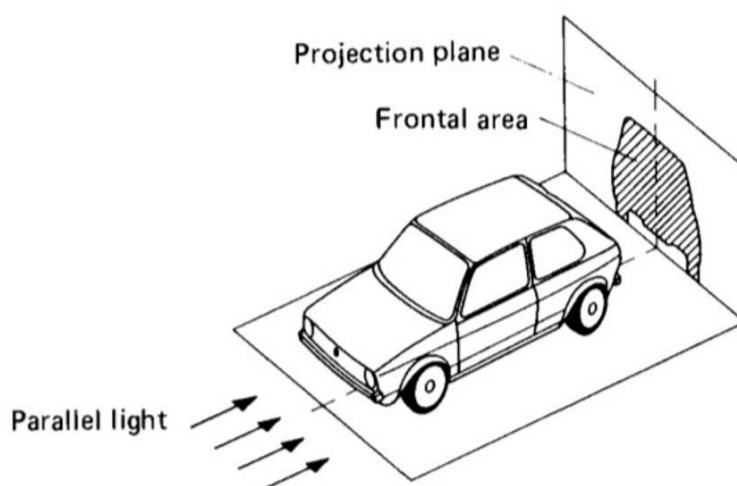
1.1 AERODYNAMICKÝ ODPOR

Při pohybu tělesa klade prostředí odpor proti jeho pohybu. Při nízkých rychlostech je odporová síla relativně malá, při vyšších rychlostech však odporová síla vzrůstá s druhou mocninou rychlosti. Kromě toho se vzduch tře o karoserii a tím vzniká další odpor. Na povrch karosérie působí různé tlaky a výslednice těchto tlaků udává velikost a směr celkového aerodynamického odporu.

Celkový aerodynamický odpor se vypočítá podle vztahu [1]:

$$D = c_x \frac{\rho}{2} S_x v^2, \quad (1)$$

kde c_x je součinitel odporu, ρ hustota kapaliny, S_x průmět čelní plochy vozidla a v náporová rychlost.



Obr. 1.1 Znáornění průmětu čelní plochy [1]

Synonymem pro celou vědní disciplínu se stal součinitel odporu, což je bezrozměrné číslo, které charakterizuje vliv odporu vzduchu a čistotu proudění kolem vozidla. Zahrnuje jak tvarový odpor karoserie, tak odpor třením vzduchu o její povrch. Jeho význam je podstatný, neboť jej můžeme porovnávat mezi různými vozy.

Proudnice (nebo též proudová čára) je trajektorie pohybu jednotlivých částic. Okamžitá rychlost jednotlivých částic je vždy tečnou k proudnici. Proudnice se navzájem neprotínají. Jsou-li proudnice rovnoběžné, jedná se o laminární proudění. Jsou-li proudnice různoběžné a vytvářejí víry, jedná se o proudění turbulentní.

Velká část celkového aerodynamického odporu automobilu je způsobena zadní částí vozu. Zatímco při proudění kolem přední části a boků vozu vzduch kopíruje tvar karoserie, na zadní odtokové hraně střechy dochází k utržení proudu, při kterém vzniká oblast takzvaného „úplavu“. V oblasti úplavu se laminární proudění mění na turbulentní. Tato oblast způsobuje značný aerodynamický odpor a hlavní úlohou aerodynamiky je zabránit vzniku této oblasti nebo ji alespoň regulovat.



Obr. 1.2 Zobrazení oblasti úplavu u vozu Volkswagen Golf 1 [1]

Pro správné aerodynamické vlastnosti je důležité, aby přední i zadní část vozu byly dobře navrženy. Proudnicově řešená karoserie musí mít pozvolné změny průřezu karosérie, aby urychlení vzduchu bylo malé. Na karoserii nemají být svislé plochy (např. chladiče, přední sklo, apod.). Naopak plochy by měly být co nejvíce skloněné. Dlouhý šikmý předek vozu a značně skloněné čelní sklo snižují odpor a přitlačují vůz k zemi. Snahou je zajistit dobré obtékání karoserie a posunout bod odtržení proudu vzduchu co nejvíce dozadu.

V neposlední řadě je třeba, aby aerodynamický hluk jak od vnějšího, tak od vnitřního proudění byl co nejmenší. Otvory v karoserii, kterými je vnitřní proudění spojeno s vnějším, musí být navrženy a umístěny tak, aby byl zamezen přístup vody do interiéru i v extrémních podmínkách, jako je např. mytí vozidla.

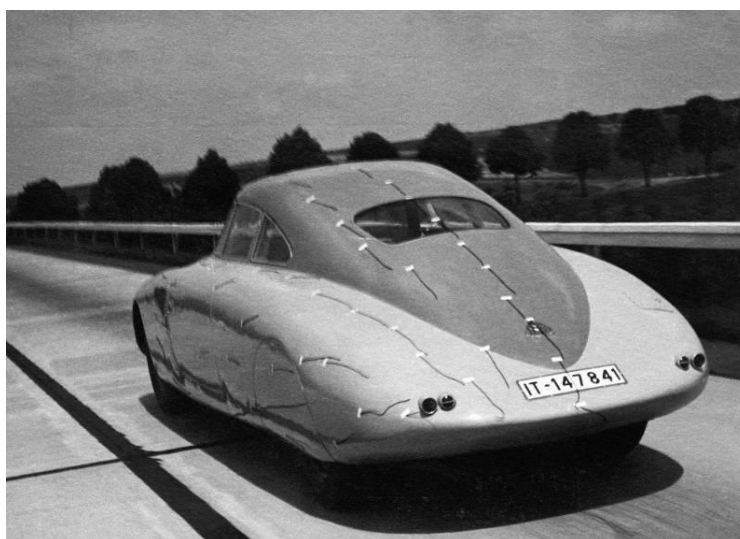
Zatímco v minulosti bylo motivací ke snižování odporu dosažení vyšší maximální rychlosti vozidla, dnes jsou hlavními důvody hospodárnost provozu a emise. Propracované aerodynamické vlastnosti vozu a nízký odpor vzduchu dokážou uspořit více paliva než odlehčení vozu.

1.1.1 METODY MĚŘENÍ AERODYNAMICKÉHO ODPORU

Měření v aerodynamickém tunelu je hlavní metodou k posuzování toku kolem vozidla. Aerodynamický tunel se skládá z ventilátoru, ze zařízení sloužících pro měření aerodynamických sil a momentů, z přístrojů zaznamenávajících hodnotu tlaku na povrchu vozidla apod. Aerodynamické vlastnosti karoserie lze zkusit na skutečných vozech nebo na modelech. Měřítko modelu by mělo být dostatečně velké a model musí přesně odpovídat skutečnosti, a to zejména pokud se týká spodku vozu, zapuštění oken, průchodu vzduchu chladičem apod. Jen průchod chladičového vzduchu vozem může zhoršit součinitel odporu až o 8 % i více [2]. Hodnoty zjištěné na modelech bývají přibližně o 10 % lepší než na skutečném voze [2]. Výhodou při vývoji je samozřejmě dostatečně velký tunel, ve kterém lze ofukovat skutečný vůz. Méně dokonalou náhradou za tunel jsou tzv. dojezdové zkoušky celého vozu. Vozidlo se rozjede za bezvětrí po vodorovné přímé trati a při dosažení předem stanovené rychlosti se vyřadí převodový stupeň a vozidlo se dále pohybuje pouze setrvačností. Jízdní odpory snižují rychlost vozidla až do zastavení. Měřením času potřebného pro projetí daného úseku se získají údaje pro výpočet jízdních odporů.

1.2 VIZUALIZACE PROUDĚNÍ

K vizualizaci obtékání vozidla vzduchem se dnes používá aerodynamický tunel a generátor kouře. Dříve se proudění kolem karoserie dalo zjistit nalepenými bavlněnými nitkami na povrchu karoserie. V oblasti dobrého obtékání karoserie nitky leží na povrchu ve směru proudění vzduchu. V oblasti, kde proud vzduchu je již od povrchu odtržen, převládá víření, které se projeví neklidným kmitáním vláken. Toto pozorování se dalo provádět i v aerodynamickém tunelu pro celý vůz, nebo levněji jízdou na dálnici nebo zkušební trati a pozorováním z vedle jedoucího vozu.



Obr. 1.3 Vizualizace proudění pomocí bavlněných nitek [4]

1.3 VENTURIHO EFEKT

Venturiho efekt vychází z Bernoulliho rovnice, což je vztah užívaný v mechanice tekutin, který vyjadřuje zákon o zachování energie.

Bernoulliho rovnice pro stacionární proudění a ideální kapalinu vypadá takto:

$$\frac{c^2}{2} + \frac{p}{\rho} - U = B_{\text{KONST}}, \quad (2)$$

kde c je rychlost proudění, p je tlak, ρ hustota kapaliny, U je měrná potenciální energie a B_{KONST} je Bernoulliho konstanta. Bernoulliho rovnice platí pro body ležící na jedné proudnici. Bernoulliho konstanta má na celé proudnici stejnou hodnotu, avšak různé proudnice mají hodnotu rozdílnou.

Protože z rovnice kontinuity je jasné, že průtok kapaliny či vzduchu musí být ve všech místech konstantní, musí proudění v menším průřezu trubice zvýšit rychlost. Takto získaná kinetická energie se vyrovná snížením tlaku. Na obrázku 1.4 je pokles tlaku demonstrován Vztah pro pokles tlaku plyne přímo z Bernoulliho rovnice. Tohoto jevu se využívá např. u podvozků monopostů Formule 1. Podvozek je tvarován tak, aby pod vozem vzduch proudil rychleji, dochází k podtlaku, který je kompenzován silou tlačící vůz k vozovce. Venturiho efekt se také někdy nazývá hydrodynamický či aerodynamický paradox.

2 VÝVOJ V AMERICE

Třicátá léta minulého století jsou považována za velký průlom v automobilové aerodynamice. Díky proudnicovým tvarům se automobil změnil z kočáru taženého koňmi na moderní automobil, který byl schopný dosáhnout vysokých rychlostí. Aerodynamické tvary měly téměř všudypřítomný vliv. Na konci třicátých let se každý automobilový výrobce snažil o co nejdokonalejší proudnicový tvar karoserie. Předpokládalo se, že po druhé světové válce se bude v tomto trendu proudnicových karoserií pokračovat i nadále. Realita se však vyvinula odlišně, a to především v Americe. Po druhé světové válce vládly ve Spojených státech rozměrné osobní automobily, které svými tvary aerodynamiku spíše popíraly. Důvodem bylo velmi levné palivo a to, že v USA vládla poválečná konjunktura. Spíše než rychlost, ovladatelnost a ekonomiku provozu tak nabízely tyto automobily luxus a pohodlí. Součinitel odporu pohybující se kolem hodnoty $c_x = 0,60$ [5] byl pro tyto vozy běžný. Až ropná krize a zdražení ropy v roce 1973 donutily výrobce automobilů, aby se při vývoji běžných vozů zabývali také aerodynamikou.

