

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА

АЛЕКСЕЙ ОСИПОВИЧ
НИКИТИН

к 100-летию со дня рождения

Исследования по аэродинамике

и

экономичности машин

(1934 год)



IM WERDEN VERLAG
МОСКВА - AUGSBURG 2003

© Алексей Осипович Никитин, 1934
© «Im-Werden-Verlag», 2002

<http://www.imwerden.de>
info@imwerden.de

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО АЭРОДИНАМИКЕ И ЭКОНОМИЧНОСТИ МАШИН

1. ОБТЕКАЕМОСТЬ И ЭКОНОМИЧНОСТЬ АВТОМОБИЛЯ

Развитие и улучшение автомобильных дорог, повышение максимальной скорости автомобиля и необходимость экономии горючего заставили существенным образом изменить внешнюю форму автомобиля.

Прогресс в этой области продолжается: конструкторская мысль много работает над улучшением конструкции, изыскивая и новые формы. Если на данном этапе развития нашего автомобилестроения и при современном состоянии дорог мы еще копируем лучшие американские образцы, то уже в самое ближайшее время мы должны будем создать собственные конструкции, более приспособленные к нашим требованиям. В частности, с развитием сети специальных автомобильных дорог нам понадобятся быстроходные машины, аэродинамические качества которых будут играть не последнюю роль.

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ АЭРОДИНАМИКИ

Уменьшение сопротивлений, возникающих при работе той или иной машины, повседневная задача технической мысли. Движению автомобиля - одной из наиболее сложных современных машин препятствуют различные сопротивления, в балансе которых заметное место занимает аэродинамическое сопротивление. По подсчетам английского инж. Барнея США ежегодно теряет до 500 млн. долл. только потому, что автомобильные заводы не уделяют достаточного внимания обтекаемости и придерживаются старых конструкций кузовов. Однако прежде чем говорить о современных конструкциях кузовов и тех изменениях шасси, которые вызваны применением этих кузовов, рассмотрим основные принципы аэродинамики и экспериментальные данные по обтекаемости, полученные различными исследователями.

Основных положений аэродинамики три:

1. Сопротивление движению прямо пропорционально плотности среды, т. е. P_w пропорционально ρ , где P_w — сопротивление в кГс,

$$\rho = \frac{v}{g} = \frac{\text{кГс} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4}$$

— плотность в технической системе мер, — удельный вес в кГс/м³ и g — ускорение силы тяжести в м/сек².

2. Сопротивление пропорционально площади миделя, равной площади проекции тела на плоскость, перпендикулярную движению, или, как говорят, пропорционально лобовой площади автомобиля, т. е.

P_w пропорционально F .

3. Сопротивление пропорционально квадрату скорости движения:

P_w пропорционально V^2 .

Эти положения были выведены Ньютоном и справедливы для скоростей от нескольких м/сек до скорости звука. В эти пределы укладываются все скорости, которых можно практически достигнуть при современных средствах передвижения. Как известно, скорость звука равняется 330 м/сек, а быстроходные гоночные автомобили развивают скорость 130 м/сек.

Правда, сопротивление воздуха на столь больших скоростях не определялось, и возможно, что при таких скоростях сопротивление будет возрастать не пропорционально квадрату скорости, а несколько быстрее.

Объединяя все три положения и вводя коэффициент пропорциональности K , можно написать равенство:

$$P_w = k \cdot \rho \cdot F \cdot V^2 \quad (1.1)$$

Коэффициент k , называемый коэффициентом сопротивления воздуха, зависит главным образом от формы тела, его положения относительно потока воздуха, от характера и состояния поверхности тела, точнее — от степени ее шероховатости (или гладкости), и отчасти зависит от размеров тела.

Коэффициент k — отвлеченное число, что можно установить, проверив размерность:

$$P_w \text{ (кГс)} = k \cdot \rho \cdot F \cdot V^2 \text{ (кГс} \cdot \text{сек}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}^2 / \text{м}^4 \cdot \text{сек}^2 \text{)} \quad (1.2)$$

Первые два множителя правой части равенства часто объединяют в один, и тогда формула принимает вид, обычно применяемый в автомобильной литературе:

$$P_w = K \cdot F \cdot V^2$$

При этом коэффициент K , также называемый коэффициентом аэродинамического сопротивления, уже не будет отвлеченным числом, поскольку он включает в себя в качестве составляющей массовую плотность воздуха, и размерность его будет

$$\text{КГс} \cdot \text{сек}^2 / \text{м}^4$$

Так как плотность воздуха изменяется в зависимости от температуры и барометрического давления, то оценка, результатов испытаний должна производиться при одинаковых условиях, т.е. приведенных к температуре 15°C и давлению 735 мм ртутного столба. Выводя закон сопротивления среды, Ньютон исходил из положения, что тело вследствие своего движения сообщает некоторую скорость частицам среды, преодолевая силы ее инерции. Сопротивление среды равно сумме этих сил инерции.

