

ПРИНЦИПЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ ФОРМ ЭКОМОБИЛЯ ДЛЯ СОРЕВНОВАНИЙ SHELL “ECO-MARATHON”

А.Г. Авершин

Ассистент, аспирант*

Контактный тел.: (057) 707-37-30

E-mail: avershin.andrey@gmail.com

В.Г. Солодов

Доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой*

Контактный тел.: (057) 707-37-30

E-mail: solodov.v@gmail.com

*Кафедра теоретической механики и гидравлики

Харьковский национальный автомобильно-

дорожный университет

ул. Петровского, 25, г. Харьков, Украина, 61002

У статті розглянуто питання аеродинамічного проектування зовнішніх форм екомобілю. Вказано напрями аеродинамічного проектування. Розглянуто приклади можливих компоновальних схем кузова. Зроблено висновки, вказано переваги та недоліки по кожній компоновальній схемі екомобілю

Ключові слова: екомобіль, аеродинаміка, чисельне моделювання

В статье рассмотрены вопросы аэродинамического проектирования внешних форм экомобилей. Указаны направления аэродинамического проектирования. Указаны пути совершенствования формы экомобилей. Сделаны выводы, указаны преимущества и недостатки по каждой компоновочной схеме экомобилей

Ключевые слова: экомобиль, аэродинамика, численное моделирование

In the article the problems of the aerodynamic design of the ecomobile external forms are discussed. The results of research on the basic forms and the ways to improve the ecomobile shape are shown. The conclusions, the advantages and disadvantages of each assembly scheme of the ecomobile are offered

Keywords: aerodynamics, numerical modeling, ecomobile

1. Введение

Ежегодно компания SHELL проводит для студентов и молодых ученых соревнования под названием "Eco-marathon" для специально спроектированных автомобилей. Победителем этих соревнований является команда, автомобиль которой преодолеет 30-ти километровую дистанцию менее чем за час с наименьшими затратами топлива. Автомобили, участвующие в этих соревнованиях, должны обладать высокой энергоэффективностью, минимальными потерями механической энергии при качении колес, в трансмиссии, и минимальным аэродинамическим сопротивлением.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Аэродинамическое сопротивление по данным источников [1,2] может достигать 38% от суммарного

сопротивления движению. Поэтому автомобили, принимающие участие в этих соревнованиях, имеют специальную "обтекаемую" форму (рис. 1).

Задача состоит в проектировании одноместного автомобиля, отвечающего регламентным требованиям соревнований [http://www.shell.com/home/content/ecomarathon/], и компоновочным условиям, для движения на дистанции со средней скоростью не ниже 30 км/ч, и обладающего минимальным аэродинамическим сопротивлением и устойчивостью на трассе.

Аэродинамическое сопротивление является суперпозицией сопротивлений от ряда факторов: формы, поверхностного трения воздуха, выступающих частей, внутренних потоков.

При проектировании кузова автомобиля с минимальным аэродинамическим сопротивлением законы аэродинамики приводят к телам "каплевидной" формы с гладкой поверхностью минимальной площади, а также минимально возможного миделевого сечения. Поверхность кузова не должна содержать выступаю-

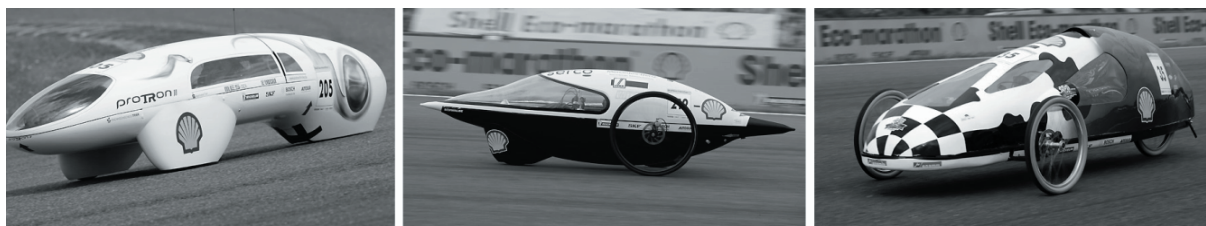


Рис. 1. Некоторые экомобили участников соревнований "Eco-marathon"

щих частей, детали кузова должны стыковаться без зазоров, сопряжения должны выполняться без резких перегибов, колеса и другие "плохо обтекаемые" элементы должны быть укрыты обтекателями. Для исследования аэродинамических характеристик внешних форм используются методы CFD анализа [3].