2.1 VÝVOJ PŘED ROPNOU KRIZÍ 1973

Původní nadšení a příslib dobrého směru vývoje aerodynamiky z třicátých let byly zavrženy jako jen další výstřelek stylu. Trendem se staly větší, hranatější a méně funkční tvary. V koncernu General Motors (dále jen GM), jedním z hlavních výrobců automobilů v USA, se rozhodli, že zachovají klasické tvary automobilu, a sice dlouhou přední kapotu s výraznou velkou přední mřížkou a krátkou zadní část. Tvar proudnicových karoserií třicátých let tak v podstatě skončil dříve, než mohl být tento tvar plně využit. Automobilka Cadillac patřící koncernu GM měla několik dalších let vůdčí postavení v designu amerických automobilů s důrazem na tyto klasické proporce. Se stále silnějšími osmiválcovými motory a klesající cenou ropy nebyla nutná snaha o převratné aerodynamické projekty, zvláště když měli lidé v paměti neúspěch vozu Chrysler Airflow z roku 1934. Tento vůz je na západě považován jako první sériově vyráběný vůz s aerodynamickou karoserií. Chrysler Airflow měl v Americe podobný ohlas jako u nás Tatra 77. Bylo to způsobeno hlavně velkou propagační akcí, kdy konstruktéři vychvalovali vlastnosti vozidla a kladli důraz na to, že design byl vytvořen v aerodynamickém tunelu. I přes velkou snahu automobilky byl Airflow komerčním neúspěchem.

Vývoj aerodynamiky se tak omezil pouze na zadní ploutve. Automobil Cadillac Caddy z roku 1948 je považován za první automobil s tímto prvkem. I přes tuto novinku zachovával vůz klasické proporce obvyklé pro koncern GM. Zadní ploutve měly údajně výborný efekt na stabilitu vozu. Toto tvrzení je přinejmenším nadhodnocené. Spíše než o aerodynamické vlastnosti šlo o vzhled vozu. Kvůli vyšším nákladům se upustilo od umístění motorů vzadu či předního náhonu a zvítězila konvenční konstrukce s motorem vpředu a náhonem zadních kol.



Obr. 2.2 Automobil Cadillac Caddy z roku 1948 [3]

Také vůz Studebaker Champion ukazuje útlum aerodynamiky a spíše se zaměřuje na trend doby: pontonová karoserie, dlouhá před' a z hlediska funkce zbytečně dlouhé zadní blatníky. Delší zád' byla pozůstatkem konceptu s umístěním motoru vzadu, který byl zavržen.



Obr. 2.3 Zadní část vozu Studebaker Champion z roku 1951 [6]

2.1.1 NASH AIRFLYTE

V USA však byly i automobilky, které se vývoji v oblasti aerodynamiky věnovaly zvýšenou měrou. Jednou z nich byla automobilka Nash Motors Company. Konstrukce jejich nového modelu Airflyte z roku 1949 vykazuje poměrně komplexní pojetí základních principů aerodynamiky. Hlavní konstruktér automobilky Nash Nils Wahlberg věřil, že při dalším vývoji automobilů se bude více dbát na aerodynamiku za účelem stabilnější jízdy, lepší ovladatelnosti vozu, menší spotřeby paliva a tišší jízdy. Tvar karoserie byl navržen v aerodynamickém tunelu. Ve snaze o proudnicový tvar měl vůz postupně svažující se zád', hladké boky a přední i zadní kola byla částečně zakrytována. Částečné zakrytování však zapříčinilo omezený poloměr otáčení předních kol. Byl to jeden z prvních vozů, které měly parabolicky zahnuté čelní sklo. Vůz Airflyte nabízel tichou jízdu, ale i prostor a pohodlí.



Obr. 2.4 Vůz Nash Airflyte z roku 1949 [3]

2.1.2 TUCKER TORPEDO

Dalším příkladem automobilu, u kterého aerodynamika hrála velkou roli, byl Tucker Torpedo vyráběný v roce 1948. Tucker Torpedo ukazuje směr, kterým se design amerických aut mohl vyvíjet. Se svým vzduchem chlazeným motorem umístěným vzadu je jasné, že designér Alex Tremulis se inspiroval Tatro 77. Hodnota součinitele odporu $c_x = 0,30$ [3] je na tehdejší dobu výborná, pořád je však velmi vzdálená od hodnoty $c_x = 0,212$ [7] vozu Tatra 77. Ve srovnání s tím, co se dělo v Evropě, byl Tucker Torpedo už trochu zastaralý. Automobilka Tucker ukončila v roce 1949 svou činnost, a tak bylo vyrobeno pouze 52 kusů [5].



Obr. 2.5 Automobil Tucker Torpedo [3]

2.1.3 LAKESTER

Po druhé světové válce bylo velmi v oblibě místo s názvem Solné pláně Bonneville, kde bylo možné závodit a zkusit maximální rychlost vozů. Brzy se zjistilo, že aerodynamika je klíčem k vyšším rychlostem. Po válce zůstalo k dispozici velké množství pomocných externích palivových nádrží letadel, které byly velmi levné. Tyto nádrže se použily jako karoserie vozu. A tak vznikl Lakester, vůz s velmi aerodynamickými tvary a odkrytými koly, určený k rychlostním rekordům na solných pláních.



Obr. 2.6 Lakester [3]

2.1.4 NORMAN TIMBS SPECIAL

Jedním z mála aerodynamických konceptů před ropnou krizí byl vůz Norman Timbs Special. Konstruktor Norman E. Timbs vytvořil na základech osmiválcového vozu Buick v roce 1947 koncept automobilu, do jehož podvozku implementoval systém odpružení z vozu Ford a motor pro pohon zadní nápravy. Návrh vozu byl ovlivněn několika závodními vozy před druhou světovou válkou. Timbs se snažil o proudnicové linie skloubené s nízkou výškou vozu. Vypracoval rozsáhlé studie, pracoval s maketami a modely v měřítku 1:1 a vůz vyvíjel přes dva roky. Na rozdíl od ostatních vozů té doby byl motor umístěn uprostřed. Kokpit před motorem postrádal střechu i dveře a přední sklo bylo velmi krátké a strmé. Přední část se postupně svažovala k zaoblenému nosu. Navzdory vyšší hmotnosti dokázal vůz vyvinout rychlost téměř 200 km/h [5].

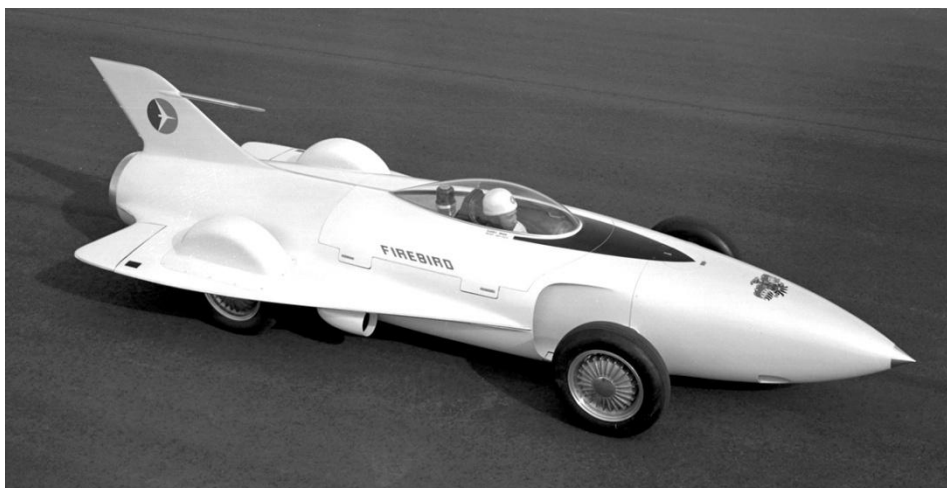


Obr. 2.7 Vůz Norman Timbs Special [8]

2.1.5 GM FIREBIRD XP-21

Firebird XP-21 z roku 1954 byl ztělesněním aerodynamického pojetí vozu, protože kopíroval leteckou techniku. Firebird byl vůbec prvním vozidlem s turbínovým motorem postaveným ve Spojených státech. Jeho designér Harley J. Earl chtěl ověřit použitelnost turbínového motoru v praxi. Vůz měl kabinu ve tvaru kapky, náznak křídel a zádový vertikální stabilizátor. Ve

špičaté přídí byla palivová nádrž. Vůz však byl velmi hlučný a značně neekonomický, neboť jeho turbínový motor nejenže spotřebovával neúměrné množství paliva, ale ze zadě proudily plyny s teplotou přesahující 500 °C. Koncern GM během 50. let vyvinul ještě dva další podobné vozy, Firebird II z roku 1956 a Firebird III z roku 1959.



Obr. 2.8 Vůz GM Firebird XP-21 s turbínovým motorem [9]

2.2 VÝVOJ PO ROPNÉ KRIZI 1973

Energetická krize, náhlé zdražení ropy a snaha o lepší životní prostředí donutily automobilky více se zamýšlet nad způsoby, jak snížit spotřebu a emise. Aerodynamika proto našla své stálé místo ve vývoji automobilů.

2.2.1 FORD GHIA PROBE

V 70. a 80. letech postavila automobilka Ford ve spolupráci s designovým studiem Ghia celou sérii aerodynamických experimentálních vozů Probe. Tyto vozy sloužily pro vývoj sériových automobilů. První vůz Probe I z roku 1979 byl začátek nové éry. Vedoucí designového oddělení firmy Ford Don Kopka věřil, že lze realizovat vůz s pokročilými aerodynamickými vlastnostmi bez zásadního vlivu na styl a osobitost designu. Probe I měl výrazný klínovitý tvar karoserie se součinitelem odporu $c_x = 0,25$ [10]. Šasi a motor o objemu 2,3 l a výkonu 127 kW pocházel z vozu Ford Mustang. Charakteristickými se staly výklopné světlometry a zakrytá zadní kola. Tento koncept byl výrazným krokem v designu amerických automobilů.



