

АЕРОДИНАМИКА, ДИЗАЙН И ЕРГОНОМИЯ НА АВТОМОБИЛА

Аеродинамиката е раздел от механика на флуидите (хидрогазодинамика). Явленията, които тя изучава са свързани със законите на движението и взаимодействието на твърди тела във въздушна среда. В началото на своето създаване тя се използва за развитието на въздухоплаването, т.е. въздушния транспорт. Влиянието на аеродинамиката при сухопътните превозни средства се проявява при движение с високи скорости и затова задълбочени изследвания за създаване на аеродинамични форми на автомобилите започват много по-късно от създаването им.

Тема 1. СЪЗДАВАНЕ НА АВТОМОБИЛНАТА АЕРОДИНАМИКА

В етапите на своето развитие автомобилът е бил подложен на влиянието на различни фактори определящи неговия външен вид. Намалването на петролните ресурси и растящите му цени предизвикват сериозни мерки от страна на конструкторите за повишаване на неговата горивната икономичност. До 80-те години на миналия век само част от произведените модели имат подходяща форма на купето, специално създадена за намаляване на въздушното съпротивление.

В началото изследванията се извършват предимно върху намаляване на аеродинамичното съпротивление. Много бързо става ясно, че стабилността на автомобила зависи не само от въздушния поток под него, но и от страничното влияние на вятъра. Необходими са сложни експерименти и изчислителни методи за определяне на влиянието на аеродинамичните сили при движението на автомобила.

1. Кратка история на развитието на автомобилната аеродинамика.

Развитието на аеродинамиката на автомобила може да се представи в 4 етапа:

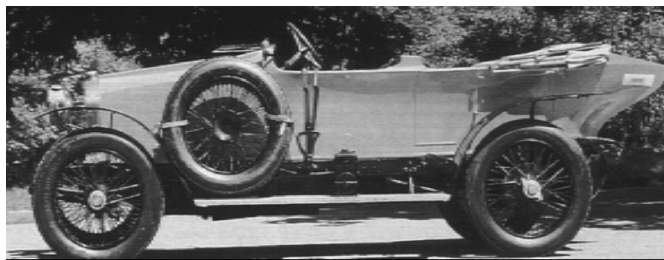
I. Етап: Приложение на аеродинамични форми взаймствани от други видове транспортни средства в периода 1900÷1920 г.

За този период е характерно копирането на вече утвърдени конструкции на самолети, кораби и др. Показания на фиг.1 електрически автомобил с формата на торпедо е създаден през 1899 г. и е достигнал максимална скорост 100 km/h.



Фиг. 1. „La Jamais Contente” с аеродинамична форма „торпедо”[1].

Използвани са и форми наподобяващи корпуса на лодка (фиг.2), както и такива приличащи на дирижабъл (фиг.3).



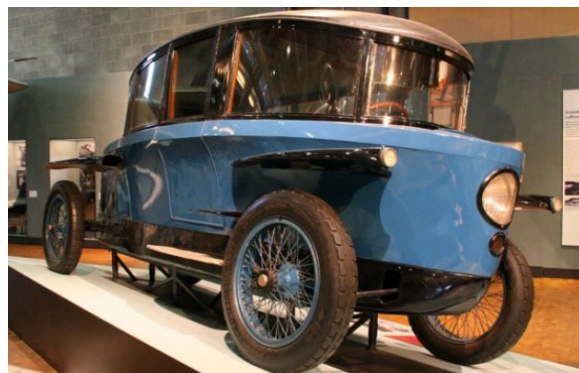
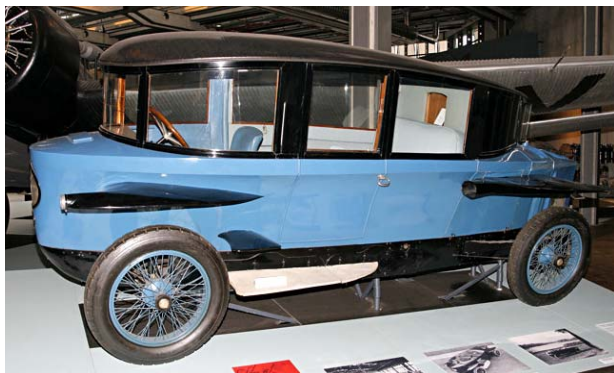
Фиг. 2. Автомобил с форма взаймствана от кораб.



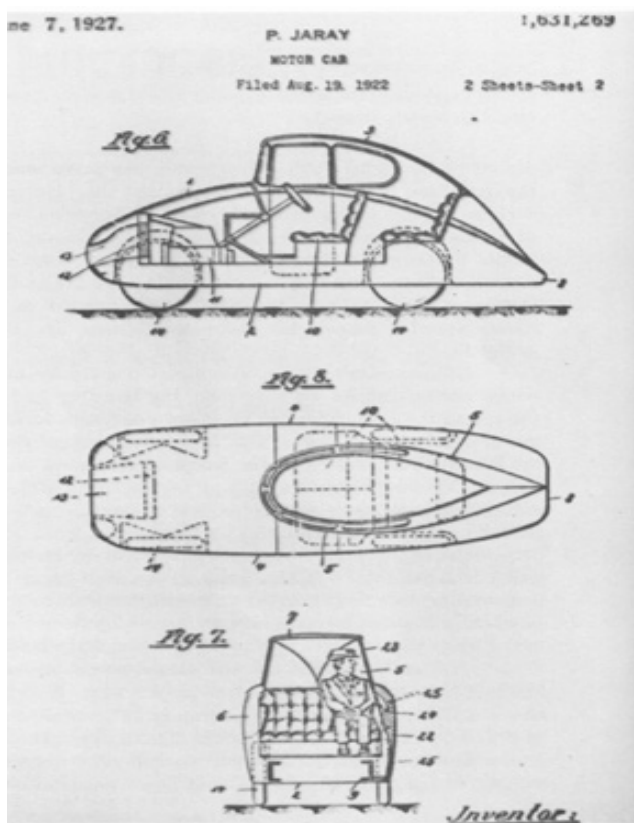
Фиг. 3. A.L.F.A. 40-60 HP с каросерия Castagna Aerodinamica от 1914 – 139 km/h. [1]

II. Етап: Създаване на нови автомобилни форми 1921÷1970 г.

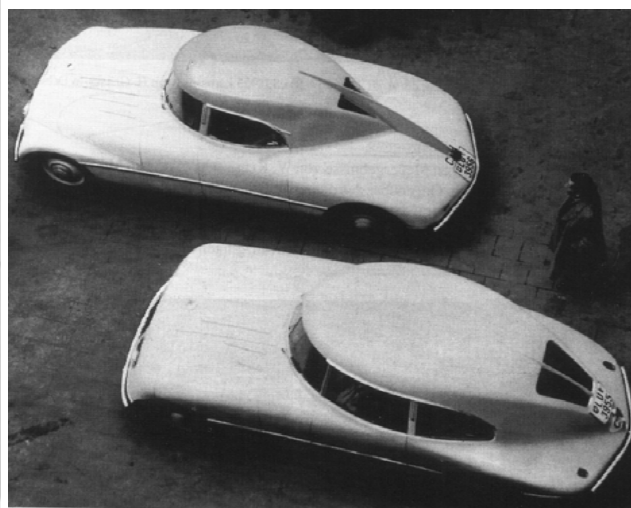
През този период в техниката става модерен рационализма (streamlining – заоблени контури по линиите на потока, облицовка, обгръщане от струйния поток). Много изобретатели с натрупан опит при строителството на самолети и дирижабли, използват различни форми и елементи с минимално въздушно съпротивление. През 1921 г. немският конструктор Едмунд Румплер създава първия автомобил с аеродинамична форма (фиг.4) с 6-цилиндров двигател с мощност 36 к.с. През 1979 г. при изпитания в аеродинамичния тунел на запазен екземпляр на колата е отчетен коефициент на аеродинамично съпротивление $C_x=0,28$.



Фиг. 4 Tropfen Auto (колата капка).[1]

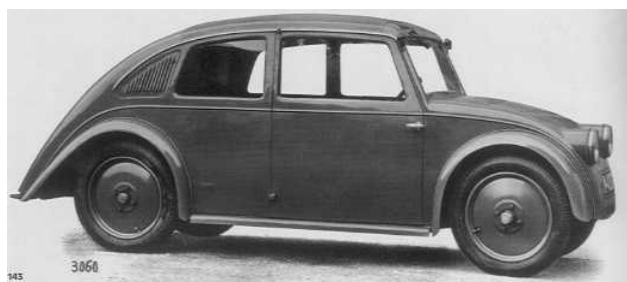


През 1927 г. Пол Джарей (Paul Jaray), използвайки своя опит като дизайнер на дирижабли създава нови форми за които получава патент и с това налага нова мода в аеродинамиката на автомобила (фиг.5). Много от неговите проекти са използвани от фирми като Audi, BMW, VW, и Daimler-Benz.[2]



Фиг. 5. Свидетелството за патент на Джарей и новите автомобилни форми[1].

В началото на 1921 г. се появява базовата серия (фиг. 6) на забележителните модели на чешката фирма „Татра“. Със своите заоблени форми по контурите на въздушния поток, независимото окачване и задно разположени двигатели с въздушно охлаждане, те оказват влияние върху развитието на автомобилите по света.