Сопротивление среды является следствием трех факторов:

1. Давления встречных частиц воздуха; это сопротивление изменяется пропорционально квадрату скорости.

2. Трения потока воздуха о поверхность автомобиля в тех случаях, когда этот поток параллелен какой-либо части автомобиля.

3. Понижению давления позади кузова; это разрежение изменяется пропорционально квадрату скорости.

3. ВЛИЯНИЕ ОБТЕКАЕМОСТИ КУЗОВА НА ЭКОНОМИКУ АВТОМОБИЛЯ ФОРД-А

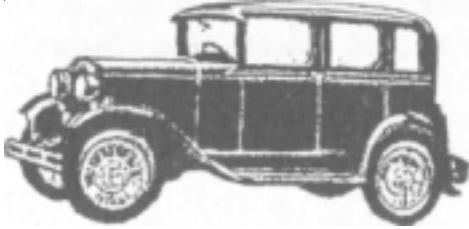


Рис. 1.1.
Нормальный автомобиль Форд А



Рис. 1.2.
Модель обтекаемого автомобиля

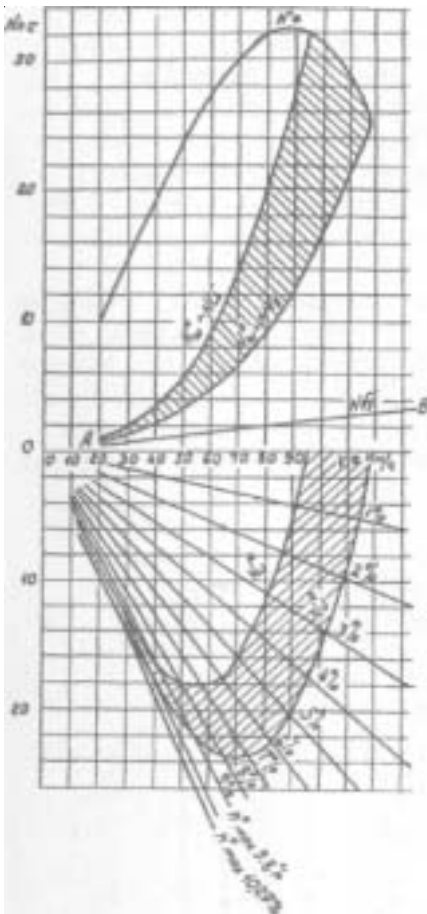


Рис. 1.3.
Рабочий баланс автомобиля Форд А
с обтекаемым и нормальным
кузовами

Чтобы лучше представить, какие изменения в динамику и экономику автомобиля вносит обтекаемый кузов, разберем их на конкретном примере. Возьмем машину Форд А (рис. 1.1), причем сопротивление воздуха для Форд А обтекаемой формы типа Jagay примем в 2,5 раза меньше, чем для нормального. При изготовлении модели обтекаемого кузова, изображенного на рис. 1.2, шасси было оставлено без изменения. Ниже мы приводим основные данные для Форд А:

G_a — вес автомобиля с нагрузкой — 1215 кгс;

G_{a1} — вес, приходящийся на переднюю ось — 450 кгс;

G_{a2} — вес, приходящийся на заднюю ось — 765 кгс;

F_n — лобовая площадь автомобиля с нормальным кузовом — 2,3 м²;

F_0 — лобовая площадь автомобиля с обтекаемым кузовом,

немного меньшая лобовой площади нормального автомобиля; для наших расчетов мы считаем их равными, т. е. — 2,3 м²;

k — коэффициент сопротивления воздуха для автомобиля с нормальным кузовом — 0,397;

k — то же самое с обтекаемым кузовом — 0,1588; кгс сек²

ρ — плотность воздуха — 0,131 кгс сек²/м⁴.

На рис. 1.3 приведены данные о мощностях на задних колесах для Форд А, полученные на станке Ридлер в лаборатории испытания автомобилей бывшего Автотракторного института.

Прямая АВ, проведенная из начала координат в верхней половине графика, представляет мощность, идущую на преодоление сопротивления качению передних колес. Эта мощность определяется по формуле:

$$N_{п} = \frac{G_a \cdot f \cdot V_a}{270} \quad (1.3)$$

где f — коэффициент сопротивления качению, V_a — скорость движения автомобиля в км/ч. Кривая $N_w^H + N_{п}$ — мощность, идущая на преодоление сопротивления воздуха и сопротивления качению передних колес для автомобиля с нормальным кузовом.