Obr. 2.9 Experimentální vůz Ford Ghia Probe I [10]

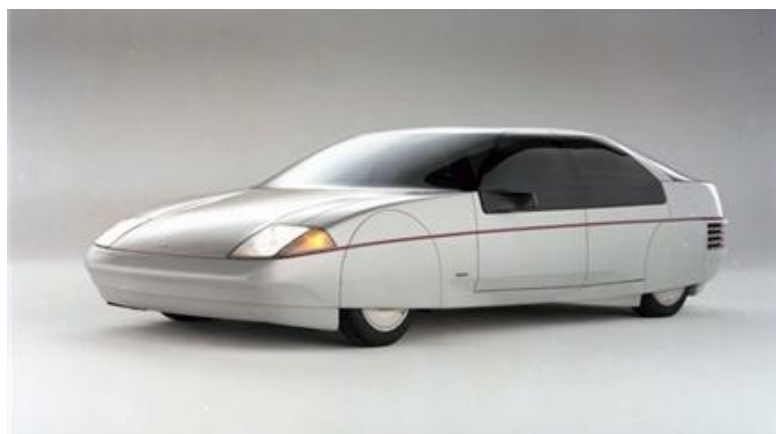
Rok na to vznikl Probe II, což byl konvenčněji vypadající čtyřdveřový vůz se splývavou zádí.

O další rok později přišel Probe III, který byl předobrazem sériového vozu Ford Sierra. Vůz měl zakrytovaný celý podvozek a vpředu elektronicky řízený spoiler. V rychlostech nad 40 km/h se spoiler snížil více k zemi, aby vytvořil pod vozem Venturiho efekt, čímž došlo k přísátí vozu k vozovce, omezil se vztlak a vůz byl stabilnější. V rychlostech menších než 40 km/h, kdy není přísavný efekt třeba, se spoiler zase zvýšil, neboť hrozilo riziko poškození o obrubník např. při parkování. Kryty kol byly ploché s malými otvory po obvodu pro přístup chladícího vzduchu k brzdám. Pro omezení turbulencí v důsledku otáčení kol byly použity úzké pneumatiky s nízkým profilem. Aerodynamika v zadní části vozu byla zlepšena díky liště pod nárazníkem, která přispěla k žádoucímu vedení proudu vzduchu pod vozidlem a snížení znečištění zadních světel.



Obr. 2.10 Zadní část vozu Ford Ghia Probe III [11]

V roce 1982 studio Ghia s automobilkou Ford představily mnohem odvážnější koncept Probe IV, který se pyšnil součinitelem odporu $c_x = 0,152$ [12], což je stejná hodnota, jakou disponoval stíhací letoun F-16. Této hodnoty dosáhl především díky zakrytovaným kolům, pečlivým řízením obtékání vzduchu, minimální čelní ploše a spoileru u spodní části čelního skla. Malá světlá výška minimalizovala průtok vzduchu pod vozidlem a Probe IV měl schopnost svou výšku měnit v závislosti na rychlosti vozu. Při vyšších rychlostech se zadní část mohla zvýšit až o 6 palců, zatímco přední část snížit o 4 palce, což zlepšilo stabilitu a celkový průchod vzduchu vozidlem. Elektricky ovládaný přední spoiler kompenzoval změnu výšky vozu nebo případný terén. Světla byla chráněna plastovým krytem. Chladič a kompresor klimatizace byly umístěny dozadu za účelem eliminace odporu vzduchu proudícího na chladič. Jediným narušením dokonalého obtékání byla vnější zrcátka. Kryty předních kol byly v závislosti na natočení předních kol pohyblivé, a tak umožňovaly využít plný poloměr zatáčení.



Obr. 2.11 Ford Ghia Probe IV [12]

Vyvrcholením série experimentálních vozů byl dvoudveřový koncept Probe V z roku 1984. U tohoto vozu bylo dosaženo hodnoty součinitele odporu $c_x = 0,137$ [13], jež byla z této řady vozů nejlepší. Umístění motoru uprostřed vozu umožnilo snížení hladké přední části vozu. Tento vůz uzavřel řadu pěti automobilů, které byly pokusem o dosažení co nejnižšího součinitele odporu.



Obr. 2.12 Ford Ghia Probe V [13]

3 VÝVOJ V EVROPĚ

Zatímco v USA byla aerodynamická třicátá léta pouze výstřelkem doby, v Evropě byla třicátá léta pouze začátkem přicházejícího vývoje aerodynamiky. V Evropě vládly po 2. světové válce malé a levné vozy, protože ve válkou zbitáčené Evropě nebyla kupní síla. Poválečná Evropa nepřála velkoobjemovým motorům jako před válkou, a proto se konstruktéři snažili kompenzovat subjektivně vnímaný úbytek síly jiným způsobem. Vlivem dražších pohonných hmot, jiné ekonomiky a progresivnějšího myšlení než v Americe se aerodynamika stávala stále důležitějším atributem automobilů. A právě ve spojení dobrých aerodynamických vlastností s malým lehkým vozem viděla Evropa průlom ve výkonu, efektivitě a cenové dostupnosti vozidla pro všechny.

3.1 40. LÉTA

3.1.1 TATRA 87

Automobilka Tatra sídlící v Kopřivnici se odvážila jako první použít proudnicový tvar, nejdokonalejší aerodynamický tvar pro sériově vyráběný automobil.

Tatra 87 vycházela z modelu Tatra 77, který je pravděpodobně jedním z klíčových automobilů ve vývoji aerodynamiky. Tatra 77 je uváděna jako první sériově vyráběný automobil s aerodynamickou karoserií. V západních médiích se jako první sériově vyráběný vůz uvádí Chrysler Airflow. Protože se oba vozy objevily zhruba ve stejnou dobu, je obtížné rozhodnout, který z nich byl první.

Na nástupci Tatry 77 spolupracovali Hans Ledwinka, Erich Überlacker a Paul Jaray. Oproti Tatře 77 byl model Tatra 87 kompaktnější a lehčí o celých 330 kg, a to hlavně díky použití materiálů jako hliník a slitiny hořčíku. Vůz měl hnanou zadní nápravu a vzduchem chlazený motor uložený vzadu, čímž odpadla potřeba obvyklého středového tunelu pro hnací hřídel a výfukové potrubí. Tím se dosáhlo nižší hmotnosti a podvozek mohl být velmi plochý a hladký, což přispělo k dobrým aerodynamickým vlastnostem vozu. Důraz na aerodynamiku je patrný např. na zapuštěných klikách dveří. Vzhledem k tomu, že ještě nebyla zvládnuta výroba ohýbaných panoramatických skel, bylo z důvodu aerodynamiky použito třídílné sklo (jedno velké, dvě menší skloněná po směru jízdy). Se součinitelem odporu $c_x = 0,36$ dosahoval vůz maximální rychlosti 160 km/h při spotřebě pouhých 12,5 litrů na sto kilometrů [14]. I proto dosáhla Tatra 87 velkého komerčního úspěchu. Velkými propagátory Tatry 87 byli Miroslav Zikmund s Jiřím Hanzelkou, kteří s tímto vozem podnikli úspěšně cestu kolem světa, kdy Tatra prokázala vysokou spolehlivost i při provozu na špatných cestách. V důsledku umístění pohonné jednotky a žebrování ve víku motoru byl omezený výhled vzad jistou nevýhodou. Výrobce tuto skutečnost komentoval slovy: „*Naše vozy patří k nejrychlejším na silnicích a nebyvají předjížděny*“. Při jízdě se také projevoval nežádoucí efekt kapsovitých nasávacích otvorů za zadními bočními okny, neboť tyto otvory umístěné v úrovni uší osob cestujících vzadu vedly hluk od motoru. Proto byly otvory u dalších modelů přesunuty na zadní víko (Tatra 600 Tatraplan) nebo blatníky (Tatra 603). Víko motorového prostoru bylo rozděleno mohutnou ploutví - stabilizátorem, který měl za úkol vyrovnávat účinek bočního větru na vůz s lehkou přídílí. Směrovou stabilitu se sice v porovnání s Tatrou 77 podařilo vylepšit, vrozenou konstrukční vadu uspořádání mechanických skupin však nedokázal zadní stabilizátor - ploutev úplně eliminovat. Tvary karoserie proudnicových vozů Tatra umožňovaly i při nízkém výkonu dosáhnout vysokých cestovních rychlostí. Díky jejich tvaru vzniká působením proudění vzduchu pod vozem vztlak, velice podobně jako na profilu křídla. Vlivem toho dochází ke ztrátě přilnavosti, k odlehčení přední nápravy a zhoršení

účinnosti řízení ještě posílené motorem vzadu. Odlehčení zádi vyvolané brzděním a následný kyvadlový efekt od motoru vzadu byly příčinou téměř nezvladatelné přetáčivosti.



Obr. 3.1 Boční pohled na vůz Tatra 87 [15]

Po částečném pozastavení výroby během 2. světové války byla produkce vozů Tatra znovu obnovena a přibylo například velké třetí centrální světlo, které se natáčelo současně s otočením volantu. Celkově byla přepracovaná přední část karoserie. Do většího vyklenutí v blatnících byly zapuštěny světlomety, a to až po úroveň krycího skla, což vedlo ke zlepšení obtékání vzduchu. Součástí standardní výbavy bylo posuvné velké střešní okno. Po roce 1948 se automobil vyráběl pouze pro potřebu státních a stranických orgánů. V roce 1950 byla výroba zastavena úplně. Celkem bylo vyrobeno více než 3 000 kusů [16].



Obr. 3.2 Přepracovaná před' se zapuštěnými světlometry vozu Tatra 87 [16]

3.1.2 TATRA 600 TATRAPLAN

Vzhledem k tomu, že technická dokumentace plánovaného vozu Tatra 97 skončila v rukou německých okupačních vojsk, padlo rozhodnutí vyvinout zcela nový vůz původně s označením Tatra 107, ale po zavedení nové jednotné metodiky typového označení dostal vůz označení Tatra 600. Přídomek Tatra 600 měl evokovat podobnost ladné karoserie a rychlé jízdy s tehdejšími letadly (aeroplán - tatraplan). Na vývoji Tatraplanu pracovali Vladimír Popelář a Jiří Chalupa. Klíčová byla ale konzultace s bývalým šéfkonstruktérem Hansem Ledwinkou. První prototypy byly poháněny čtyřválcovým motorem typu boxer o objemu 1750 cm³ a výkonu cca 25 kW [17]. Při zkouškách se však zjistily vážné nedostatky v oblasti stability, motoru i chlazení. Vůz byl přepracován a sériové provedení vozu z roku 1948 dostalo výkonnější motor o obsahu 1952 cm³ s výkonem 38 kW [17], takže vůz dosáhl maximální rychlosti 130 km/h. Tatraplan byl jedním z prvních vozů, který používal pontonovou karoserii. Oproti třídílnému čelnímu sklu na Tatře 87 bylo na voze Tatra 600 dvoudílné šípové sklo bez středního sloupku. Stejně jako Tatra 87 měl Tatraplan typicky zaoblenou přední a splývavou zadní část, která umožňovala alespoň omezený výhled dozadu dvěma malými okénky. Poměr hmotnosti na přední a zadní nápravu byl 43:57, díky čemuž mohl být stabilizátor-ploutev menší. Součinitel odporu sériového vozu dosáhl díky dobře tvarované karoserii s plně zapuštěnými reflektory a kličkami i závěsy dveří pozoruhodně nízké hodnoty $c_x = 0,32$ [17]. Pozdější exempláře vybavené již motorem Tatra 603 měly již maximální rychlost až 170 km/h. V roce 1952 byla v důsledku zhoršení výrobní kvality po převedení výroby do Mladé Boleslavi produkce vozů zastavena úplně.