Фиг. 6. Tatra V570

През 1934 г. е произведен и модела Tatra T77 с коефициент на въздушно съпротивление $C_x=0,212$, стойност недостигната до 1995 г.



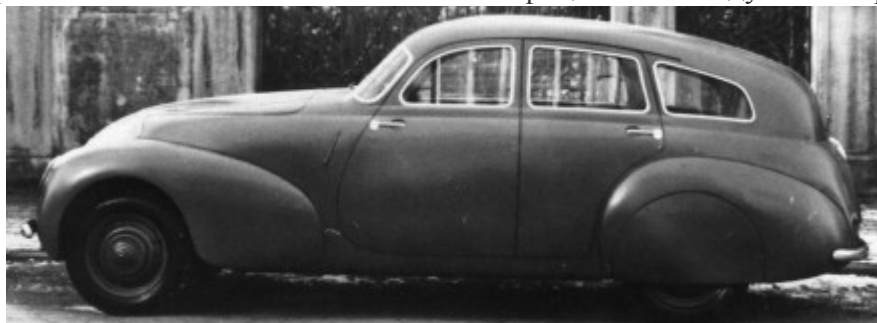
Фиг. 7. Tatra T77a Limo DV 08 CC (1934 г.) и Майбах (Maybach Stromlinien) - 1935 г.[1]

Подобни модели на Татра, с удължена задна част, достигащи максимална скорост 160 km/h, се произвеждат чак до 1980 г. (фиг.8).



Фиг. 8. Tatra T603

Значителен принос за развитието на аеродинамиката на автомобила имат германските специалисти Кьониг и Камм (Baron Reinhard von Koenig-Fachsenfeld и Wunibald Kamm). Те доказват, че дълго заострената опашка, смятана за ключов компонент на всяко аеродинамично тяло, всъщност може да бъде премахната и квадратната форма на задната част(фиг.9.) е достатъчна за осигуряване на ниско въздушно съпротивление. Новата форма (форма на Камм) е наречена по-късно „Ка” форма и намира серийно приложение в много модели заради наличието на достатъчна височина и обем в задната част на пътническия салон и едновременно с това запазване на нисък коефициент на въздушно съпротивление[2].



Фиг. 8. BMW прототип на Камм 1938 г. $C_x = 0.25$

Копирайки от на конструктора на „Татра”, Ледвинка (Hans Ledwinka), д-р Фердинанд Порше създава прочутия модел Бръмбар на Фолксваген (Beetle - фиг. 9), за което е заведено съдебно дело и едва през 1961 г., Германия изплаща на Татра 3 млн. марки (DM)[3].



Фиг. 9. Прототипа на Фолксваген от 1934 г.

Този факт изобщо не променя създаването на знаменитите модели на Порше (фиг.10÷12).



Фиг. 10. Порше 356 от 1948 г.

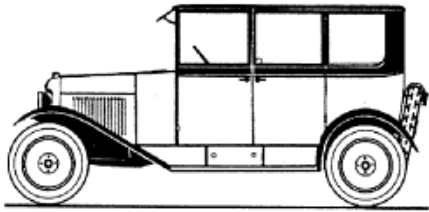
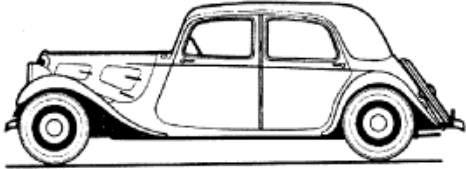
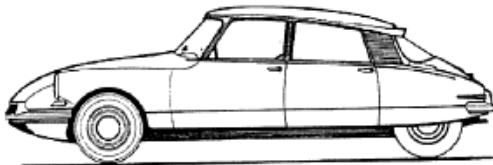


Фиг. 11. Порше 911, произвеждано в периода 1964-1989 г.



Фиг. 12. Порше 911, произведено 2012 г. – $C_x=0,31$.

Въпреки очевидните аеродинамични предимства на полу-кръглите тела, най-добрите модели автомобили по отношение на нисък коефициент на челно въздушно съпротивление, не влизат в серийно производство и от тях са остават само прототипи. Водещи автомобилни компании обаче провеждат редица изследвания за намаляване на съпротивлението при състезателните автомобили и някои технически решения се прилагат и в моделите за масовия потребител. Утвърждава се тенденцията към намаляване на челната площ на купето на автомобилите, усъвършенстване на дизайна и стремеж към намаляване на съпротивлението от въздуха. На следващата фиг.13 са показани измененията на формата и параметрите на моделите на „Ситроен“. За количествено сравнение е използвано производението от коефициента на аеродинамично съпротивление C_x и размера на челните площи величината F , а именно $C_x * F$. Много пъти автомобили с еднакви коефициенти C_x имат съществени разлики в челната площ F и съответно различни съпротивителни сили, при еднакви останали параметри.

Форма на купето на автомобила	Модел и година на производство	$C_x * F$
	Ситроен В 2, 1921	1,437
	Ситроен 7CV, 1934	1,230
	Ситроен DS 19, 1956	0.817
	Ситроен GSA-X3, 1980	0,575
	Ситроен ECO 2000, 1986	0,307

Фиг. 13. Еволюция на формата на „Ситроен” 1921-1986 г.[2]

III. Етап: Оптимизация на отделни елементи и детайли на автомобила - 1970÷1985 г.

Петролната криза в началото на 70-те години на миналия век и растящите цени на горивата налагат промяна в облика на масовия автомобил. Обръща се все по-голямо внимание на влиянието на формата върху скоростта на автомобила и взаимодействието и с въздушните потоци. Изследванията провеждани досега при състезателните автомобили се прилагат при обикновените автомобили с основна цел – намаляване на разхода на гориво. През 1975 г. компанията Фолкваген първа въвежда метод на етапна оптимизация на отделни елементи на купето на автомобила, водещи до общо намаляване на коефициента на челно съпротивление, но запазвайки цялостната идейна концепция на избрания силует.

Повечето производители възприемат този метод, започват да променят отделни елементи и важни детайли от купето на автомобила за подобряване на аеродинамичните му параметри и се оказва, че много модели на различни фирми започват все по-вече да си приличат. Успешните нововъведения и разработки на отделни възли и преходи във формата, имащи отношение към аеродинамиката се прилагат масово. Това са предимно промени в детайлите като: закръгления в ръбовете и премахване на стъпаловидните преходи; ъглите на панелите; изтънявания; уточняване на размера и мястото на спойлерите; страничните огледала; обтекатели; място и форма на радиаторните решетки, фарове и др.

При сравнението на два модела, чиито форми са получени чрез два различни подхода се вижда, че детайлната оптимизация (фиг. 14) позволява достигането на коефициенти на въздушно съпротивление съвместими с тези на автомобилите (фиг. 15), създадени по рационалния метод (по линиите на потока).



Фиг. 14. VW „Scirocco” – създаден чрез детайлна оптимизация през 1974 г. - $C_x=0,41$.



Фиг. 15. Opel GT – създаден с рационална оптимизация през 1969 г. - $C_x=0,42$.

IV. Етап: Оптимизация на основната форма на автомобила – след 1985 г.

Използваната до този момент детайлна оптимизация впечатлява с много бързо постигане на забележителни резултати, но скоро достига своите възможности. Необходим е нов подход и той започва с преоценка на създадените автомобилни форми в средата на 30^{-те} години на миналия век. Новия преоткрит „стар” метод е оптимизация на формата. Обикновено тя започва от основа моделна форма с ниско съпротивление форма, която постепенно се променя с малки стъпки, наблюдавайки изменението на коефициента на съпротивление от обтичане с въздушен поток. Този процес продължава докато се получи реална форма на колата, съобразена с изискванията на вътрешните пространства.

За първия автомобил, проектиран с този подход може да се приеме модела на AUDI 100 C3 от 1983 г.(фиг.16), въпреки че някои елементи от него, като липсата на улеи за отвеждане на водата от покрива на купето, спада към детайлната оптимизация и този факт се използва от много други производители, налагайки го като стандарт.



Фиг. 16. AUDI 100 C3 – създаден с оптимизация на формата през 1983 г. - $C_x=0,30$.

След 1990 всички фирми прилагат новия подход на създаване на автомобила, а именно оптимизация на основната форма. Подходящи примери може да се видят почти при всички марки и модели, както и при всички класове автомобили движещи се с достатъчно високи скорости.

В настоящия момент аеродинамиката на автомобила се определя като изкуство съчетаващо едновременно основната форма и детайлната оптимизация. Съвременните автомобили имат коефициент на челно съпротивление $C_x = 0,25 \div 0,30$. Главна цел на дизайнерите е неговото намаляване в разумните граници на **0,20**. Тенденциозно се използват общи технически принципи като малки радиаторни решетки с направляване на въздушния поток; отвори за въздух разположени близо до точката на стагнация или критична точка (точка в полето на флуидния поток, където скоростта на флуида е нула) под предната броня и високи ъгли на наклона отпред и на задното стъкло.



Фиг. 16. Концептуален модел „Mercedes Bionic” от 2005 г. – $C_x=0,19$.



Фиг. 17. „Mercedes F125” [4].