Этапы проектирования включают создание формообразующего тела, концептуальной модели и образца. Формообразующие тела учитывают условия компоновки оборудования, ходовой части и размещение пилота, требования регламента, и при этих ограничениях определяются в значительной степени эвристически.

На предварительном этапе аэродинамического проектирования внешних форм экомобиля проводится оценка аэродинамических характеристик базовых форм (БФ). Под базовыми формами понимаются поверхности элементарных геометрических тел, которые лежат в основе описания внешней оболочки экомобиля. Аэродинамические исследования базовых форм позволяют определить аэродинамические характеристики формообразующего тела кузова, абстрагируясь от влияния особенностей внешней формы конкретного экомобиля.

3. Исследования формообразующих тел

Для исследования характеристик формообразующего тела с учетом регламентных и компоновочных требований выбраны базовые формы: полуэллипсоид и эллипсоид с соотношениями $b/h=5$ и $a/h=0.5$ (рис. 2).

Исследования выполнялись авторами на основе численного моделирования на стационарном режиме с помощью программного комплекса MTF5® [4]. При разработке вычислительной модели вначале создавалась твердотельная модель кузова, которая затем погружалась в расчетную область. Расчетная область описывалась гексаэдральной сеткой мощностью от 10 - 15 млн. узлов со сгущениями вблизи твердых поверхностей для описания пограничного слоя. Интегрирование полных осредненных уравнений Навье-Стокса осуществлялось разностной схемой 2-го порядка точности на основе TVD аппроксимации при замыкании одно- или двухпараметрической моделью турбулентности [6].

Атмосферная среда описывалась моделью совершенного газа. В численных экспериментах использовались следующие начальные и граничные условия: скорость набегающего потока воздуха была направлена вдоль продольной оси автомобиля, составляла $V_\infty = 30$ км/ч. На поверхности дороги и боковых стенках области ставились условия симметрии потока при стандартном атмосферном давлении P_∞ ; в модели экомобиля не учитывалось вращение колес. Вне

расчетной области предполагалось невозмущенное течение.

Ниже обсуждаются результаты расчетов обтекания вариантов базовых форм в зависимости от расстояния до экрана (рис. 2):

- расчет базовой формы БФ I; - расчет БФ I с отсеченной задней частью на расстоянии 1/5 длины;
- расчет базовой формы БФ II; - расчет БФ II с отсеченной задней частью на расстоянии 1/5 длины;
- расчет БФ II с обтекателями колес.

Исследования выполнялись при числе Рейнольдса около $Re = 1.6e + 06$. По результатам расчетов анализировались аэродинамические коэффициенты подъемной силы C_y и сопротивления формы C_x , которые вычислялись отношением сил к произведению площади миделевого сечения и динамического напора на бесконечности.

Данные расчетов представлены на рис. 3-5.

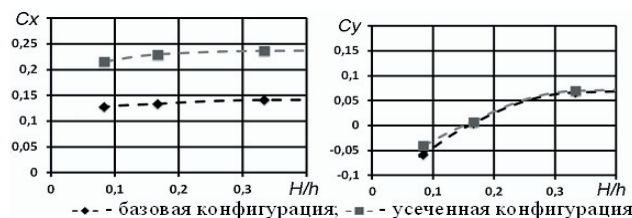


Рис. 3. Аэродинамические характеристики трехмерного расчета БФ-I в исходной и усеченной конфигурации в зависимости от расстояния до экрана

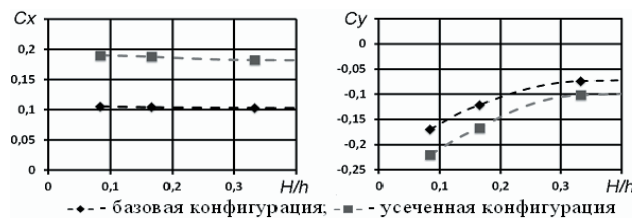


Рис. 4. Аэродинамические характеристики трехмерного расчета БФ-II в исходной и усеченной конфигурации в зависимости от расстояния до экрана