Obr. 3.3 Tatra 600 Tatraplan z roku 1950 [18]

Ze sériové verze Tatra 600 vzniklo několik speciálních verzí, a to např. závodní verze s označením Tatra 601 Monte Carlo a Tatra 602 Tatraplan Sport. Vůz Tatra 601 Monte Carlo měl hliníkovou dvoudveřovou karoserii, svislé šířkově nastavitelné otvory pro přívod vzduchu do motorového prostoru byly tentokrát za zadními bočními okny.



Obr. 3.4 Speciální verze Tatra 602 Tatroplan Sport [19]

3.1.3 SAAB URSAAB

Firma Saab byla původně výrobcem letadel, která po druhé světové válce začala vyrábět také osobní automobily. První prototyp nazvaný Ursaab měl splývavou zád' a zakapotovaná všechna kola, což bylo velmi aerodynamické (součinitel odporu pouhých $c_x = 0,35$ [3]), ale při jízdě v zimě se podběhy postupně zanášely sněhem, až došlo k zablokování řízení. Aerodynamika tohoto prototypu byla vyvíjena v aerodynamickém tunelu na modelu v měřítku 1:10. Při pohledu ze strany Ursaab vypadal jako průřez křídlem letadla. Proto se pod vozem při vyšších rychlostech generoval vztlak a docházelo k nadzvedávání zadní části vozu. Byly zhotoveny 4 exempláře [20], které byly v roce 1949 základem pro sériovou podobu modelu Saab 92.



Obr. 3.5 Prototyp Saab Ursaab [3]

3.1.4 SAAB 92

Model 92 si z původního prototypu Ursaab zachoval základní siluetu. Změnil se tvar nárazníků, výřezy blatníků, kliky dveří nebo hlavní světlomety doplněné malými samostatnými obrysovými světly. Kola již byla zakryta jen částečně. Celá karosérie byla vylisována z jednoho kusu plechu a následně byly vyřezány díry pro okna a dveře. Později Saab upustil od inovací v aerodynamice a jeho prioritou se stala bezpečnost automobilu.



Obr. 3.6 Saab 92 z roku 1949 [21]

3.1.5 PANHARD DYNAVIA

Francouzská automobilka Panhard představila v roce 1948 originální aerodynamický vůz pojmenovaný Dynavia. Při vývoji nového vozu se konstruktér Louis Bioneer nejprve snažil o vytvoření sedmimístného aerodynamického automobilu. Na konci války dokončil náčrty vozu, který byl tvarován jako kapka se zakrytovanými předními a zadními koly. Vůz zůstal ve fázi projektu, ale položil základy pro vůz Dynavia. Tento vůz byl výsledkem pokusů, které se prováděly na modelu v měřítku 1:5 v aerodynamickém tunelu v Paříži. Louis Bioneer se poté snažil o spojení aerodynamiky s praktickým čtyřsedadlovým automobilem. Inspirací mu bylo letectví, ale studoval také aerodynamické vlastnosti ptáků a kluzký tvar ryb. Věřil, že při napodobení tvaru z přírody dokáže vytvořit auto, které je rychlejší a v provozu hospodárnější. Karoserie měla co nejvěrněji kopírovat vodní kapku, proto byly použity klenutá přední a zadní sbíhající se do špičky. Automobil zrealizovaný podle modelu měl pro tehdejší dobu obvyklý dlouhý zadní převis. Celkový profil karoserie dobře odolával bočnímu větru i nárazům větru při předjíždění. Důraz na aerodynamiku byl patrný i na dveřích, které se otvíraly jednoduchým tlačítkem místo kliky. Dva protilehlé vzduchem chlazené válce dávaly výkon pouhých 21 kW [22]. Avšak díky součiniteli odporu pouhých $c_x = 0,26$ a nízké váze 650 kg [22] dokázal vůz Dynavia i navzdory nízkému výkonu motoru vyvinout rychlost až 130 km/h [23] a dosahoval velmi nízké spotřeby. Díky jednoduchým nosníkům podvozku, tenkým plechům karoserie a rozsáhlé aplikaci slitiny hliníku s hořčíkem a mědí měl vůz Dynavia nízkou hmotnost. Vozidlo však vykazovalo značné nevýhody, a to nízkou úroveň pohodlí, neklidnou jízdu na nerovnostech a kola v zatáčkách dřela o podběhy. I když byly vytvořeny pouze dva exempláře, vůz Dynavia ukázal, že spojením nízké hmotnosti s aerodynamikou vznikne výkonný a hospodárný automobil. Vůz Dynavia měl značný vliv na sériového nástupce Panhard Dyna Z.



Obr. 3.7 Vůz Panhard Dynavia s dlouhým zadním převisem [24]

3.2 50. LÉTA

3.2.1 TATRA 603

Automobilka Tatra nesměla od roku 1951 podle vládního nařízení vyvíjet a konstruovat osobní automobily a měla se plně soustředit na vývoj nákladních automobilů. Přesto však konstruktéři tajně připravovali projekt osobního automobilu s osmiválcovým motorem vzadu. Tatra dostala za úkol vyrobit luxusní automobil jako náhradu za dosluhující Tatra 87. Díky tomu se nakonec pod vedením konstruktéra Vladimíra Popeláře dostal do sériové výroby vůz označený Tatra 603, jenž se vyráběl v letech 1956 až 1975.

Na základě prvního návrhu Františka Kardause vznikla maketa, která měla ještě uprostřed zádi velkou stabilizační ploutev, a první funkční prototypy měly již zaoblené, ale uprostřed ještě dělené přední okno. V sériové výrobě byla záď zakončena letmým náznakem ploutve – ikonického znaku proudnicových Tater. Návrhy karoserie byly ověřovány v aerodynamickém tunelu v Praze Letňanech. Vzduchem chlazený hliníkový osmiválec o objemu 2545 cm³ a výkonu 70 kW umožňoval vozu podle údajů výrobce maximální rychlost až 160 km/h [25]. Ve skutečnosti také díky součiniteli odporu pouhých $c_x = 0,36$ [25] dokázal však vůz hravě překročit 170 km/h [26]. Rozložení hmotnosti na obě nápravy bylo 47:53 [25], což bylo u vozu s motorem vzadu unikátní. Velká oblá karoserie měla v přední masce tři světlometry pod společným krytem, čímž se zlepšila už tak dobrá aerodynamika vozu. Dvojicí velkých oken na splývavé zádi byl odstraněn nedostatečný výhled zpět, který byl slabinou všech předchozích typů. Systém odsávání umožňoval přivádět vzduch na tepelně nejvíce namáhaná místa motoru. Čtyřdveřová oblá proudnicová karoserie byla původně konstruovaná pro 6 osob, později na základě nové vyhlášky zavedením bezpečnostních pásů byla jen pětimístná. V roce 1963 došlo k modernizaci a v upraveném předním čele byly zabudovány 4 reflektory, tentokrát už bez krytu. Díky přidání příčného zkrutného stabilizátoru spolu se zvětšeným rozchodem vzadu se povedlo potlačit přetáčivost při ostré jízdě i citlivost na boční vítr. Ačkoliv byl téměř pětimetrový vůz koncipován jako luxusní limuzína, dočkala se T603 i sportovních upravených verzí. Vozy s odlehčenou karosérií s hliníkovými a laminátovými panely dostaly výkonnější motory, takže překonání 180 a později 200 km/h [26] nebylo problém. Sériová výroba byla ukončena v roce 1975 a celkem bylo vyrobeno 20 422 kusů [25]. Z legendární řady aerodynamických sériových osobních vozů kopřivnické automobilky Tatra byl model Tatra 603 typem nejluxusnějším, největším, nejrychlejším a zároveň posledním.



Obr. 3.8 První verze vozu Tatra 603 s třemi světly pod plastovým krytem [27]

Nástupce Tatra 603 byla Tatra 613. Tento automobil přinesl odklon od proudnicových aerodynamických karosérií a nastolil hranatý, v té době moderní trend. Koncept vzadu uloženého vidlicového osmiválce zůstal zachován. Aerodynamicky jde o nezajímavé auto.

3.2.2 CITROEN DS

Tento vůz je jedním z nejznámějších automobilů na světě. Vyráběl se od roku 1955 až do roku 1975. Bylo vyrobeno bezmála půl druhého miliónu vozů. Vůz přinesl mnoho inovací, nejdůležitější z nich byl hydropneumatický podvozek, který umožňoval samočinnou úpravu světlé výšky. Při návrhu karosérie se kladl velký důraz na aerodynamiku. Obvyklou mřížku chladiče nahrazovaly úzké otvory nad nárazníkem a pod ním. Přední část se směrem dopředu zužuje, což podporuje aerodynamický vzhled. Pod předním nárazníkem bylo několik otvorů, které vedly chladič vzduch přes třmeny k brzdám. V zájmu aerodynamiky byl rozchod předních kol delší než zadních kol, a proto byl automobil vzadu užší. Dosažený součinitel odporu vzduchu $c_x = 0,38$ [28] byl ve své době rekordní. Přispívalo k tomu i silně zaoblené čelní sklo, tenké sloupky a z velké části zakrytá zadní kola. Zadní směrová světla byla umístěna až nad zadním oknem, takže byla lépe viditelná. Sklon a „ponoření“ zadního okna snižovalo nebezpečí jeho znečištění. Střecha se postupně svažovala, aby byla vizuálně spojená se zadní částí, a proto muselo být vnitřní zpětné zrcátko přimontováno nízko na palubní desku. Přední světla vyčnívaly z dlouhé přídě. V roce 1967 dostal vůz novou přídě se čtyřmi světly pod průhlednými kryty. Na vozech určených pro vývoz do USA musel být ze světel kvůli bezpečnostním předpisům plastový kryt odstraněn. Díky novým světelným a krytům na evropské verzi automobilu se součinitel snížil až na hodnotu $c_x = 0,34$ [28]. Ve Francii ale i mimo ni získal vůz velkou oblibu.