Мощность, идущая на преодоление сопротивления воздуха, подсчитывается по следующей формуле:

$$N_w^H = \frac{k \cdot \rho \cdot F \cdot V_a^3}{3,6^2 \cdot 75} \quad (1.4)$$

Кривая $N_w^0 + N_{\Pi}$ на рис. 1.3 и есть аналогичная кривая для автомобиля с обтекаемым кузовом.

Заштрихованная область между кривыми $N_w^H + N_{\Pi}$ и $N_w^0 + N_{\Pi}$ есть избыток мощности, получаемый за счет лучшей обтекаемости кузова.

Запас мощности N_{Π}^0 для автомобиля с обтекаемым кузовом значительно возрастает. В особенности повышаются динамические качества на больших скоростях. Так, максимальный запас мощности в случае обтекаемого кузова соответствует более высокой скорости, а именно: для автомобиля с нормальным кузовом $N_{\Pi \max} = 18,4$ л. с. при $V_a = 55$ км/ч, а для автомобиля с обтекаемым кузовом $N_{\Pi \max} = 23,8$ л. с. при $V_a = 70$ км/ч. Таким образом, повышение запаса мощности при этом 29,3%. На малых скоростях, как и следовало ожидать, динамические качества за счет обтекаемости повышаются мало. Так, максимальный подъем для автомобиля с нормальным кузовом будет $h = 9,8$ % при $V_a = 19$ км/ч, а обтекаемого $h = 10,27$ % при $V_a = 26$ км/ч.

Обтекаемость кузова более резко сказывается на повышении динамических качеств при больших скоростях. Так, максимальная скорость, которую может развить автомобиль на ровном участке пути, для нормального кузова $V_a = 95$ км/ч, а для обтекаемого $V_a = 118$ км/ч, т. е. на 24,2 % выше.

При движении на подъемах преимущества обтекаемого кузова снижаются, что видно из табл. 1.1 и рис. 1.4.

Таблица 1 . 1

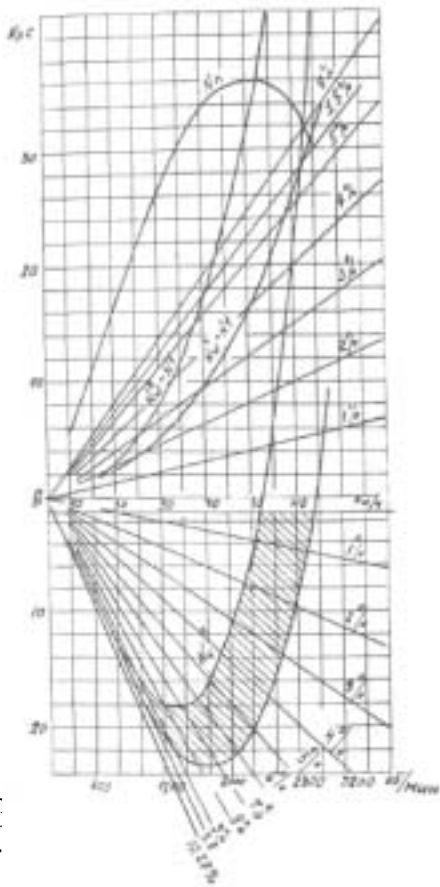
Экономия мощности за счет обтекаемости в автомобиле
Форд А при различных подъемах

Подъем

В %	V_a^H	V_a^0	$\frac{\Delta V}{V_a^H} \cdot 100\%$	$N_w^H + N_f + N_h$ при V_a^H	$N_w + N_f + N_h$ при V_a^H	$E = \frac{\Delta N \cdot 100\%}{N_w^H + N_f + N_h}$
0	95	118	24,2	36,1	18	50,1
1	90,5	113	24,9	35,9	20,4	43,2
2	86	108	25,6	35,5	22,5	36,6
3	81	102	25,9	34,8	23,9	31,3
4	76	96	26,3	34,1	25,1	26,5
5	70,6	89,2	26,4	32,9	25,4	22,8
6	65	82	26,2	31,3	25,7	17,8

При построении графика, изображенного на рис. 1.4, мощность, теряемая на преодоление подъемов, подсчитывалась по формуле:

(1.5)



$$N_h = \frac{G_a \cdot t}{270}$$

Рис. 1.4.

Рабочий баланс автомобиля Форд А с обтекаемым и нормальным кузовами при движении под углом и в гору

где G_a — вес автомобиля в кгс,

h — подъем в %,

V_a — скорость автомобиля в км/ч.

На рис. 1.4 мощность, расходуемая на преодоление различных подъемов, отложена в нижней части графика в виде прямых линий, идущих из начала координат. Мощность, сообщаемая автомобилю за счет уклона, подсчитывалась по аналогичной формуле и откладывалась в верхней части графика.

Максимальная скорость при движении автомобиля на подъем определялась по пересечению линии мощности, идущей на преодоление подъема, и запаса мощности автомобиля.