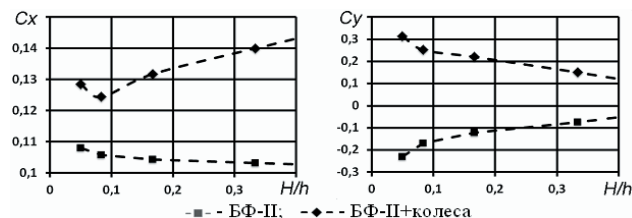


Рис. 5. Аэродинамические характеристики трехмерного расчета БФ-II в исходной конфигурации и совместно с обтекателями в зависимости от расстояния до экрана

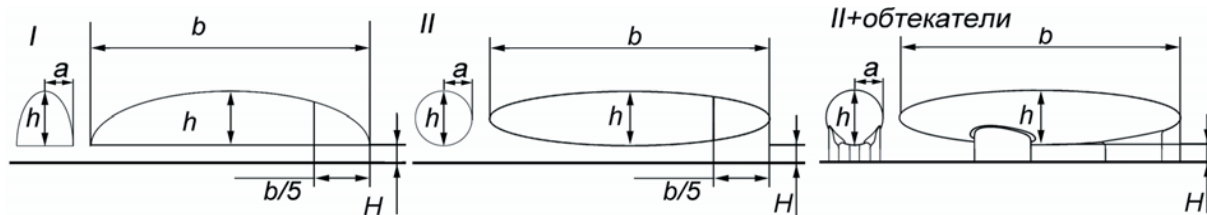


Рис. 2. Варианты базовых форм

По данным серии расчетов можно отметить, что 1) для симметричного тела (БФ-II) аэродинамическое сопротивление слабо зависит от расстояния до экрана; 2) усеченное тело обнаруживает незначительное влияние экрана; 3) обтекатели колес оказывают заметное влияние на аэродинамическое сопротивление тела (рис. 5). При небольших расстояниях до экрана вертикальная сила являлась прижимающей, особенно для БФ-II.

4. Численный эксперимент на концептуальных моделях

Следующий этап проектирования заключался в разработке концептуальной модели экомобиля на основе полученных результатов по формообразующим телам и существующим аналогам, и определения их аэродинамических характеристик.

Анализ конструкций кузовов автомобилей, принимавших участие в соревнованиях в разные годы, позволяет условно разделить их на четыре типа (рис. 6).

I. Колесная формула «2+1»; все колеса находятся внутри кузова.

II. Колесная формула «2+1»; передние колеса вынесены за пределы кузова, спрятаны в обтекателях, либо открыты.

III. Колесная формула «1+2»; все колеса находятся внутри кузова.

IV. Колесная формула «1+2»; переднее колесо расположено внутри кузова, задние колеса вынесены за пределы, находятся в обтекателях, либо открыты.

Поиск рационального аэродинамического решения проводится на основе гипотезы о суперпозиции влияния таких основных факторов как: аэродинамическое сопротивление базового тела, минимизация вертикальной силы, минимизация воздействия боковой ветровой нагрузки, интерференция кузова и колесных обтекателей.

При этом компоновочные решения, принимаемые конструктором к совершенствованию, определяются совокупностью факторов, в том числе экономическим обоснованием проекта, и не всегда являются наилучшими с точки зрения аэродинамики.

Минимизация сопротивления кузова приводит к базовой форме, напоминающей крыловую профиль.

Соотношение кривизны верхней и нижней частей в комбинации с экраным эффектом должно обеспечивать отсутствие прижимающей силы, как фактора увеличения силы трения качения.

Для этого нужно искать оптимальное сочетание двух факторов – формы и экранного эффекта дорожного полотна.

После процедуры поиска необходимо проверять полученную концептуальную модель на воздействие бокового ветра. При этом существенную роль играет знание розы ветров местности вблизи места проведения соревнований и учет трехмерности обтекания.