ТЕМА 2. ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ НА ВЪЗДУХА. ВЕЛИЧИНИ И ПОНЯТИЯ ИЗПОЛЗВАНИ В АЕРОДИНАМИКАТА.

1. Състав на въздуха.

Въздухът, който образува земната атмосфера, представлява смес от различни газове. Основните са: **азот**, **кислород** и **аргон**. В състава влизат и други газообразни примеси (Таблица 1), но техният състав е различен в зависимост географските координати и височината. От газовите примеси с по-малка концентрация, най-голямо значение имат водните пари, въглеродният диоксид, озонът, серният диоксид и атмосферните аерозоли.

2. Свойства на въздуха.

- **Налягане** – p [Pa] – атмосферно налягане $p_a = 0.1$ Мра. В аеродинамиката е прието да се отчита разликата от нормалното атмосферно налягане:

$\Delta p = p - p_a$, и съответно когато $\Delta p > 0$ – надналягане, $\Delta p < 0$ – подналягане.

- **Температура** – нормална температура на въздуха при земната повърхност – $t = 15^\circ\text{C}$, или $T = 273^\circ + t$, K, $T = 288^\circ\text{K}$

- **Плътност** – ρ [kg/m³] – при температура 15°C и налягане $p_a = 0.1$ Мра, плътността на въздуха е $\rho = 1.20$ kg/m³

- **Вискозитет** – свойство на флуидите да текат; вътрешното триене на въздуха е много малко и флуидните частици са лесно подвижни. В свободен поток това свойство се проявява само близо до повърхността на телата при движението на въздуха, като граничен слой с нулева скорост. Измерване:

$$\mu = \frac{F}{S \frac{dV}{dy}} \text{ [Pa.s]}, \text{ където:}$$

μ (или η) – динамичен вискозитет изразен чрез силата на вътрешно триене F , действаща на единица площ S от триещите се слоеве при единичен градиент на скоростта V в направление y , перпендикулярно на направление на движение на флуида.

Често като мярка за вискозитета се използва кинематичния коефициент: $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, [m²/s]

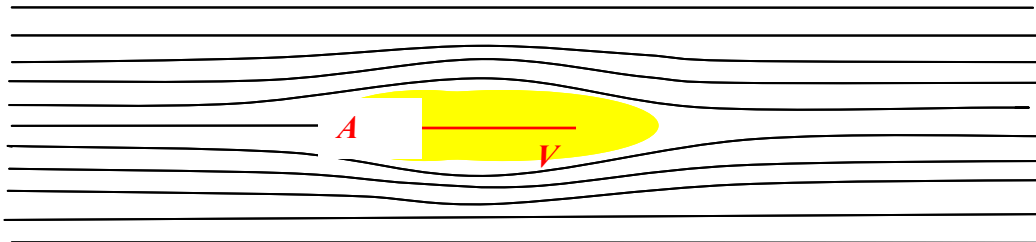
3. Скоростно поле и токови картини.

Движението на флуидите най-често се анализира посредством локалния метод (метод на Ойлер). При него скоростта на флуидните частици се определя като функция на времето, а координатите x, y и z са независими променливи. Във всеки момент от времето за всяка точка може да се построи векторът на скоростта, т.е. образува се скоростно поле. Графичното описание на разпределението на скоростите за флуида (в случая въздушния поток), може да

Таблица 1. Състав на земната атмосфера

Азот (N ₂)	78,084 %
Кислород (O ₂)	20,946 %
Аргон (Ar)	0,9340 %
Въглероден диоксид (CO ₂)	0,039445 %
Неон (Ne)	0,001818 %
Хелий (He)	0,000524 %
Метан (CH ₄)	0,000179 %
Криптон (Kr)	0,000114 %
Водород (H ₂)	0,000055 %
Диазотен оксид (N ₂ O)	0,00003 %
Въглероден монооксид (CO)	0,00001 %
Ксенон (Xe)	0,000009 %
Озон (O ₃)	0 - 0,000007 %
Азотен диоксид (NO ₂)	0,000002 %
Йод (I ₂)	0,000001 %
Амоняк (NH ₃)	незначителна конц.
Водни пари (H ₂ O)	0,033 %

се представи чрез токови линии (фиг. 1) - въображаеми линии образувани от точките в пространството, в които скоростните вектори в даден момент имат посоката на съответните допирателни.



Фиг. 1 Токови линии при обтичане на твърдо тяло.

Токовете линии на полето не винаги съвпадат с траекториите на флуидните частици. При неустановените течения скоростта в отделните точки на флуидното пространство се мени с времето по големина и направление, и токовете линии изменят формата си, не съвпадат с траекторията на флуидните частици и се наричат моментни токови линии[5]. Когато във всяка точка от пространството скоростта остава постоянна по големина и направление, то и токовете линии остават непроменени в течение на времето, т.е. те представляват траектории на флуидните частици. В такива случаи теченията (въздушните потоци) се наричат установени или стационарни (скоростите, налягането и плътността са независими от времето).

За стационарни несвиваеми флуиди може да се приложи уравнението на Бернули:

$$\frac{V^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g \cdot z = \text{const} \quad \text{или ако се вземе под внимание факта, че при въздушния поток}$$

масовите сили може да пренебрежимо малки в сравнение с другите външни сили и умножим израза по-горе с плътността на флуида ρ получаваме уравнението:

$$\frac{\rho V^2}{2} + p = p_n = \text{const} \quad \text{или пълното налягане } p_n \text{ е равно съответно на сумата от}$$

динамичното и статичното налягане и е постоянна величина.

Обикновено през всяка точка на флуидното течение може да се прекара само една токова линия. Изключение правят специални (особени) точки, в които се пресичат повече от една токови линии. Това от своя страна предполага движението на флуидните частици в особените точки да има едновременно различни направления, от което следва очевидно, че скоростта в тези точки може да бъде или нула, или безкрайност.

При обтичането на едно твърдо тяло (фиг.1) токовете линии се разделят от двете страни на тялото. Винаги съществува една която атакува точно по нормалата в точка A . Тя се нарича критична и в нея скоростта на флуида е равна на нула. Използвайки уравнението на Бернули може да се определи налягането в т. A :

$$p_A = \frac{\rho V^2}{2} + p, \quad \text{т.е. налягането в т. } A \text{ е сума от динамичното налягане на потока и}$$

статичното налягане. В случая налягането в тази точка се нарича съпротивително или налягане на спиране. Ако се разгледа само надналягането:

$$p_A - p = \frac{\rho V^2}{2}, \quad \text{се получава динамичното налягане на потока или скоростния}$$

динамичен напор.

Според структурата на потока (движението на частиците) реалните флуиди се класифицират на **ламинарни(слоести)** и **турбулентни(бурно, смутено)**. Моментът в който едно течение в цилиндрична тръба (или аеродинамичен тунел) преминава от ламинарно в турбулентно може да се определи с критерий (критично число) на Рейнолдс:

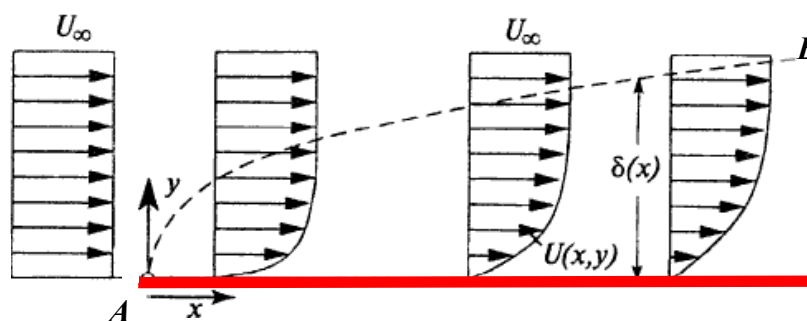
$$Re_{кр} = \frac{dV}{\nu}, \text{ където } d - \text{диаметър на потока(тръбата), } V - \text{скорост на флуида и } \nu -$$

кинематичния вискозитет. Опитно е установено, че за цилиндрична тръба $Re = 2320$, т.е. това е границата на устойчивостта на ламинарни течения в прави цилиндрични тръби. При наличие на по-големи стойности потока може да премине в турбулентен.

Тема 3. АЕРОДИНАМИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ТРУДНО ОБТЕКАЕМИ ТВЪРДИ ТЕЛА.

1. Граничен слой на въздушния поток.

Реалните флуиди, какъвто е въздуха, притежават свойството прилепчивост(полепваемост), което означава, че скоростта на флуида(въздуха) непосредствено до повърхността на тялото е равна на нула. На фиг. 1 е показано разпределението на скоростта $U(x,y)$ в граничния слой при обтичане на неподвижна стена. От нула при стената тя нараства бързо с отдалечаването от нея, като се приближава до скоростта на външното течение[2]. Прекъснатата линия AB показва приблизително дебелината $\delta(x)$ на граничния слой.