Obr. 3.9 Vůz Citroën DS s novou přídílí a čtyřmi světlomety [29]

3.2.3 ALFA ROMEO DISCO VOLANTE

Pro Alfu Romeo byl začátek 50. let velmi plodné období, mimo jiné i v nově vzniklých závodech Formule 1. V letech 1952 a 1953 vzniklo několik speciálních vozů na základech Alfy 1900, z nichž nejhezčí byl koncept Disco Volante. Šlo o první vůz Alfa Romeo se samonosnou karoserií. Vůz byl navržen jako prototyp pro testování aerodynamiky. Jeho hliníková karosérie upevněná na lehkém trubkovém rámu byla totiž jako jedna z prvních testována v aerodynamickém tunelu. Designér Carlo Anderloni dal vozu ve své době neobvykle oválné tvary, jež byly atraktivní nejen při pohledu z boku (částečně zakrytá kola), ale hlavně zepředu. Rozšíření blatníků do stran bylo vynuceno právě zakrytím kol. A právě díky velkým zadním blatníkům dostal vůz přídomek Disco Volante (létající talíř). Cílem bylo dosáhnout vynikajících aerodynamických vlastností nejen na samotné čelní ploše, ale pokusit se také snížit vliv bočního větru. Díky svým aerodynamickým tvarům a nízké hmotnosti 735 kg mohl vůz dosáhnout rychlosti až 220 km/h [20]. Při testování automobilu v aerodynamickém tunelu byl naměřen součinitel odporu pouhých $c_x = 0,25$ [30]. Karoserie však na obou koncích vytvářela vztlak, proto se vůz nehodil na tratě s rovnými dlouhými úseky. Další nevýhodou byl stísněný prostor pro pasažéry hlavně díky neobvykle umístěnému střednímu tunelu, do kterého byla zabudována převodovka. Říká se, že tvary vozu Disco Volante inspirovaly automobilku Jaguar při vývoji svého modelu E-Type. V roce 1952 byly vytvořeny tři kabriolety, z nichž jeden byl později přestavěn na kupé s pevnou střechou a splývající zadí. V následujícím roce byly vytvořeny další dva kabriolety s větším a silnějším motorem, které byly užší, protože neměly tak vyduté zadní blatníky. Díky výkonnějšímu motoru byly schopné překročit rychlost 230 km/h [30]. Navzdory tlakům slavných osobností a veřejnosti nebyl vůz Disco Volante nikdy sériově vyráběn.



Obr. 3.10 Vůz Alfa Romeo Disco Volante ve verzi kupé [3]

3.2.4 ALFA ROMEO BAT

Disco Volante bylo konceptem, na který Alfa Romeo navázala dalším vývojem aerodynamiky. Ke zkoumání účinků odporu na automobil posloužily tři exempláře postavené také na základu Alfy 1900 pojmenované Berlinetta Aerodinamica Tecnica, zkráceně BAT. Vozy vznikly ve spolupráci s italským designovým studiem Bertone. Cílem bylo vytvořit vozy s co nejnižším součinitelem odporu.

V roce 1953 vznikl první vůz BAT 5, který s výkonem motoru 74 kW, součinitelem odporu $c_x = 0,23$ a váhou 1 100 kg dokázal vyvinout rychlost přes 200 km/h [20]. Tvar přední části vozu byl navržen tak, aby nedocházelo k turbulencím proudu vzduchu ve vyšších rychlostech. Cílem bylo také eliminovat jakýkoliv další odpor vznikající při otáčení kol. Kola byla proto zakrytována, což mělo také zamezit vzniku turbulentním vírům. K dobré aerodynamice přispělo i nízká kabina s panoramatickým čelním sklem a bočními okny skloněnými vzhledem k boku karoserie o 45 stupňů. V zadní části bylo dlouhé zadní okno rozdělené na dvě části úzkým sloupkem a dvě ploutve směřující nahoru a mírně dovnitř a kopírující tvar karosérie. Tyto ploutve měly za úkol usměrnit proudění vzduchu. Světlomety byly umístěny pod kryty v blatnících a při rozsvícení se vyklopily před mřížku chladiče. Vůz byl velmi stabilní i při vysokých rychlostech. Nevýhodou však bylo to, že už při menším natočení volantu přední kola drhla o přední blatníky zakrývající kola. Další nevýhodou byl nedostatečný výhled z vozu.



Obr. 3.11 Pohled na zadní část vozu BAT 5 [31]

Druhý vůz označený BAT 7 vznikl o rok později. Aerodynamika byla ještě vylepšena, a tak se vůz pyšnil součinitelem odporu úctyhodných $c_x = 0,19$ [20]. Bertone využil svých zkušeností z vývoje křidel letadel a navrhl tvar velkých zakřivených ploutví na zádi. Nos vozu byl oproti předchůdci ještě snížen. Vůz sloužil především jako vzor pro zkoušky v aerodynamickém tunelu. Nejviditelnější změnou byly zvětšené ploutve zvedající se od přední hrany dveří směrem dozadu a částečně zakrývající boční okna. Jejich zakřivení směrem ke středové ose vozu vytvářelo jakýsi tunel usměrňující proudění vzduchu na zádi vozu. Dalšími aerodynamickými prvky byla svislá středová ocasní ploutev rozdělující zadní okno a zvětšené otvory v bočních ploutvích.



Obr. 3.12 Experimentální vůz BAT 7 [32]

Poslední koncept s označením BAT 9 vznikl v roce 1955 a na něm se ověřovaly aerodynamické prvky v reálném provozu. Tento vůz se měl více podobat sériovým vozům Alfa Romeo, a proto má čistší, střídmejší linie. Zadní kola byla částečně odkrytá. Světlomety se přestěhovaly pod průhledné kryty v předních blatnicích, takže otvory po stranách masky mohly být mnohem užší. Zadní ploutve, které měly na předchozích dvou modelech křídlovitý vzhled, byly zmenšeny na dvě kovové desky, které se podobaly ploutvím na amerických automobilech.



Obr. 3.13 Vůz BAT 9 [33]

Do sériové výroby se tyto vozy nikdy nedostaly.

3.2.5 MERCEDES-BENZ 300 SLR

Mercedes-Benz 300 SLR vycházel ze závodního vozu Mercedes-Benz W196 Formule 1. Pro lepší rozložení váhy byl motor těsně za přední nápravou. Podvozek z hliníku a karosérie z hořčíkové slitiny zajišťovaly velmi nízkou hmotnost. Místo diskových brzd byly na voze brzdy bubnové, aby se snížila neodpružená hmotnost. Ve vytrvalostních závodech na vysokorychlostních tratích brzdy trpěly poklesem účinku v důsledku přehřátí. Vůz totiž musel opakovaně brzdit z téměř třísetkilometrové rychlosti na pouhých 40 km/h. Proto za účelem snížení opotřebení brzd a pneumatik byl vůz 300 SLR určený pro závody Le Mans vybaven inovativní aerodynamickou brzdou, která se vysunovala pomocí hydraulického čerpadla. Tato brzda zvýšila aerodynamický odpor a pomáhala tak neúčinným bubnovým brzdám. Brzda byla z lehké slitiny a měla plochu $0,7 \text{ m}^2$ [1]. Při zasunování zpět se brzda chovala jako přítlačné křídlo, díky kterému mohl řidič na výjezdu ze zatáčky dříve akcelarovat. Vysunutá aerodynamická brzda zvýšila hodnotu součinitele odporu z hodnoty $c_x = 0,44$ na hodnotu $c_x = 1,09$ [1]. Nevýhodou vozu byl nedostatečný přítlak. Ve velkých rychlostech měl vůz tendenci vzlétnout, čímž byla omezena řiditelnost předních kol. Z důvodu tragické nehody na konci roku 1955, při které zemřelo více než 80 lidí, stáhla automobilka Mercedes-Benz tento vůz ze závodů.



Obr. 3.14 Mercedes-Benz 300 SLR s vysunutou aerodynamickou brzdou [34]

3.3 60. LÉTA

3.3.1 JAGUAR E-TYPE

Jaguar E-type považovaný mnohými za nejhezčí automobil vůbec. Automobil byl tvarován v noci v jednom z prvních primitivních aerodynamických tunelů, který spotřebovával tolik elektřiny, že mohl být použit právě pouze v noci. Automobil měl díky svému jedinečnému tvaru a výkonnému řadovému šestiválci o objemu 3781 cm³ maximální rychlost 240 km/h [35]. Vyráběl se ve třech sériích mezi lety 1961-1975 a ve dvou karosářských variantách; buď jako kupé s pevnou střechou nebo otevřený roadster.

Hlavní vývojový inženýr aerodynamiky automobilky Jaguar Malcolm Sayer trval na tom, aby kola nevyčnívala z karoserie, ale naopak aby byla zapuštěna hluboko v blatnících, a proto byl vůz schopen překonat hranici 240 km/h. Při vývoji modelu E-type si Sayer všiml, že proud vzduchu kolem zadní části vozu byl tak plynulý, že udržoval zadní okno u verze kupé čisté od deště a nečistot. Z toho důvodu nemá automobil na zadním okně žádný stěrač. I když je tvar vozu velmi aerodynamický, velký odpor byl vytvářen u předního okna, které mělo velmi ostré hrany a jehož sklon od svislé roviny byl velmi malý. Proud vzduchu musel prudce změnit směr, což způsobilo vznik oblasti se zvýšeným tlakem. Proto byly přívody pro sání vzduchu v kapotě posunuty co nejvíce do oblasti největšího tlaku u čelního okna. Velmi strmé čelní sklo je hlavním důvodem vysoké hodnoty součinitele odporu $c_x = 0,44$ [36] tohoto automobilu. Přední světla byla v první sérii zakryta skleněným krytem, jenž zlepšoval obtékání vzduchu, ale velmi snižoval světelný výkon, a proto nebyla v noci možná jízda rychlostí vyšší než 150 km/h. Když chtěla automobilka Jaguar začít dovážet model E-type do Spojených států, musel být ze světel kvůli bezpečnostním předpisům skleněný kryt odstraněn a celý světlomet byl posunut vpřed tak, že vyčníval z karoserie. Světelný výkon se tak zlepšil, ale značně se tím zvýšil odpor vzduchu. Automobilka Jaguar též vytvořila čtyřmístnou verzi 2+2, která byla oproti originální verzi prodloužena a u které se díky zvýšené střeše a jinému sklonu střechy zvětšil průmět čelní plochy. Automobil tak i díky zvýšené hmotnosti dosahoval maximální rychlosti "pouhých" 218 km/h [35]. V důsledku celkového zvětšení vozu byla čtyřmístná verze náchylnější na boční vítr. Druhá série modelu E-type vyráběná od

roku 1968 měla větší sklon předního okna, což vedlo ke snížení celkového odporu. Třetí série dostala motor s větším objemem, a proto bylo nutné rozšířit přední masku chladiče, aby byl zajištěn dostatečný proud vzduchu k chlazení motoru.