На основании численных экспериментов получены аэродинамические характеристики концептуальных моделей, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициент сопротивления формы концептуальных моделей

	I	II	III	IV
C _x	0.105	0.134	0.118	0.13

На основании расчетных данных и компоновочных соображений можно сделать выводы о преимуществах и недостатках представленных концептуальных моделей:

I-й тип конструкции. Преимущества: низкое аэродинамическое сопротивление, удобная компоновка для расположения пилота, двигателя и др. элементов конструкции. Недостатки: сложная схема управления и привода на заднее колесо.

II-й тип конструкции. Преимущества: высокая устойчивость экомобиля с подобной компоновкой колес (2+1).

Недостатки: высокое аэродинамическое сопротивление из-за интерференции обтекателей передних колес и кузова экомобиля.

III-й тип конструкции. Преимущества: большой объем внутреннего пространства для расположения

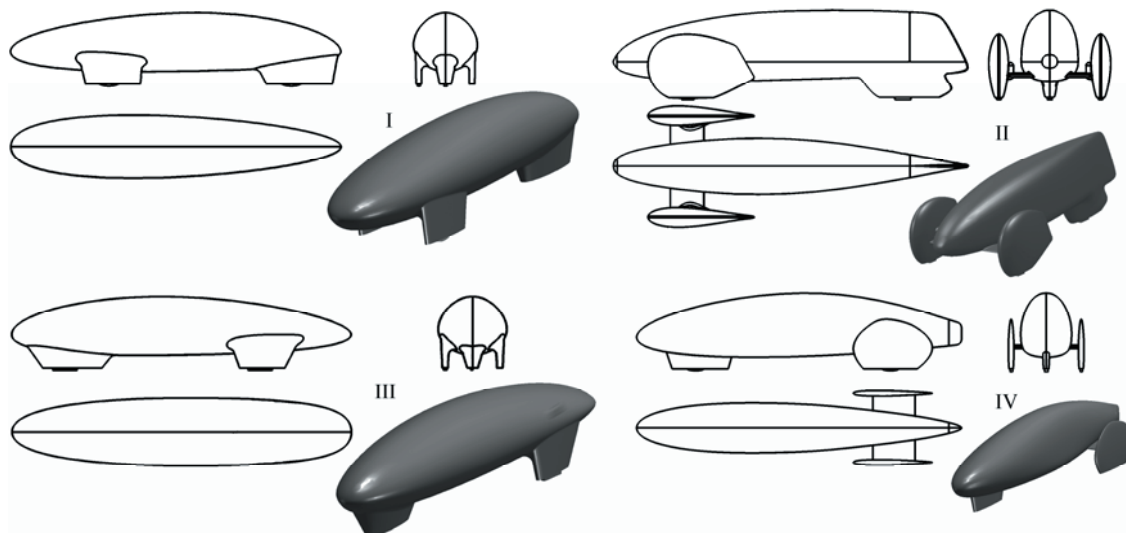


Рис. 6. Типы компоновочных схем кузова экомобиля для соревнований «Eco-marathon»

пилота, двигателя и других элементов конструкции. Недостатки: увеличенный мидель по сравнению с другими вариантами; высокое аэродинамическое сопротивление; низкая устойчивость экомобиля с подобной компоновкой колес (1+2).

IV-й тип конструкции. Преимущества: хорошая компоновка для размещения пилота, двигателя и др. элементов конструкции; простая конструкция управления задними колесами. Недостатки: увеличенное (по сравнению с 1-й схемой) аэродинамическое сопротивление; низкая устойчивость экомобиля с данной компоновкой колес (1+2).

5. Влияние бокового ветра на внешнюю аэродинамику концептуальной модели

При аэродинамическом проектировании внешних форм автомобиля обычно обращают внимание на уменьшение силы сопротивления при перемещении кузова в неподвижной атмосфере. Расчеты и эксперименты по учету влияния несимметричной ветровой нагрузки обычно не проводятся. Для проектирования типовых автомобилей такой подход обоснован, так как автомобили движутся со скоростями, заметно превышающими скорость ветра. Поэтому боковые аэродинамические силы обычно учитываются только при определении устойчивости автомобиля на дорожном полотне (см. например [1]).