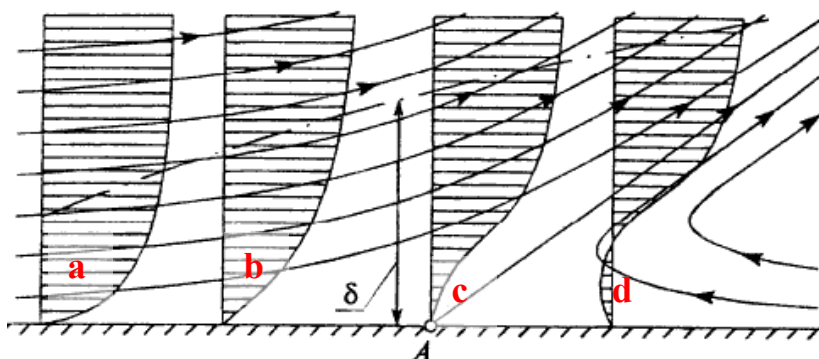


Фиг. 1 Граничен слой в ламинарен поток.

С увеличаване на дължината по ос x дебелината $\delta(x)$ се увеличава, доближава се до токовите линии, но не съвпада с токовата повърхнина, и флуидните частици от външното течение непрекъснато проникват в граничния слой.[2] При малки скорости на флуида и съответно малка дължина на обтичаното тяло, течението в граничния слой може да запази ламинарния си характер по цялата дължина. При по-големи скорости ламинарния характер се запазва на известна дължина x_L от началото на стената, след което преминава в турбулентно. В тя е обвързана с критичното число на Рейнолдс:

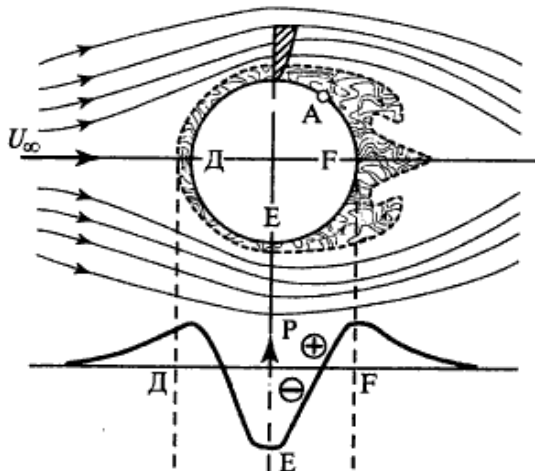
$$Re_{кр} = \frac{x_L \cdot V}{\nu}, \text{ където в случая } V \equiv U \text{ и } \nu - \text{кинематичния вискозитет.}$$

Увеличаването на скоростта на флуида покрай стената на обтичаното тяло може да доведе до откъсването на граничния слой с последващо вихрообразуване. Триенето на флуидните частици в повърхността води до бързо намаляване на кинетичната им енергия, т.е. те намаляват скоростта си(фиг.2 b,c) и под действието на налягането могат да се придвижват в обратна посока(фиг.2, d). Натрупването на все повече спрели се частици води до откъсване на потока и последващо образуване на вихри.



Фиг. 2. Откъсване на граничния слой [1].

Формиране на вихри след откъсване на граничния слой при обтичане на цилиндрично тяло, напречно разположени спрямо токовите линии на флуида.(фиг. 3.) Откъсването на този слой на потока и образуването на вихри в задната част са свързани със загуба на енергия. Обикновено това се получава при обтичане на тела с необтекаема форма(обтекаема е формата на водната капка). Такова тяло с трудно обтекаема форма се явява задната част на автомобила.



Фиг. 3. Обтичане на напречно разположен цилиндър[1].

Образуването на вихри в задната част на автомобилите е свързано със значителна загуба на енергия, създава се обширна зона на забавено движение на флуида с понижено налягане, причиняващо повишено съпротивление на движение, което зависи правопрпорционално от дължината на вихровата опашка.

2. Коефициент на въздушно съпротивление на трудно обтекаеми тела.

Оценка за формата на едно тяло и нейното влияние върху съпротивлението на движение при взаимодействието с въздушния поток се дава с коефициента на аеродинамично съпротивление C_x . Много тела с различна аеродинамична форма имат теоритично изчислени и експериментално потвърдени коефициенти на въздушно съпротивление.(таблица 1) За някои тела, обаче с неподходяща за обтичане форма има само експериментално определени коефициенти.[2] Формата на тези тела е с неподходящи внезапни преходи и остри ръбове, които спомагат за откъсването на граничния слой и възникване на смутено течение, т.е. образуване на турбулентни потоци и вихрови опашки.

Представа за ламинарността на граничния слой и възникването на вихрови образувания може да се получи чрез измерване на налягането по повърхността на тялото. Посредством подходящо разположени в мрежова конфигурация отвори може да се открият зоните с по-ниски или даже отрицателни стойности на налягането.

За запазване на ламинарния поток в тези места може да се приложат конструктивни изменения в няколко направления:

- увеличаване на скоростта на въздушния поток близо до повърхността на тялото.
- изсмукване на забавения граничен слой към вътрешността на тялото.
- издухване на забавения граничен слой покрай тялото в посоката на движение на основния поток.

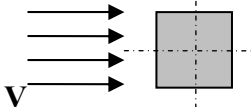
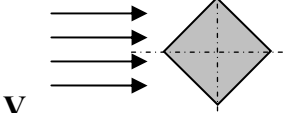
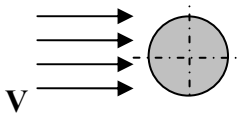
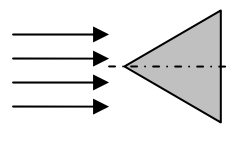
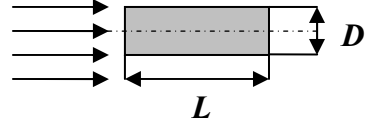
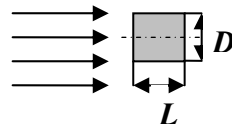
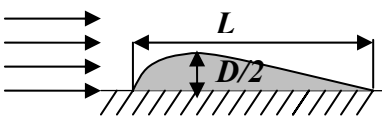
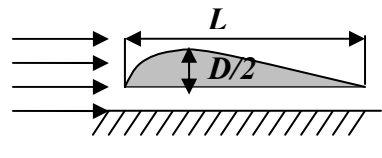
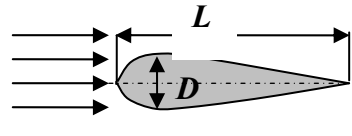
Разликата в налягането на въздушния поток в предната и задната част на телата с неправилна обтекаема форма(различна от идеалната капковидна форма) и наличието на вихрова следа са основните причини за създаването на съпротивителна сила.

Според формата на телата и склонността им към образуване на вихрови потоци те може да се разделят няколко групи:

- I. Цилиндрични тела с плавно изменение на кривината.
- II. Профилирани тела с форма на призма.
- III. Обемни тела (3D) образувани от криволинейни и плоски повърхнини.
- IV. Сложни тела съставени от няколко необтекаеми или комбинация от добре обтекаеми и лошо обтекаеми.[2]

В голяма част от своето разнообразие автомобилния парк е съставен от возила от IV група.

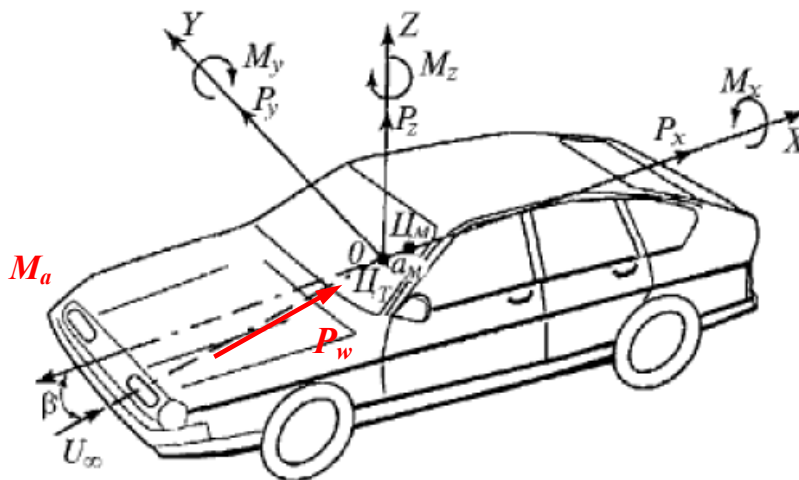
Таблица 1 Стойности на коефициента C_x за твърди тела

Тяло	Форма	C_x
Квадрат		1,05
Квадрат		0,80
Сфера		0,47
Конус с ъгъл при върха 60°		
Цилиндрично тяло $L/D=2$		0,82
Цилиндрично тяло $L/D=1$		1,15
Тяло с обтекаема форма въху основа $L/D = 2,5$		0,09
Тяло с обтекаема форма на разстояние от основа $L/D = 2,5$		0,10
Тяло с капковидна форма $L/D = 2,5$		0,04

Тема 4. АЕРОДИНАМИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА АВТОМОБИЛА

1. Аеродинамични сили и моменти.

При движението на автомобиля с висока скорост ($V > 20\text{m/s}$), поради наличието на въздушна среда възникват аеродинамични сили и моменти. Аналогично взаимодействие възниква и при обръщане на условията, т.е. върху неподвижен автомобил действа въздушен поток със скорост V (на фиг. 1. $V = U_\infty$).