Obr. 3.15 Jaguar E-type ve verzi kupé [37]

Automobilka Jaguar vytvořila i dvě speciální verze modelu E-type. Prvním modelem byl vůz Low Drag Coupé z roku 1963. Byla to snaha o vytvoření závodní odlehčené verze při zachování stylu modelu E-type. Zatímco běžný E-type byl vyroben z oceli, vůz Low Drag Coupé byl celý z hliníku. Přední okno bylo ještě více skloněno a vedle zadních oken byly vytvořeny průduchy na chlazení zadních brzd. Auto bylo vyrobeno v jediném exempláři.

Druhou speciální verzí modelu E-type byl vůz Lightweight E-type vyráběný v letech 1963-1964. Konstrukčně vycházel z předchozí speciální verze. Byla to snaha o vytvoření závodní verze, která bude schopna bojovat s italskou konkurencí. Byl zvýšen výkon motoru, posíleny brzdy a úzké diagonální pneumatiky byly nahrazeny širšími. Pro zlepšení aerodynamiky upravil Malcolm Sayer splývavou záď vozu typu hard-top.

3.3.2 ALFA ROMEO GIULIA

Dalším aerodynamickým vozem od Alfy Romeo byl model Giulia. Jedná se o jeden z nejprodávějších vozů Alfy Romeo. Tajemstvím perfektní aerodynamiky byly malé detaily hranaté karosérie. Přední část s maskou chladiče byla sice svislá, ale čelní plocha byla velmi malá a byla umístěna nízko. Vnější okraje kapoty byly zakřiveny tak, že postupně přecházely v blatníky. Kapota přecházela v čelní sklo pod velkým poloměrem, čímž se snížil nárůst tlaku, který u běžných automobilů v těchto místech vzniká a způsobuje odpor. Zakřivení předního okna posunulo přední sloupek dozadu, což poskytuje řidiči ničím nerušený výhled z vozu. Prodloužení střechy za začátek zadního okna snižuje celkový odpor. Zvláštností je výše posazené víko zavazadlového prostoru než přední kapota. Vůz má minimum bočních lišt a ozdobných prvků, malé kliky dveří a podél střechy drážku. Každý z těchto prvků může aerodynamiku ovlivnit jen mírně, ale spojením těchto detailů se dosáhlo perfektních aerodynamických vlastností vozu. Žádný z těchto detailů na voze nebyl zvolen náhodně. Automobil byl vyvíjen v aerodynamickém tunelu, čímž se dosáhlo součinitele odporu pouhých $c_x = 0,34$ [38]. Vůz měl maximální rychlost až 170 km/h [38].



Obr. 3.16 Čelní pohled na vůz Alfa Romeo Giulia z roku 1969 [38]

3.3.3 PININFARINA BMC-1800 BERLINA AERODINAMICA

Zajímavý koncepční aerodynamický vůz vznikl i ve Velké Británii, přesněji šlo o italský výtvar na britském základě. Vůz zhotovil v roce 1967 ve studiu designér Leonardo Fioravanti. Jako základ posloužila platforma a motorizace z modelu Austin 1800. Vůz svým vzhledem inspiroval Citroën CX, který se představil až o sedm let později, a Rover SD1, který byl uveden na trh až o 9 let později. Fioravanti obdivoval studii Wunibalda Kamma a věřil, že Kammův koncept ostře uříznuté zadní části vozu je cestou k výraznému snížení celkového odporu. Aerodynamika byla vyvíjena na modelu v měřítku 1:4 v aerodynamickém tunelu. Úplně chyběla klasická přední mřížka chladiče. Do prostoru motoru vzduch vstupoval dvěma velkými žaluziemi pod předním nárazníkem, který ještě více zdůrazňoval dlouhý přední převis. Světlomety byly umístěny pod zakulaceným plexisklem. Součinitel odporu byl pouhých $c_x = 0,35$ [39], což bylo na takto velké auto velmi dobrá hodnota. Vůz se i přes Fioravantiho snahu a ohlas veřejnosti nikdy nedostal do sériové výroby.



Obr. 3.17 Koncept Pininfarina BMC 1800 Berlina Aerodinamica [40]

3.3.4 PANHARD CD LM64

Tento vůz vyvinutý v roce 1964 otevřel novou éru v závodních automobilech. Až do počátku 60. let byla aerodynamika považována za pouhý způsob, jak snížit odpor vzduchu. Vůz však ukázal, že aerodynamika a především její vliv na ovladatelnost, stabilitu přitlačnou sílu a odpružení jsou nezbytné pro vývoj automobilu. Vůz měl rekordní hodnotu součinitele odporu pouhých $c_x = 0,12$ [41]. Aerodynamika spolu s nízkou hmotností vozu umožnila dosáhnout v závodech Le Mans velmi dobrých výsledků i za použití motoru o nízkém objemu. Vůz CD LM64 je zapomenutým průkopníkem, u kterého se při vývoji použilo výpočtů, které zahrnovaly vše od vlivu bočního větru přes interakci proudů vzduchu až po pružnost podvozku, což vedlo k úplně nové koncepci aerodynamiky pro závodní automobily. Kryté světlometry a dlouhá zadní část vozu měly mít minimální odpor, což bylo na dlouhých rovinkách Le Mans žádoucí. Pro zajištění, že vůz bude i při vysokých rychlostech stabilní, byly na obou stranách vzadu namontovány dlouhé ploutve. Tvar vozu připomínal křídlo, takže se tímto způsobem vytvářela přitlačná síla automobilu k vozovce. Podvozek byl jednoduší a měl tvar tunelu, který za pomoci difuzoru urychloval proud vzduchu pod vozidlem tak, aby byl vytvořen Venturiho efekt a vozidlo bylo vlivem podtlaku přitlačováno k zemi.



Obr. 3.18 Závodní speciál Panhard CD LM64 [41]

3.4 70. LÉTA

3.4.1 BMW 3.0 CSL

Tento vůz konstrukčně vycházel z BMW E9. Kupé BMW 3.0 CSL, představené v květnu 1972, bylo homologováno k účasti v Evropském mistrovství cestovních vozů. Automobil byl vybaven řadou aerodynamických doplňků, a to především velkými spoilery na přídě, na střeše a na stupňovité zádi, a také typickými malými ploutvičkami na předních blatnících. Zadní spoilery nebyly namontovány v továrně, ale umístěny v kufru, aby si je majitel mohl namontovat sám. Na německých silnicích totiž byly takové prvky zakázány. Takto vybavená kupé 3.0 CSL dostala přezdívku "Batmobile". Na rozdíl od spoilerů na jiných automobilech poskytovaly spoilery tohoto vozu vynikající stabilitu ve vysokých rychlostech. Bylo vyrobeno 1265 exemplářů [42].



Obr. 3.19 Závodní automobil BMW 3.0 CSL [42]

3.4.2 CITROËN CX

Zkušenosti z vývoje vozu DS vložila automobilka Citroën do nového modelu CX. Vůz se začal vyrábět v roce 1974 a prodával se až do roku 1991. Vzhled sice nebyl tak futuristický, ale součinitel odporu byl na stejné hodnotě $c_x = 0,34$ [43]. Zadní kola zůstala částečně zakrytá za účelem vytvoření proudnicového tvaru. Vzduch pod vozidlem byl usměrněn tak, aby chladil diskové brzdy. Vůz používal stejné hydropneumatické odpružení jako jeho předchůdce DS. Zadní okno kabiny mělo konkávní tvar, takže z něj voda při jízdě sama odtékala. V roce 1985 se vůz dočkal modernizace a dostal aerodynamičtější kryty vnějších zpětných zrcátek.



Obr. 3.20 Automobil Citroën CX [43]

Techniku CX sdílela aerodynamická studie Eole ze Ženevy 1986 se součinitelem odporu vzduchu $c_x = 0,19$ [43], zakrytými koly a oblou přídi. Přední část byla navržena tak, aby byla čelní plocha co nejmenší, přičemž světlometry byly zcela integrovány do nárazníku. Zakrytí všech čtyř kol přispělo k tomu, aby se celkový tvar přiblížil ideálnímu aerodynamickému

profilu. Kryty předních kol se v závislosti na zatočení vysouvala pomocí hydraulických mechanismů z karosérie. Automobil disponoval aktivním odpružením, takže při vyšších rychlostech se automobil snížil více k zemi, aby se zlepšila aerodynamika.



Obr. 3.21 Koncept Citroën Eole z roku 1986 [49][49]

3.5 AERODYNAMIKA VE FORMULI 1

Formule 1 vznikla v roce 1946, kdy Mezinárodní automobilová federace FIA (Fédération Internationale de l'Automobile) standardizovala pravidla závodů. První Grand Prix tak, jak ji známe dnes, se konala 13. května 1950. V průběhu let se aerodynamika stala jednou z klíčových vlastností vozu. Začátky aerodynamiky ve Formuli 1 však byly velmi pomalé. Poprvé byl vůz testovaný v aerodynamickém tunelu až v roce 1966. V roce 1968 ještě nebylo možné spočítat odporové síly, které působily na vůz. Proto musely týmy vyvíjet své vozy metodou pokus - omyl. Do té doby se konstruktéři snažili pouze o snížení odporu proudnicovými tvary karoserií, protože tak vozy dosahovaly vyšší maximální rychlosti. Vozy se ale ve velkých rychlostech začaly stávat nestabilními, což vedlo k nebezpečným nehodám. Při bližším prozkoumání těchto nehod došli inženýři k tomu, že proudnicové tvary ve vyšších rychlostech tvořily aerodynamický vztlak, jinak řečeno snažily se vzlétnout. To velmi snižovalo přilnavost k vozovce, což bylo nežádoucí hlavně v rychlých zatáčkách.

3.5.1 LOTUS 49

Průkopníkem aerodynamiky ve Formuli byl Colin Chapman, majitel stáje Lotus. Po neúspěšných pokusech na vozech Lotus 38 a Lotus 43 přišel s typem Lotus 49. Předností byl motor umístěný za jezdcem a přišroubovaný k šasi, takže byl součástí celé konstrukce. Na tomto vozu bylo poprvé použito přítláčné křídlo. Pomocí štíhlých prutů bylo manuálně nastavitelné křídlo připevněno přibližně jeden metr vysoko nad auto, aby na něj proudil čistý vzduch bez turbulencí, které auto způsobuje. Díky němu bylo dosaženo velkého přítlaku, což umožnilo rychlejší průjezdy zatáčkami. Křídla na křehkých vzpěrách se ale často lámala, upadávala a měla velký podíl na téměř smrtelných nehodách. Proto od roku 1969 musela být všechna křídla připevněna přímo ke karoserii.