Специальные мероприятия по снижению боковых аэродинамических сил не применяются. В автоспорте на боковые аэродинамические силы обращают большое внимание, т.к. движение гоночного автомобиля происходит на пределе возможностей сцепления колеса и дороги. Для соревнований «Shell Eco-Marathon», где экомобили соревнуются в топливной эффективности и движутся на низких скоростях, учет влияния боковых аэродинамических сил особо важен, ибо от тактики поведения на трассе и от учета боковых сил во многом зависит результат.

Ниже обсуждается влияние бокового ветра на несимметричное обтекание внешней оболочки экомобиля.

Для исследования выбрано три варианта форм экомобиля, представленных на рис. 7.

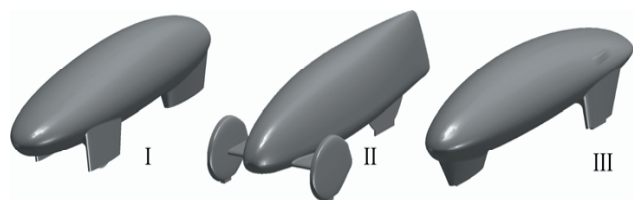


Рис. 7. Варианты внешних форм экомобиля

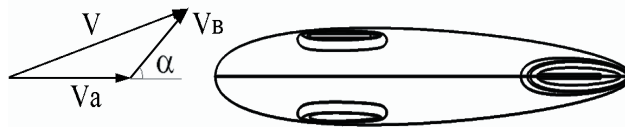


Рис. 8. Угол атаки при несимметричном обтекании

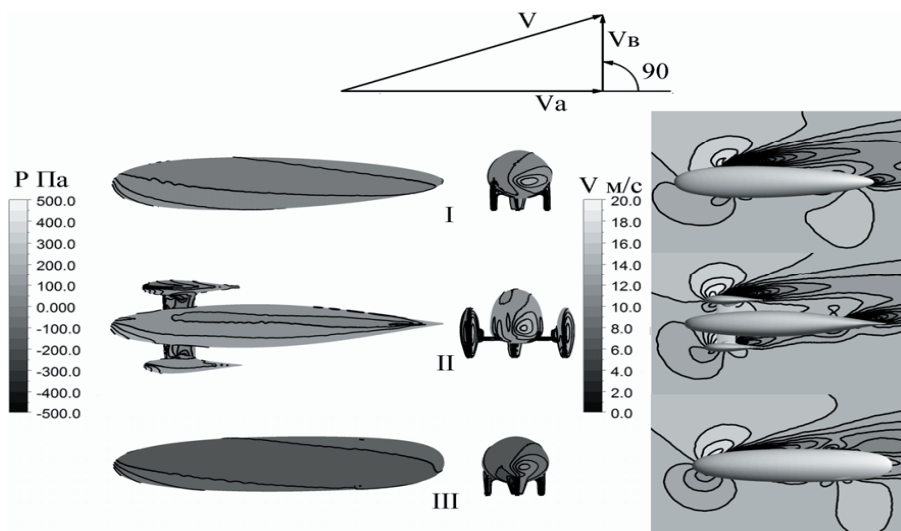


Рис. 9. Поля давлений на поверхности моделей; поля скоростей в плоскости дороги при ветровой нагрузке, перпендикулярной курсу и скорости движения $V_0=30$ км/час

В численных экспериментах использовалась модель, построенная на условии обращения движения; при этом скорость набегающего потока воздуха (рис. 8) задавалась на основе теоремы сложения скоростей абсолютного движения

$$\vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{V}_в$$

Исследовалось влияние бокового ветра в диапазоне углов $0 \le \alpha \le 180^\circ$. Некоторые результаты исследования представлены на рис. 9, 10.

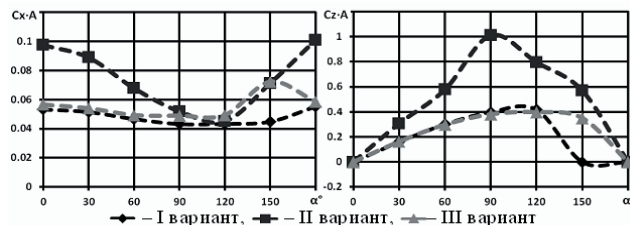


Рис. 10. Аэродинамические характеристики экомобиля вдоль и перпендикулярно автомобилю при различных углах атаки бокового ветра

Выводы

В работе рассмотрены принципы аэродинамического проектирования внешних форм автомобиля для участия в соревнованиях SHELL "Eco-marathon". На основе обзора литературы и численного эксперимента предложены рациональные формы и концептуальные модели для таких гонок.