Фиг.1. Аеродинамични сили и моменти действащи на автомобила. [3]

На показаната по-горе фигура са означени следните сили и моменти:

- P_x – основна(челна, фронтална) съпротивителна сила
- P_y – странична(ветрова) съпротивителна сила (сила на плъзгане)
- P_z – вертикална съпротивителна сила (подемна сила)
- M_x – завъртане около ос x , странично наклоняване, преобръщане (крен, roll)
- M_y – завъртане около ос y , наклон напред/назад (тангиране-тангаж, pitch)
- M_z – завъртане около ос z , завъртане, отклоняване от курса (рискаене-рыскание, yaw)
- β – ъгъл на отклонение на въздушния поток спрямо посоката на движение на автомобила
- U_∞ – скорост на въздушния поток преди взаимодействието с автомобила
- C_T – център на тежестта
- C_M – метacentър, геометричен център на челната повърхност.
- a_m – разстоянието между C_T и C_M

Пълната аеродинамична сила P_w е резултантна от трите образуващи P_x , P_y и P_z действащи по три взаимно перпендикулярни оси. Тези сили са съпротивлението P_x – мярка за аеродинамичната сила, която пречи на движението напред на автомобила, вертикалната сила P_z (подемна, лифт), която може да действа нагоре или надолу, както и P_y страничната сила, която се среща само в случай на страничен вятър или когато превозното средство е в непосредствена близост до друго такова (при изпреварване или разминаване).

При движение с висока скорост значителна част от мощността на автомобила се изразходва за преодоляване на фронталната (челната) сила на въздушно съпротивление. Определя се от следната зависимост:

$$P_x = \frac{c_x \cdot A \cdot \rho_v \cdot V^2}{2}, \text{ където:}$$

c_x – коефициент на аеродинамично съпротивление, (безразмерен коефициент)

ρ_e – плътност на въздуха [kg/m^3] ($\rho_e = 1,202 \div 1,225 \text{ kg/m}^3$),

A – площ на мидел-сечението (най-голямото сечение) на автомобила, [m^2],

V – скорост на автомобила, [m/s].

За площ на мидел-сечението се приема която и да е площ равна на проекцията на автомобила върху равнина перпендикулярна на надлъжната ос.

Площта на мидел сечението се определя със зависимостта:

$A = \alpha \cdot B \cdot H$, където:

α – коефициент на запълване на сечението,

B – най-голяма ширина на автомобила, [m]

H – височина на автомобила, [m].

Приложната точка на аеродинамичната сила е в метацентъра на автомобила.

Стойностите коефициента на запълване на сечението са:

- За леки автомобили – $0,78 \div 0,80$
- За товарни автомобили – $0,75 \div 0,90$

Аналогично се определят и останалите съпротивителни сили P_y и P_z , съответно с коефициенти c_y и c_z .

Тъй като аеродинамичните сили, са пропорционални на съответния коефициент и на областта за която се отнася (обикновено челната площ), то означението C_x най-често се използва като мярка за аеродинамична характеристика, а именно като коефициент на челно съпротивление.

Пълния момент M_a действащ на автомобила е:

$$M_a = P_w \cdot B = \frac{c_x \cdot A \cdot \rho_e \cdot V^2 \cdot B}{2}, \text{ където } B - \text{колея (следа – разстоянието между контактните}$$

точки с пътя на колелата от един мост)

Този момент е резултат от действието на моментите от трите оси. Моментите, които действат по тези оси са мярка за склонността към завъртане на возилото около някакъв център, най-често центъра на тежестта. Такова въздействие на момент най-лесно се получава в условията на страничен вятър при наличието на ефективна аеродинамична странична сила, приложена встрани от центъра на тежестта т.е. когато метацентъра не съвпада с центъра на тежестта, в резултат на което се наблюдава отклоняване на возилото в посоката на вятъра. Ако надлъжната му ос x не съвпада с посоката на въздушния поток, автомобила се стреми да заеме положение перпендикулярно на него. В екстремни условия при пориви на вятъра стремежа за коригиране на управлението от страна на водача може да доведе до загуба на контрол.

2. Фактори определящи общото аеродинамично съпротивление.

При движението на автомобила се появява съпротивление поради въздействието на въздушната среда върху него. Причините за това са комплексни: от триенето в слоевете въздух обтичащи повърхностите на автомобила; от сгъстяването на въздуха при срещата с атомобила; от разреждането на въздуха зад автомобила и образуването на вихри, обграждащи купето на автомобила. Скоростта на флуида, дебелината и характера на граничния слой зависят до голяма степен от размера, формата и скоростта на превозното средство. Поради ограниченията, наложени от нуждата за реалистично пътническо пространство и изискванията за проектиране обикновено се създава профил, който в повечето случаи създава сила с вертикална компонента. Тази сила, независимо от нейната посока дали е положителна (нагоре) или отрицателна, предизвиква промени в характера на потока, които сами по себе си създават индуцирана сила на съпротивление.

Аеродинамичното съпротивление при движението на автомобила може да се разгледа чрез няколко определящи го фактори, разделени в следните основни групи:

- Съпротивление от формата на атомобила - $52 \div 80 \%$

- Индуктивно съпротивление - 5÷17 %
- Съпротивление от триене – до 15 %
- Съпротивление от вътрешните потоци - до 12 %
- Съпротивление от интерференцията на въздушния поток - 6÷10 %

Разпределението на влиянието на различните фактори е строго индивидуално за конкретната форма на модела клас на автомобила и може да бъде много по-различно от представеното по-горе.

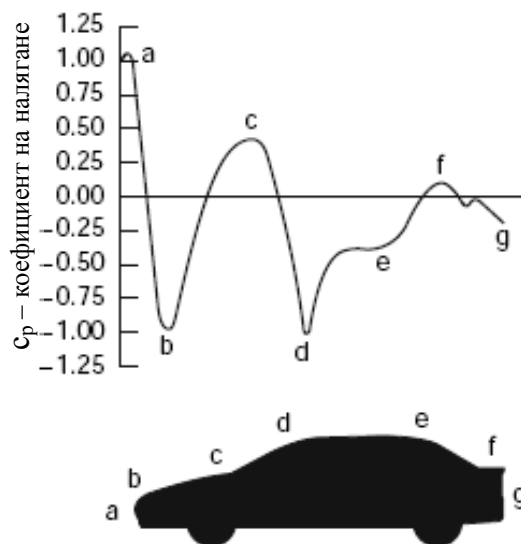
1. Съпротивление от формата на атомобила.

Най-подходящата форма на твърдо тяло движещо се във въздушна среда с минимално съпротивление е тази на водна капка, получена в свободно падане при наличие на гравитация.



Фиг. 2. Коефициент на съпротивление от формата на обекта при движение във въздушна среда

При движението на автомобила с висока скорост се получава преместване на въздушния поток по неговата повърхност. Преминавайки през различните панели на корпуса при обтичането скоростта на потока се променя. В резултат на това се създават зони с различно налягане. На фиг. 2 е показано разпределението на налягането по осовата линия на автомобила във въздушния поток при движение на автомобил тип „седан”(триобемно купе)



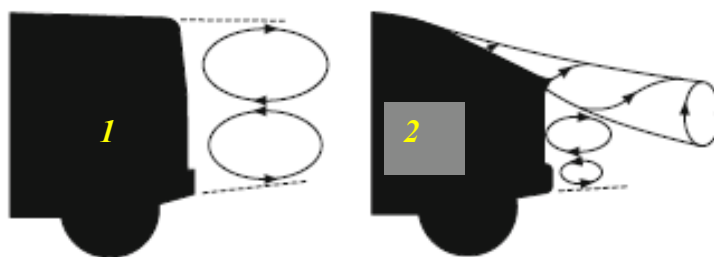
Фиг. 2. Зоново разпределение на налягането. [4]

Основното съпротивление се явява в предната част на купето, където се отчита максималното налягане (точка „a”) и това влияе върху създаването на подходяща форма за минимално съпротивление. От тази зона с високо налягане и ниска скорост, в следващата потока бързо ускорява около предната част, горния ъгъл (точка „b”) преди да се забави отново с същата бързина. Забавения въздух няма достатъчен импулс, за да се носи по повърхността на тялото срещу общия натиск на налягането и вискозните сили на триене, в резултат на отделяне на граничния слой от повърхността на тялото и създаването на

нестабилна зона на турбулентност, който само по себе си е свързано със загуба на енергия и следователно създаване на съпротивление. Втора зона на разделение се наблюдава в основата на предното стъкло (т. „с”). Решаващо влияние има наклона на предното стъкло – увеличаването му води до намаляване на коефициента на челно съпротивление. Третата зона с понижено налягане (**d – e**) е по горната част на купето (покрива) и показва увеличение на скоростта на потока и срыв в прехода към задното стъкло.

Разпределението на налягането по осовата линия в задната част на автомобила (фиг.2-**g**) показва, че повърхностното налягане на въздуха там е значително по-ниско от това на околната среда. От двете страни на купето кривината е много по-малка и налягането на въздушния поток малко се различава от условията на околната среда. Ниското налягане над горната повърхност(покрива) допринася за повдигането на въздуха (с относително по-високо налягане) нагоре по протежение на двете страни на колата и води до създаването на интензивни, конусни вихри които увеличават вероятността потока от покрива на купето да остава закрепен към повърхността, дори и при ъгли на задното стъкло над 30° .