Obr. 3.22 Monopost Lotus 49 s přitlačným křídlem [44]

3.5.2 TYRREL P34

Tento typ vozu měl jako jediný v historii Formule 1 podvozek se šesti koly. Autorem byl Derek Gardener, hlavní designér stáje Tyrrel. Hlavním důvodem nahrazení dvou předních kol čtyřmi menšími (deseti palcovými) byla snaha o zvětšení kontaktní plochy mezi pneumatikami a vozovkou, tím i lepší přilnavosti vozu a také snaha o snížení odporu vzduchu na přední kola. Na dlouhých rovinkách se ukázalo že P34 je opravdu rychlejší, což ale bylo díky menšímu zadnímu přitlačnému křídlu, které nemělo takový odpor. Stáj Tyrrel vyhrála pouze jeden závod, a to v roce 1976 ve švédské Grand Prix, kde se povedlo vozům P34 obsadit obě první místa. Na konci roku 1977 se Tyrrel kvůli nevyřešeným problémům s dodavatelem pneumatik vrátil ke klasickým čtyřkolovým vozům.



Obr. 3.23 Šestikolový monopost Tyrrell P34 [45]

3.5.3 LOTUS 78

Colin Chapman později začal přemýšlet na tím, že vzduch nemusí být nutně nepřítelem jízdnicích vlastností. Brzy zjistil, že aerodynamické plochy tvarované jako profil křídla letadla, ovšem montované obráceně, tlačí vůz k vozovce, ale také zvyšují aerodynamický odpor, tedy vlastně jako vše, co generuje přítlak. Proto došel k závěru, že další experimenty s křídly nemají smysl. O přítlak se musí postarat samotné šasi. Jeden z jeho inženýrů Peter Wright přišel na to, že jestliže změní tvar bočnic se spodkem na jedno velké křídlo, proudící vzduch bude muset pod vozem obtékat toto křídlo delší cestou a tudíž zrychlit. Tím se dosáhne Venturiho efektu. Vznikne podtlak, který celý vůz přisaje k zemi.

Chapman zkoušel různé cesty, jak utěsnit vůz ze stran, aby vzniklý podtlak pod monopostem nemohl uniknout. Nejprve zkoušel kartáče, poté pohyblivé zástěrky, které po celé délce bočnic sahaly až na zem. Chapman při vývoji nového Lotusu 78 strávil se svým týmem přes 400 hodin v aerodynamickém tunelu, což bylo na tehdejší poměry nevídaně dlouho.

Tento převratný vůz v historii aerodynamiky byl nasazen v sezóně 1977. Monokok byl velmi úzký a plocha nízkého tlaku vzduchu co největší, aby bylo dosaženo co největšího přísavného efektu. Díky přísavnému efektu vůz seděl perfektně na silnici a bylo možné dosáhnout vysokých rychlostí v zatáčkách. Vůz měl však i několik vad. Vznikající oblast nízkého tlaku vzduchu, generující největší přítlak, byla v přední části vozu. Z tohoto důvodu muselo být zadní křídlo velké, a tudíž mělo velký aerodynamický odpor. Na dlouhých rovinkách tak vůz zaostával za konkurencí. Dalším problémem bylo zadní odpružení, které bylo tvarováno tak, aby umožnilo nerušené proudění ze zadní části bočnic. Odpružení ale stálo v cestě odcházejícímu vzduchu, který měl vliv na stabilitu zadní části vozu, a způsobovalo tak přetáčivost. I přes uvedené vady byl však Lotus 78 jedním z nejdůležitějších vozů Formule 1.



Obr. 3.24 Monopost Lotus 78 [46]

3.5.4 BRABHAM BT46B

Hlavní inženýr stáje Brabham Gordon Murray pochopil, že k napodobení Lotusu a jeho přístupu k přísavnému efektu jsou dvanáctiválcové motory Alfa Romeo, které stáj Brabham používala, příliš velké. Proto dostal jiný nápad, jak pod vozem snížit tlak. Na zád' vozu Brabham BT46B přimontoval jeden velký ventilátor, který doslova vysával vzduch zespod vozu. Tím klesl tlak a vytvořil se přísavný efekt. Ventilátor byl poháněn přes systém spojek motorem. Čím vyšší byly otáčky motoru, tím větší byl přísavný efekt. Stejně jako Lotus i Brabham měl posuvné zástěrky na bočnicích, aby nedošlo k nasátí přebytečného vzduchu do prostoru s nízkým tlakem. Tehdy ovšem existovalo pravidlo zakazující pohyblivé aerodynamické prvky. Ventilátor však dokázal nasávat i vzduch přes chladič za motorem a použití ventilátoru k chlazení motoru zakázáno nebylo. Díky tvrzení stáje Brabham, že hlavní účel ventilátoru je chlazení motoru, mohl vůz nastoupit v Grand Prix Švédska v roce 1978. Niki Lauda vyhrál závod s velkým náskokem. Po velkém protestu ostatních týmů byl tento kontroverzní projekt zakázán.



Obr. 3.23 Detail zadní části vozu Brabham BT46B [47]

Vrchol wing-carů neboli křídlových aut byl v sezóně 1982. Přítlak byl tak velký, že jezdci mohli jet celé kolo téměř naplno. Některé monoposty vytvářely tak obrovský přísavný efekt, že by mohly jet i po stropě v monackém tunelu. Odstředivá síla v zatáčkách byla tak velká, že jezdci ztráceli vědomí. Riziko, že vůz při velké rychlosti vlivem porušení zástěrky ztratí přilnavost, a tak havaruje, bylo velké. Proto FIA od roku 1983 zavedla ploché spodky.

ZÁVĚR

V této práci je popsán vývoj automobilové aerodynamiky po druhé světové válce. Práce začíná popisem základních principů mechaniky tekutin se zaměřením na vzdušný odpor. Větší část práce je věnována samotnému historickému vývoji.

V první části vývoje je z důvodu rozdílného přístupu k aerodynamice zmapován vývoj v Americe a ve druhé části vývoj v Evropě.

V Americe nebyly díky velmi levným pohonným hmotám aerodynamické vlastnosti automobilu významným způsobem řešeny. Bodem zlomu byla ropná krize v roce 1973, která způsobila skokový nárůst ceny ropy. Ve snaze o snížení spotřeby paliva automobilu našla aerodynamika své stálé místo ve vývoji. Automobilky vyvíjely experimentální vozy, na kterých zkoušely aerodynamické prvky a chování vozu v provozu, a tyto poznatky převáděly do sériové výroby. Přesto jsou v Americe dnes velmi populární velké karoserie typu pick-up, u kterých se součinitel odporu pohybuje kolem hodnoty $c_x = 0,40$ [48], a to i kvůli tomu, že cena pohonných hmot je stále v Americe zhruba o polovinu nižší než v Evropě.

V Evropě byla po druhé světové válce patrná snaha o navázání na "aerodynamická" 30. léta. Častým problémem u proudnicových karoserií byl vztlak generovaný pod vozidlem a vůz tak ve vyšších rychlostech ztrácel kontakt s vozovkou a došlo ke ztrátě ovladatelnosti. Často se objevovaly vozy se zakrytovanými zadními a v některých případech i předními koly. Toto řešení je sice z hlediska aerodynamiky výhodné, ale zakrytování předních kol má za následek omezení poloměru otáčení. Kryty kol jsou překážkou při výměně kola při defektu a při dofukování kol je třeba zastavit tak, aby kolo bylo v poloze, kdy ventilek je dostupný. Další nevýhodou tohoto návrhu je nahromaděné teplo v podběhu zakrytovaného kola, protože třecí síla mezi pneumatikou a vozovkou se mění na zvukovou a tepelnou energii. V podběhu kola se též začne generovat vysoký tlak, který spolu s nahromaděným teplem, může vést ke zvýšení tlaku v pneumatice a následně i k defektu. Z těchto důvodů se od návrhu zakrytovaných kol upustilo.

V 50. letech má také kořeny aktivní aerodynamika, která je dnes velmi častá u sportovních vozů. Aktivní aerodynamika dokáže měnit aerodynamické vlastnosti vozu v průběhu jízdy. Poprvé byla použita v roce 1955 u vozu Mercedes-Benz 300 SLR, který disponoval aerodynamickou brzdou. Později se u automobilů objevovaly i uzavírací lamely chladiče, vysouvací přední spoiler nebo úprava světlé výšky vozu. Nevýhodou těchto prvků je jejich složitá a finančně nákladná výroba.

V poslední části je popsán vývoj aerodynamiky ve Formuli 1. V této oblasti byl vývoj aerodynamiky zcela zásadní. Aby byly vozy schopné udržet vysokou rychlost i v zatáčkách, bylo nutné přítlačné síly. První možností, jak této síly dosáhnout, jsou přítlačná křídla, která mají své kořeny v 60. a 70. letech a dnes jsou samozřejmou součástí každého monopostu. Tyto prvky generují záporný vztlak, čili přítlak, ale také zvyšují celkový odpor vzduchu. Součinitel odporu současných monopostů Formule 1 se pohybuje kolem hodnoty $c_x = 0,7$ [48][48] dole. Druhou možností je využití přísavného efektu (ground effect), který v 70. letech objevila a využívala převážně stáj Lotus. Kvůli bezpečnosti byl přísavný efekt pravidly značně omezen a dnes se používá jen prvního způsobu vytváření přítlačné síly.

Automobilky dnes nabízejí upravené ekologické verze svých modelů, které jsou zaměřené na nízký součinitel odporu a nízkou spotřebu paliva. Vývoj ukázal, že jde o detaily, které

rozhodují o setinách, či tisícinách hodnoty součinitele odporu. Zakrytí nádrže ze spodu vozidla, změněný tvar zpětného zrcátka, částečné zaslepení mřížky na masce nebo dokonce i na první pohled bezvýznamná maličkost, jako je odstranění plastického nápisu na bočnici pneumatik - to vše jsou detaily ovlivňující výsledné vlastnosti automobilu. Vozy tráví desítky hodin v aerodynamických tunelech, kde se pečlivě zkoumá obtékání vzduchu okolo karoserie.

Některými odborníky je za vrchol aerodynamiky považován počátek 90. let, kdy byla auta malá a přitom aerodynamicky velmi dobře řešená. Dnes jsou problémy i legislativní, např. předepsaná plocha vnějších zpětných zrcátek.