Определены коэффициенты аэродинамического сопротивления при различных углах атаки.

Показано, что боковой ветер оказывает существенное влияние на аэродинамические характеристики автомобиля.

С применением полученных аэродинамических характеристик можно прогнозировать тактику во время соревнований с учетом погодных условий.

На основе выполненного исследования с учетом регламентных и компоновочных требований, технико-экономических условий в качестве натурального образца выбрана концептуальная модель П, которая приняла участие в соревнованиях 2010 года. Команда ХНАДУ, в которой принимал участие первый автор данной работы, успешно выступила в соревнованиях и установила рекорд Украины.

Литература

1. Katz, Joseph. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed [Текст] / Joseph Katz. – 1995. – 224р. – ISBN 0-8376-0142-8.
2. Santin, J.J. The world's most fuel efficient vehicle: design and development of PAC-Car II [Текст] / J.J. Santin, C.H. Onder, J. Bernard, D. Isler. – 2007. – 326р. – ISBN 978-3-7281-3134-8.
3. Авершин, А.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических характеристик гоночного автомобиля ХАДИ-31 [Текст] / А.Г. Авершин, В.Г. Солодов // Автомобильный транспорт. Сб. науч. тр. – Х., ХНАДУ. – 2004. – вып.16. – С.228-231.
4. Научно-прикладной программный комплекс MTFPS® для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы. Сертификат гос. регистр авт. прав, УГААСП, №5921, Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В., опубл. 07.16.2002 Бюл. № 32. – 3 с.
5. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. – М., Наука, 1974. – 712 с.
6. Солодов, В.Г. Моделирование турбулентности. Расчет больших вихрей [Текст] / В.Г. Солодов. Х., ХНАДУ. – 2011. – 168 с. – ISBN5-8360-0243-6.

Розглядаються недоліки сучасної теорії повітряно-реактивних двигунів, пов'язаних з помилковою теоремою про підйомну силу профілю, що продувається, виведеної професором Н. Е. Жуковським в 1912р.

Ключові слова: кінематичний аналіз, тяга профілю, що продувається, підйомна сила

Рассматриваются недостатки современной теории воздушно-реактивных двигателей, связанные с ошибочной теоремой о подъемной силе продуваемого профиля, выведенной профессором Н.Е.Жуковским в 1912г.

Ключевые слова: кинематический анализ, тяга продуваемого профиля, подъемная сила

The drawbacks of modern theory of air-jet engines are considered, which are connected with a mistaken theorem of rising force of blowing profile, calculated by professor N.J.Gukovsky in 1912 year

Keywords: blowing profile, kinematical analysis, the thrust of blowing profile, rising force

УДК 629.7.036.001

ГЛАВА 6. ОСНОВЫ ЕДИНОЙ ТЕОРИИ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПОТОКАХ. ВЫВОД ФОРМУЛЫ ТЯГИ

Б.М. Мамедов

Кандидат технических наук, доцент
Запорожский национальный технический
университет
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье,
Украина, 69063

1. Введение. Постановка проблемы

Известно, что в основу современной теории воздушно-реактивных двигателей заложены ошибочные формулы тяги, полетного (тягового) КПД, выведенные академиком Б.С.Стечкиным в 1929г., и такая же ошибочная теорема о подъемной силе продуваемого профиля, выведенная профессором Н.Е.Жуковским в 1912г. [1], с.3-5. все это привело к тому, что современная теория

воздушно-реактивных двигателей разделилась на две части: теоретическую и экспериментальную, которые существуют абсолютно автономно и любые попытки авторов соединить эти две части заканчивались тем, что многие узловые физические явления, имеющие место в воздушно-реактивных двигателях, описывались ошибочно, например, такое физическое понятие как F_n , тяга двигателя, полетный (тяговый) КПД, подъемная сила продуваемого профиля, трактовка про-