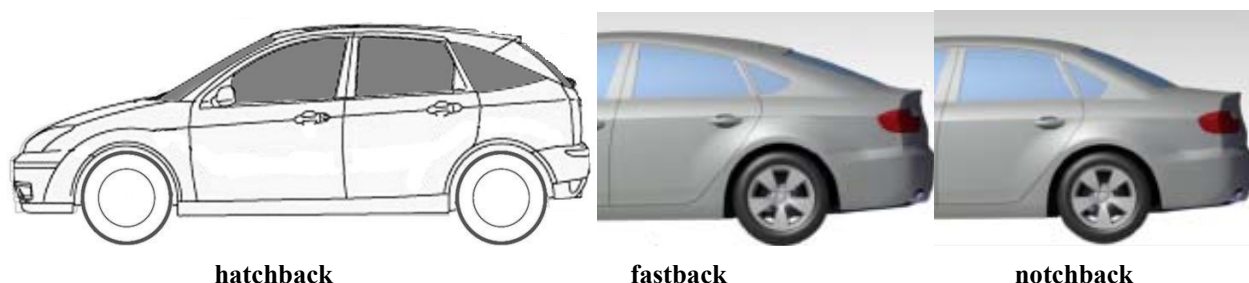
Формирането на въздушните потоци в задната част може по-лесно да се изясни при сравнението на алтернативните структури на фиг. 3.



Фиг. 3. Образуване на вихри при различни форми на задната част. [4]

Първия поток се получава при квадратните форми(поз.1 на фиг.3) и се характеризира с широка следа с ниско налягане. Течението от горната част(покрива) не е в състояние да следва повърхността на тялото около острите задни ъгли. Съпротивителната сила, свързана с такива потоци зависи от площта на напречното сечение на опашката(задната част на автомобила), налягането действащо върху повърхността на тялото, и в по-малка степен, от енергията която се абсорбира от създаването на вихри. От своя страна величината на налягането, енергията и честотата, свързани със създаването на вихрите зависят до голяма степен от скоростта на превозното средство, височината и ширината на задната част.

Много по-различен поток възниква(поз.2 на фиг.3), ако на задната повърхност се спуска много внимателно и леко, както е в случая за показаните форми (фиг. 4):



Фиг. 4. Оформяне на задната част на автомобила.

Формата на автомобила определя стойностите и местоположението на зоните на повишено или понижено налягане на въздушния поток. Тя може да генерира турбулентен поток и образуването на вихровите следи. Съпротивлението от формата на тялото остава

основен фактор определящ общия коефициент на аеродинамичното съпротивление на автомобила.

2. Съпротивление по индукция.

Обтичането на купето на автомобила е съпроводено с ускорение на въздушния поток и съответно намаляване на налягането (по-ниско от атмосферното) проявяващо се най-много около следните места:

- предния ръб на капака;
- предния ръб на покрива;
- на ъглите на предното стъкло.

Под долната част (пода) на автомобила се получава известно забавяне на въздушния поток и съответно повишаване на налягането, което води до появата на подемна сила. При по-високи скорости (над 110-120 км/ч) може да се наруши управляемостта на автомобила и да се получи загуба на устойчивост.

3. Повърхностно съпротивление (съпротивление от триене)

Поради вискозитета на въздуха се образува бавно(относително) движещ се граничен слой. От въздействието на въздушните потоци по повърхността на автомобила са генерирани сили на триене, което води до втория компонент на съпротивлението, което обикновено се нарича повърхностно съпротивление или челното съпротивление на триене по повърхността. Ако приемем, че плътността на въздуха се счита за почти постоянна величина, то силите на триене в която и да е точка от повърхността на тялото зависят от срязващите напрежения генерирани в граничния слой. Това е този слой на флуида в близост до повърхността, в която промените на скоростта на въздуха от нула на повърхността (спрямо превозното средство) до местния максимум на известно разстояние от повърхността. Както се видя по-горе този максимум се променя в различен зони от повърхността на превозното средство и е пряко свързан с местното налягане. За граничния слой съществува критична скорост $V_{кр}$ на отделане на потока. Намаляването на грапавостта на повърхнината не оказва влияние при по-ниски скорости от критичната. Нормалната грапавина при автомобилното покритие е около $0,5 \div 1 \mu m$.

4. Съпротивлението от вътрешните потоци.

Един от последният от главните фактори влияещи върху аеродинамичното съпротивление на моторните превозни средства е от въздушните потоци произтичащи от охлаждането на двигателя, охлаждането на други механични компоненти, като например спирачките и от вентилацията на кабината. Вzeti заедно, тези вътрешни източници на съпротивление обикновено съставляват над 10% от общото съпротивление. Съпротивлението от вътрешните потоци: се състои от няколко съставляващи:

- Охлаждане на двигателя;
- Охлаждане на спирачките;
- Вентилиране на купето.

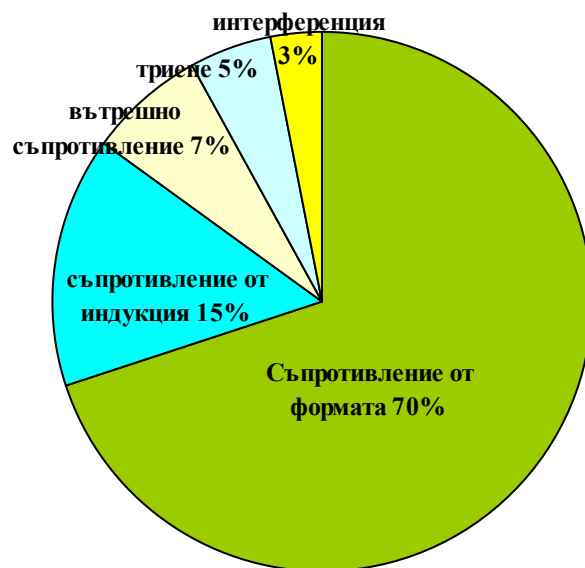
5. Съпротивление от интерференцията на въздушния поток.

Различни стандарти и конструктивни изисквания създават допълнителни източници на съпротивления. Изпъкващите части на купето значително увеличават аеродинамичното съпротивление на автомобила. Често наричани „израстъци на съпротивление” това са всички компоненти, които нарушават иначе гладката повърхност на превозното средство и генерират енергопоглъщащи вихри и турбуленция. Това са не само видимите елементи като колелата и калниците, странични огледала, дръжки на вратите, улуци за отвеждане на дъждовната вода и пера на чистачките, но и някои скрити, като изпускателната система също са сред основните източници на съпротивление. Въпреки че някои от тези елементи

индивидуално създават само малки съпротивителни сили, то общия ефект може да бъде увеличаване на общото съпротивление с 50%. Ако приемем съпротивлението на едно странично огледало за обратно виждане (с обтекаема форма) отделно от автомобила за 100 %, то поради факта, че скоростта на въздушния поток близо до ъгъла на челното стъкло е с 20–30 % повече от скоростта на автомобила, то съпротивлението на огледалото (монтирано на автомобила) ще бъде 165 %. Премахването на някои елементи от купето на автомобила или оптимизацията на тяхната форма допринася за намаляване на общото съпротивление:

Съпротивление на някои части % от общото: дръжки на вратите – $1 \div 3$ %; огледала – $3 \div 5$ %. Намаляването на общото съпротивление от формата води до увеличаване на влиянието на интерференцията, т.е. наличието на препятствия в ламинарния поток предизвиква турбулентност.

Разгледаните по-горе фактори определят аеродинамичния облик на автомобила и формират коефициента на съпротивление от въздуха при движението му с висока скорост. Индивидуалното влияние на всеки един фактор е различно и зависи от конкретния клас автомобили(фиг.5).



Фиг. 5. Дялове от коефициента на съпротивление при малък клас леки автомобили.

Тема 5. МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЕРОДИНАМИКАТА НА АВТОМОБИЛА

Подходящо създадената аеродинамична форма на автомобила е ключ към повишаването на максималната скорост и намаляването на разхода на гориво. Едновременно с това се осигурява по-добра курсова устойчивост, управляемост на автомобила, понижаване на общия шум при движението му. Добрата обтекаемост, качеството на повърхностите, малките хлабини и броя на изпъкващите елементи спомагат за намаляването на шума. Аеродинамиката се изразява не само в намаляването на челното съпротивление, но и чрез склонността на автомобила към поддаване на влиянието на страничните течения от силен вятър или при разминаване с висока скорост. Предварителното изчисляване на всички параметри с голяма точност е почти невъзможно и винаги се налага провеждане на експерименти за изследване на аеродинамиката и коригиране на формата на модела.

1. Числени методи

Първите опити за изследване на аеродинамиката на автомобила, а именно процеса на създаване на въздушното съпротивление и начина за неговия контрол, са били експериментални. Изследвани са така наречените „лъже тела“, необтечни твърди тела с размери пропорционални на реален автомобил, за да се изучи поведението на потока при използването на нови форми на задната част (hatchback и fastback), [1],[2].

Формите на автомобилите са такива, че предразполагат към създаване на зони по повърхността в които се образуват вихри и откъсване на потока. Това води до трудности при моделирането и получаване на недостатъчно надеждни резултати.

При моделиране на аеродинамиката на автомобилите обикновено се подхожда на два етапа:

- I. Използвайки закони от физиката се извеждат уравнения на движението на въздуха около колата или извън нея.
- II. Решавайки тези уравнения се изчисляват аеродинамичните сили и налягания във функция на времето и пространството.