Otázkou je, jaký zbývá prostor pro zlepšování. S novějšími konstrukcemi se pomalu zvyšuje součinitel odporu i průmět čelní plochy, což je patrné především u stále populárnějších vozů kategorie SUV či crossover. Automobily se zvětšují, jejich downsizované motory potřebují efektivnější chlazení, tudíž se zvětšují čelní masky a kvůli bezpečnosti karoserie nabývají na objemu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HUCHO, W-H. *Aerodynamics of road Vehicles*. Čtvrté vydání. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998, 918s. ISBN 0-7680-0029-7.
- [2] MACKERLE, Julius. *Automobil dneška a zítřka*. Praha: Nakladatelství technické literatury, n.p., 1977, 360s. ISBN 04-215-77.
- [3] *Automotive History: An Illustrated History of Automotive Aerodynamics – Part 2 (1940-1959)*. *Curbsideclassic* [online]. 2012. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-part-2-1940-1959/>.
- [4] Jak se vyvíjela aerodynamika při konstrukci aut. *Aktuálně* [online]. 8.7.2013. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/jak-se-vyvijela-aerodynamika-pri-konstrukci-aut/r~i:gallery:31148/>.
- [5] Aerodynamika automobilů: aerodynamické skvosty po druhé světové válce I. *TipCars* [online]. 29.10.2015. [cit. 2017-5-03]. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/nase-tema/aerodynamika-aut-aerodynamicke-skvosty-po-druhe-svetove-valce-i-8-dil.html>.
- [6] 1951 Studebaker Champion Gallery. *Momentcar* [online]. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://momentcar.com/studebaker/1951/studebaker-champion/>.
- [7] Aerodynamické automobily: Tatra 77. *Aerotatra* [online]. 2003. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.aerotatra.czweb.org/t77.htm>.
- [8] Norman Timbs' Buick Special. *Kustomrama* [online]. 14.7.2014. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://www.kustomrama.com/index.php?title=Norman_Timbs%27_Buick_Special.
- [9] 1953 Firebird I. *GM Heritage center* [online]. 2015. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: https://gmheritagecenter.com/gm-vehicle-collection/1953_Firebird_I.html.
- [10] 1979 Ford Probe I (Ghia). *Car Styling* [online]. 2010. [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: http://www.carstyling.ru/en/car/1979_ford_probe_i/.
- [11] 1981 Ford Probe III. *Car Styling* [online]. 2010. [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: http://www.carstyling.ru/en/car/1981_ford_probe_iii/.
- [12] 1982 Ford Probe IV. *Car Styling* [online]. 2010. [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: http://www.carstyling.ru/en/car/1982_ford_probe_iv/.
- [13] Concept Car of the Week: Ford Probe V (1985). *Car design news* [online]. 20.8.2015. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://cardesignnews.com/articles/concept-car-of-the-week/2015/08/concept-car-of-the-week-ford-probe-v-1985>.

- [14] Aerodynamika aut: Tatra a Ledvinka před 2. sv. válkou. *TipCars* [online]. 10.9.2015. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/nase-tema/aerodynamika-aut-tatra-a-ledvinka-pred-2-sv-valkou-4-dil.html>.
- [15] V sídle Volkswagenu vzdávají hold Tatře 87. Němci ji zařadili mezi automobilové milníky. *E15* [online]. 15.11.2016. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://zpravy.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/v-sidle-volkswagenu-vzdavaji-hold-tatre-87-nemci-ji-zaradili-mezi-automobilove-milniky-1325418>.
- [16] Tatra 87. *Tatra club* [online]. 2014. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.tatra-club.com/model/tatra-87-10>.
- [17] Tatra 600 - Tatraplan (1947-1952). *Partaj* [online]. 2017. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.partaj.cz/index.php/encyklopedie-klasicky-vozu/312-veteran-tatra/247-tatra-600-tatraplan-1947-1952>.
- [18] Pristine Mystery: 1950 Tatra T600 Tatraplan. *Bring a Trailer* [online]. 25.2.2012. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://bringatrailer.com/2012/02/25/pristine-mystery-1950-tatra-t600-tatraplan/>.
- [19] Slavné české auto slaví osmdesátiny. Průkopnice aerodynamiky Tatra 77. *Auto iDnes* [online]. 31.3.2014. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://bringatrailer.com/2012/02/25/pristine-mystery-1950-tatra-t600-tatraplan/>.
- [20] Aerodynamika automobilů: Zajímavé aerodynamické po druhé světové válce I. *TipCars* [online]. 12.11.2015. [cit. 2017-5-09]. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/nase-tema/aerodynamika-aut-zajimave-aerodynamicke-po-druhe-svetove-valce-ii-9-dil.html>.
- [21] Saab 92 Gallery. *Momentcar* [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://momentcar.com/saab/saab-92/>.
- [22] 1948 Panhard Dynavia. *Drive* [online]. 10.2.2017. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://drive-my.com/en/retro-carss/item/2492-1948-panhard-dynavia.html/>.
- [23] Panhardy Dynavia a Dyna (1948-1967) - Povětrné vajíčko. *Veteran auto* [online]. 17.2.2012. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://veteran.auto.cz/clanek/450/panhardy-dynavia-a-dyna-1948-1967-povetrne-vajicko>.
- [24] Panard Dynavia (1948). *Old Concept cars* [online]. 30.1.2015. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://oldconceptcars.com/1930-2004/panhard-dynavia-1948/>.
- [25] Tatra 603 (1955-1975): Vzduch a oblíny. *Autorevue* [online]. 26.12.2015. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/tatra-603-1955-1975-vzduch-a-obliny#articleStart>.
- [26] Aerodynamika automobilů: tohle uměla Tatra po druhé světové válce. *TipCars* [online]. 17.9.2015. [cit. 2017-5-09]. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/nase-tema/aerodynamika-aut-tohle-umela-tatra-po-druhe-svetove-valce-5-dil.html>.

- [27] Designér legendární Tatra 603 studenty nechválil, ale inspiroval. *iDnes* [online]. 29.1.2017. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://zlin.idnes.cz/100-let-od-narozeni-designer-sochar-zdenek-kovar-tatra-603-pli-/zlin-zpravy.aspx?c=A170126_2301487_zlin-zpravy_ras.
- [28] Citroën DS: Avantgardní bohyně se dožívá 60 let. *Auto* [online]. 22.5.2015. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/citroen-ds-avantgardni-bohyne-doziva-60-let-87370>
- [29] Slavnému Citroënu je šedesát let. *Novinky* [online]. 6.10.2015. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/auto/382546-slavnemu-citroenu-ds-je-sedesat-let.html>.
- [30] Alfa Romeo Disco Volante - létající talíř. *Veterán Auto* [online]. 20.5.2014. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://veteran.auto.cz/clanek/659/alfa-romeo-disco-volante-letajici-talir>.
- [31] Alfa Romeo BAT 5. *Minibiz* [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <https://ww.w.vot-tak-vot.ruww.w.vot-tak-vot.ruww.w.vot-tak-vot.ruww.w.vot-tak-vot.ru/alfa-romeo-bat-5.php>.
- [32] Model of the car: Bertone Alfa Romeo BAT 7, 1954. *Unusual cars* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://unusual-cars.com/model-car-bertone-alfa-romeo-bat-7-1954/>.
- [33] 1955 Alfa Romeo Bertone BAT 9. *How Stuff Works* [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://auto.howstuffworks.com/1955-Alfa-Romeo-Bertone-BAT-9.htm>.
- [34] Brutally Reducing All Kinetic Energy - The Romantic High-Tech Brake Guide. *Auto evolution* [online]. 7.1.2010. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.autoevolution.com/news/brutally-reducing-all-kinetic-energy-the-romantic-high-tech-brake-guide-15189.html>
- [35] Jaguar E-type. *Wikipedia* [online]. 9.5.2017. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Jaguar_E-Type.
- [36] Jaguar E-type - Icon. *Super Street online* [online]. 15.6.2011. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.superstreetonline.com/features/epcp-1107-jaguar-e-type-icon/>.
- [37] Jaguar E-type Reborn. *Jaguar* [online]. 2016. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.jaguar.com/about-jaguar/jaguar-classic/etype-reborn.html>.
- [38] Aerodynamic Efficiency - 1969 Alfa Romeo Giulia 1300 TI. *Hemmings* [online]. 04.2017. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.hemmings.com/magazine/hsx/2017/04/Aerodynamic-Efficiency---1969-Alfa-Romeo-Giulia-1300-TI/3750710.html>.
- [39] The Pininfarina 1800. *Landcrab* [online]. 2002. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://www.landcrab.net/mainframes/main_pininfarina1800.htm.

- [40] 1967 Pininfarina BMC - 1800 Berlina-Aerodinamica. *Car Styling* [online]. 2002. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://www.carstyling.ru/en/car/1967_pininfarina_bmc_1800_berlina_aerodinamica/.
- [41] CD Panhard LM64. *Ultimate Car Page* [online]. 2.4.2014. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.ultimatecarpage.com/car/5854/CD-Panhard-LM64.html>.
- [42] The Iconic BMW 3.0 CSL Batmobile. *BMW Blog* [online]. 8.7.2015. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.bmwblog.com/2015/07/08/the-iconic-bmw-3-0-csl-batmobile/>.
- [43] Evropské Automobily roku. Citroën CX (1975): Poslední opravdový Citroën!. *Auto* [online]. 11.1.2016. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/serial-evropske-automobily-roku-citroen-cx-1975-posledni-opravdovy-91999>
- [44] The Lotus 49 Formula 1 car. *95 Customs* [online]. 2004. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.95customs.com/interstate-1/>
- [45] Tyrrell P34. *Pinterest* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/510877151459499082/>
- [46] Lotus 78. *Wikipedie* [online]. 3.5.2017. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://it.wikipedia.org/wiki/Lotus_78
- [47] Brabham BT46B Fan Car: Making Lemonade From Lemons. *Jalopnik* [online]. 1.7.2010. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://jalopnik.com/5442597/brabham-bt46b-fan-car-making-lemonade-from-lemons>
- [48] Aerodynamika automobilů: Co to vlastně je?. *Tipcars* [online]. 23.7.2015. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/nase-tema/aerodynamika-automobilu-co-to-vlastne-je-1-dil.html>
- [49] 1986 Citroen Eole. *Car Styling* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.carstyling.ru/en/car/1986_citroen_eole/

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

c_x	[-]	Součinitel odporu
S_x	[m ²]	Průmět čelní plochy
v	[m·s ⁻¹]	Náporová rychlost
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota okolního vzduchu
c	[m·s ⁻¹]	Rychlost proudění
p	[Pa]	Tlak
U	[J·kg ⁻¹]	Měrná potenciální energie
B_{KONST}	[-]	Bernoulliho konstanta