Въпреки това, предварителното изчисляване на всички параметри с голяма точност не винаги е възможно. Въздушните потоци са триизмерни със характерни откъсвания на течението от повърхността, образуване на вихри и превръщане на ламинарния поток в турбулентен. Съвременните стратегии за моделиране включват омрежване на пространството около автомобила, с много гъсто разположени възли близо до повърхността и по-редки с отдалечаването от нея. Теоритичното и числено представяне, съответстващо на протичащите процеси може да се получи по няколко начина:

- Линеини уравнения за движение на потенциални течения при определени гранични условия.
- Нелинейни уравнения за движение на потенциални течения (диференциални уравнения на Ойлер) – този начин и другия по-горе намират разпределението на налягането, подезната сила и индуктивното съпротивление.
- Пълни уравнения на Навие-Стокс - турбулентни модели – могат да се решават чрез директна числена симулация (**DNS - Direct Numerical Simulation**) – изискват създаването на много фина решетка (мрежа) близо до повърхността, което предполага наличието на изключително големи компютърни ресурси и може да се използва само за малки числа на Рейнолдс. Позволяват точно отчитане на прехода на граничния слой от ламинарен в турбулентен поток.
- Средни уравнения на Навие-Стокс по метода на Рейнолдс – (**RANS - Reynolds Averaged Navier Stokes**) – средно времеви уравнения за движението на потока отчитат триенето и приблизително турбулентността – резултатът е набор от не

толкова скъпи уравнения съдържащи допълнителни неизвестни променливи, които трябва да бъдат моделирани, изискват по-малко фини мрежи близо до повърхността и задължително се комбинират с модел за турбулентност.

Преносното уравнение по RANS може да има следния вид:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{T}_{ij}^{(v)} - \overline{u_i u_j} \right], \quad (1)$$

$$\bar{T}_{ij}^{(v)} = 2\nu \bar{S}_{ij} \text{ и} \quad (2)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

където:

$\bar{U}_i$ - скорост; $\bar{P}_i$ - налягане, $\bar{T}_{ij}^{(v)}$ - триене и $\overline{u_i u_j}$ - напрежение по Рейнолдс

За несвиваем поток усредненото по време уравнение е:

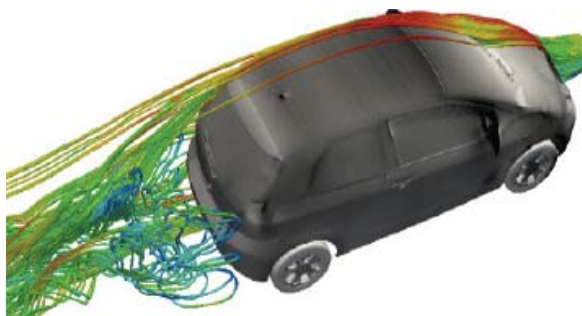
$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

Броят на неизвестни променливи е повече от броя на уравненията и за да се получи система от уравнения се въвежда **k-ε** модел за турбулентност.

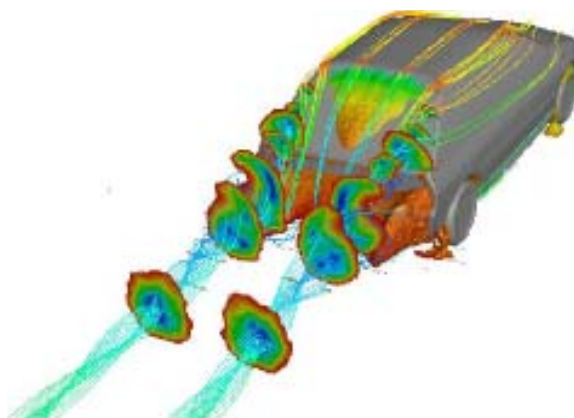


Фиг. 1. Моделиране по RANS [3]

- **LES (Large Eddy Simulation)** – широко вихрова симулация - компромис между DNS и RANS. Прилага се ниско честотно филтриране за отхвърляне на малките мащаби на решенията, т.е получаване на обща картина на полето без създаване на фини мрежи с цел намаляване на изчислителните операции. Оценката за мащабността се прави според изчислителните ресурси и теориите за турбулентност.
- Хибридни схеми – **RANS** се прилага близо до повърхността и **LES** във вихъра.

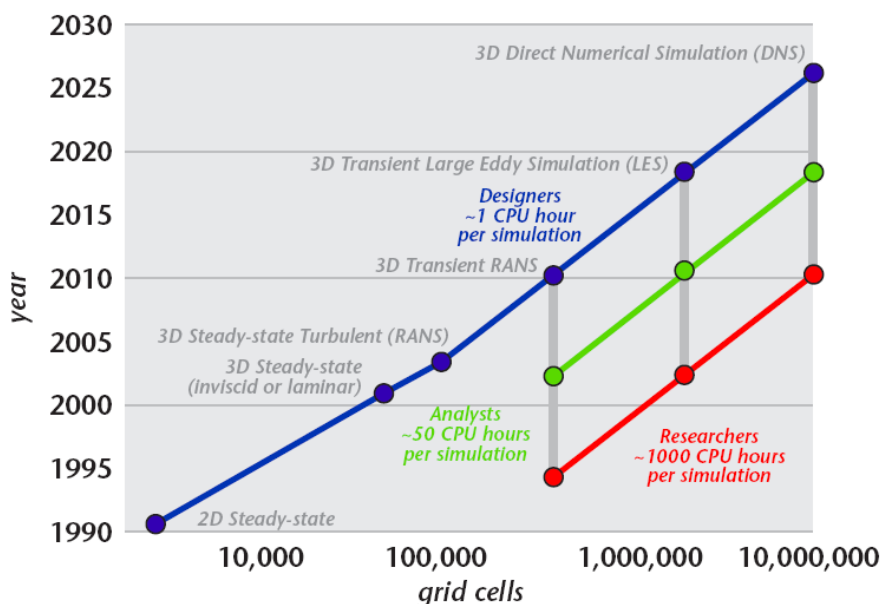


Фиг. 2. Моделиране чрез прилагане на хибридна схема по RANS/LES. [3]



Фиг. 3. Числено моделиран поток на реален автомобил

Резултатите получени чрез числено моделиране много зависят много параметри: от избора на стратегия; мрежа; модела на турбулентност, стъпка на изчисленията и време. Не са достатъчно надеждни и при голяма част от получените резултати се налага сравнение с реално проведени експерименти.



Фиг. 4. Прогноза за необходимия брой на мрежова клетка при различните подходи за моделиране на турбулентността моделиране подходи, според средното време за симулация, показана за дизайнери, анализатори и изследователи [4]

2. Стендови изпитания за аеродинамичност

Основни инструменти за изследване на формата на автомобилите и взаимодействието с въздушния поток, при достатъчно голяма точност и достоверност, са аеродинамичните изпитателни комплекси. Много малко нови коли са разработени без наличието на програма за провеждането на значително количество тестове във въздушен тунел. Има почти толкова много различни въздушни тунелни конфигурации в съществуващите съоръжения и сравнителните тестове на един и същи продукт постоянно показват, значителни разлики в получените данни за изследваните сили и моменти. Въпреки това, повечето производители използват само един или два по-различни аеродинамични тунели спазвайки най-важното условие за повторемост и точни сравнителни измервания, когато се правят аеродинамични

промени. Етапите в процеса на проектиране започват с провеждането на тестове малки макети, обикновено в най-популярния мащаб **1:4**. Използването на малки модели позволява множество характеристики на дизайна да бъдат проверени с минимални разходи и достатъчна точност.

За симулацията на реален поток, трябва да бъде постигната геометрична и динамична прилика. За това е необходимо относителният размер на аеродинамичните сили и моменти, и вискозните сили на потока, да бъде моделиран в правилно съотношение, определено с безразмерен параметър, критерий за геометрично подобие, известен като число на Рейнолдс:

$$R_e = \frac{V \cdot L}{\nu}, \quad (5)$$

Където:

V – скорост на въздушния поток

L – характерен размер на изследвания обект

ν – кинематичния вискозитет

Този критерий на подобие означава, че за получаване на достоверни резултати е необходимо скоростта на въздушния поток да бъде обратно пропорционална на мащаба на модела:

$V \cdot L = R_e \cdot \nu$, т.е ако модела е с **M 1:2**, то за реална скорост **150km/h**, тестовите трябва да се проведат при скорост на потока **300 km/h**, за същото число на **Re**

На практика скоростите, необходими за постигане на точност (използвайки правилното число на Рейнолдс) при малък мащаб на моделите трудно се достигат и затова се правят при по-малките му стойности. Но те са достатъчно високи за да се изследва поведението на граничните слоеве и образуването на турбулентност и да се получи пълна представа за характера на въздушните потоци.

Ограничението за максимална скорост по-скоро идва от изискването за симулация на пътя под натурните модели. За реалното пресъздаване на движението на автомобила е необходимо да се движи не само въздуха, но пътя под автомобила. Използването на по-големите модели позволява достигане на желаните стойности на **Re** и така улеснява моделиране на подробни характеристики с по-голяма точност, но това означава по-големи аеродинамични тунели със съответно по-голяма експлоатация и разходи за изграждане на модела.

2.1. Видове аеродинамични тунели.

Съвременните изследователски комплекси за създаване на въздушни потоци **според провежданите изпитания** и използваните модели могат да бъдат:

- Натурни - аеродинамични тунели за изпитване на реални автотранспортни средства (АТС)
- Моделни – за изпитване на модели в умален мащаб
- Аероклиматични – за създаване на различни климатични условия при изпитване на АТС, отделни възли и агрегати

Обикновено изграждането на такива съоръжения се прилага подхода две в едно, т.е два вида аеродинамични тръби обединени в един комплекс за снижаване на енергийните разходи.

Според циркулацията на въздушния поток:

- Открити(правотокови) или отворени – от атмосферата нагнетения въздушен поток след работната камера се изпуска отново в атмосферата
- Закрити(затворени) – от атмосферата нагнетения въздушен поток се движи непрекъснато по затворен контур.

Според конструкцията на работната камера:

- с отворена работна камера



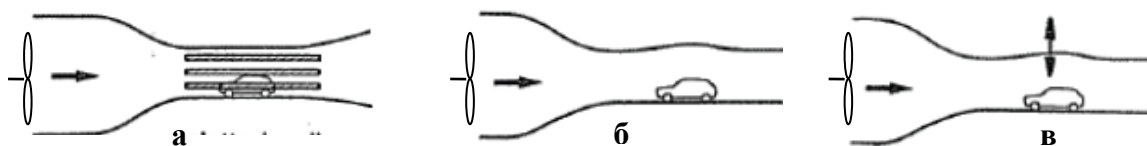
Фиг. 5. Отворена работна камера

- със затворена работна камера



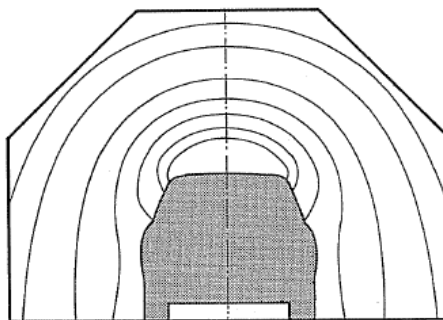
Фиг. 5. Затворена работна камера

- с направляващи ламели и променлива геометрия на стените за запазване на ламинарния характер на въздушния поток



**Фиг. 6. а. Направляващи ламели ; б. С извит таван според слоевете на потока;
в. Адаптивни стени и променлива височина на камерата**

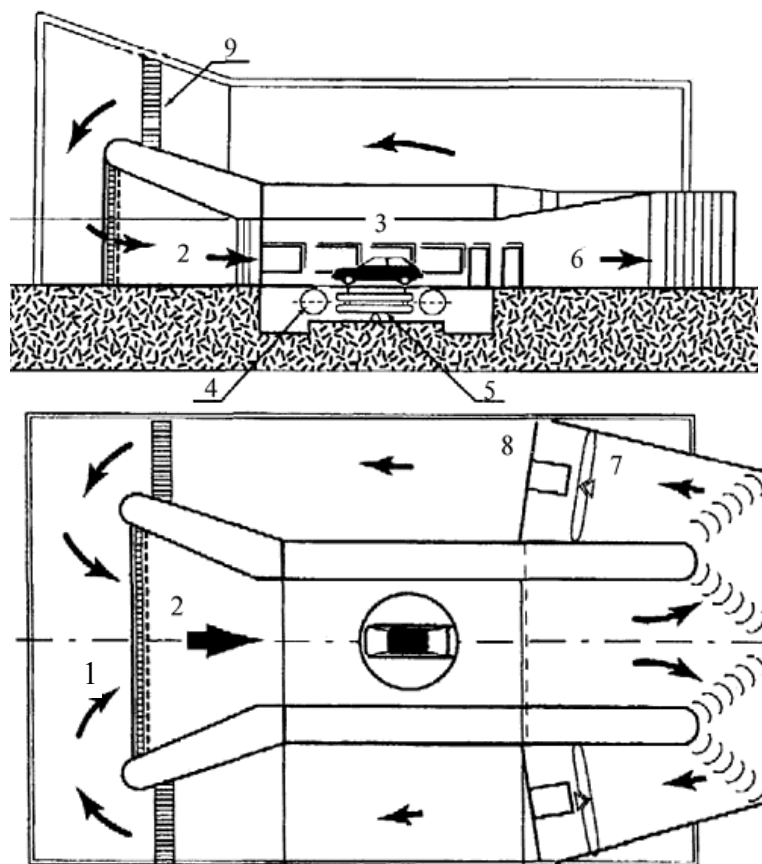
Адаптивните стени позволяват оформяне на сечението на въздушния поток около сечението на автомобила за запазване на ламинарните слоеве и установяване на изобарни условия на експериментите (фиг. 7).



Фиг. 7. Затворена работна камера

Според скоростта на въздушния поток аеродинамичните тунели се разделят на дозвукови; трансзвукови, свръхзвукови и хиперзвукови, но само първите намират

приложение при автомобилната техника. Примерна схема на дозвукова аеродинамична тръба е показана на фиг. 8.

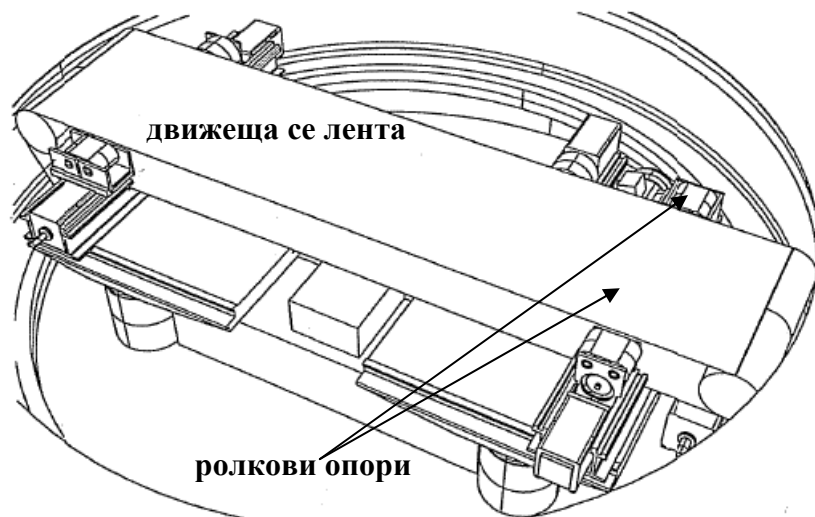


Фиг. 8. Аеродинамичен тунел за дозвукови скорости: ускорителна част - 1; дюза – 2; работна част – 3; опора на ролки -4; аеродинамични везни – 5; централен дифузор -6; странични дифузори - 7, вентилатори – 8 и охлаждащ топлообменник – 9.



Фиг. 9. Работна част на аеродинамичния тунел на аеротехническият институт в г. Сен Сир-Франция [5]

За имитиране на движещ се път с размерите на подповодното пространство, се използват специални гъвкави платформи (лентов подвижен механизъм, фиг.10÷11) в комбинация с ролкови опори за колелата на автомобила. С това се осигурява известно доближаване до истинските условия на движение и получаване на реални резултати.



Фиг. 10. Подвижна платформа



Фиг.11. Работна част на аеродинамичния тунел наBMW с подвижни платформи за всяко колело и една обща под пода на автомобиля, с възможности за $V_{\max} = 300 \text{ km/h}$. [6]

2.2 Видове измервания и дейности, провеждани в аеродинамичен тунел:

- визуализация на потока
- тестове за управление на въздушния поток
- аеродинамични натоварвания
- измерване на налягане
- температурните измервания
- акустични измервания
- вътрешни потоци- циркулация на въздух през пътническия салон

- вътрешни потоци – отопление на пътническия салон и вентилация при движение и при покой
- тестове за охлаждане на двигателя
- въздушен поток за охлаждане на спирачките



Фиг. 12. Аеродинамичния център на BMW на обща стойност около 170 милиона евро[6].

Литература:

1. <http://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/automotive-history-an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-part-1-1899-1939/>
2. А.Н. Евграфов, Аэродинамика автомобиля, МГИУ, Москва, 2010 г.
3. <http://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/automotive-history-hans-ledwinkas-revolutionary-tatras/>
4. <http://www.omniauto.it/foto/popup/200829/mercedes-f-125>
5. В. Маджирски, Хидродинамика, Техника, София, 1979 г.
6. Morel, T.: Aerodynamic drag of bluff body shapes characteristic of hatchback cars. SAE Paper 7802670 (1978)
7. Ahmed, S.R., Ramm, R., Faltin, G.: Some salient features of the time averaged ground vehicle wake. SAE Paper 840300 (1984)
8. G. Dimitriadis, Vehicle Aerodynamics, Lecture, Universite de Liege
9. <http://www.bakker.org/cfm/flowizardturbulence.pdf>
10. <http://www.iat.cnam.fr/competences/automobile/automobile.htm#top>
11. http://www.autoreview.ru/archive/section/detail.php?ELEMENT_ID=66909&SECTION_ID=1882
12. А. Ш. Хусаинов, В. В. Селифонов, Теория автомобиля, Ульяновский государственный технический университет, Кафедра «Автомобили», Конспект лекций, Ульяновск, 2008