Численные значения максимальных скоростей и потребной мощности при различных подъемах приведены в табл. 1.1. где:

$V_{a \max}^H$ — максимальная скорость автомобиля с нормальным кузовом при различных подъемах;

$V_{a \max}^0$ — то же для автомобиля с обтекаемым кузовом;

$$\frac{\Delta V}{\Delta V_{a \max}} = \frac{V_{a \max}^0 - V_{a \max}^H}{V_{a \max}^H}$$

— увеличение скорости за счет обтекаемости;

$N_w^H + N_f + N_h$ — при $V_{a \max}^H$ — суммарная потеря мощности, идущей на преодоление сопротивления воздуха, сопротивления качению и подъема для автомобиля с нормальным кузовом;

$N_w^0 + N_f + N_h$ — при $V_{a \max}^H$ — то же для автомобиля с обтекаемым кузовом;

$$E = \frac{\Delta N}{N_w^H + N_f + N_h} = \frac{(N_w^H + N_f + N_h) - (N_w^0 + N_f + N_h)}{N_w^H + N_f + N_h}$$

— экономия мощности в процентах за счет обтекаемости при различных процентах подъема и при $V_{a \max}^H$.

Помимо повышения динамических качеств автомобиля, обтекаемость кузова дает значительную экономию топлива. На рис. 1.5 представлена экономическая характеристика Форд А — расход топлива на 100 км в зависимости от скорости и характера дороги, выраженного здесь в процентах подъема. На больших скоростях экономия топлива достигает 40 % и даже при четырехпроцентном подъеме на скорости $V = 60$ км/ч экономия составляет 15 %. При дорогах с профилем, характерным для Московской области, расход топлива, по данным

автомобильной лаборатории Автотракторного института, обычно совпадает с кривой расхода, соответствующей двухпроцентному подъему, т. е. для скорости движения в 80 км/ч экономия составит 26,4 %, Скорость в 80 км/ч на наших шоссейных дорогах возможна, так что экономия в 25 % вполне реальна. С увеличением пробега машин по шоссейным дорогам и улучшением самих шоссе экономия в 25 % составит довольно крупную сумму, даже если учесть только одни легковые машины. Кроме того, существенна экономия самого горючего.

Не менее важное влияние, чем подъемы и спуски, оказывает на динамику и экономику автомобиля ветер. Для выяснения влияния ветров различного направления и силы на динамику и экономику автомобиля разберем ряд примеров движения того же легкового Форда с нормальным и обтекаемым кузовами по дороге с коэффициентом сопротивления качению $f = 0,015$ при скорости ветра $w = \pm 20$ км/ч и ± 30 км/ч.

Скорость ветра 20-30 км/ч часто наблюдается даже в Московской области, не говоря уже о степных районах Союза, где ветры более сильны и устойчивы. Знак плюс относится к встречному ветру, знак минус — к попутному.

Мощность, затраченная на преодоление сопротивления движению, подсчитывается по формуле:

$$N_{\text{сопр}} = \frac{G_a \cdot (f \pm h) V_a}{270} = \frac{k \cdot \rho \cdot F (V_a \pm w)^2 \cdot V_a}{3,6^3 \cdot 75} \quad (1.6)$$

Эта формула (1.6) не учитывает следующего факта. При определении сопротивления воздуха в случае отсутствия ветра по формуле:

$$N_w = \frac{k \cdot \rho \cdot F \cdot V_a^3}{3,6^3 \cdot 75}$$

— коэффициент сопротивления k соответствует условию, когда воздух не перемещается относительно дороги. При наличии ветра воздух имеет это движение. При отсутствии трения о дорогу сила сопротивления воздуха была бы совершенно такой же, как если бы автомобиль двигался со скоростью, равной скорости автомобиля плюс скорость ветра. Скорость потока воздуха различна по высоте потока и постепенно уменьшается по мере приближения к полотну дороги. Для различных типов кузовов влияние дороги сказывается по-разному. Для машин, у которых в результате влияния дороги появляется вертикальная сила, прижимающая к дороге (случай отрицательного подъема), скорость воздуха под автомобилем больше, чем над ним. Пониженная скорость ветра непосредственно над полотном дороги, по сравнению со скоростью воздуха над машиной, уменьшает силу отрицательного подъема, т. е. выравнивает скорости воздуха над автомобилем и под ним, снижая тем самым общее сопротивление воздуха.

Для машин с положительным подъемом в результате влияния дороги наблюдается обратное явление.

Разобранной вопрос имеет чисто теоретическое значение. Практически же, принимая во внимание небольшую высоту слоя воздуха, перемещающегося непосредственно над полотном дороги с пониженной скоростью, влиянием этого фактора можно пренебречь и пользоваться формулой (1.6) как вполне отвечающей действительным условиям. При помощи формулы (1.6)

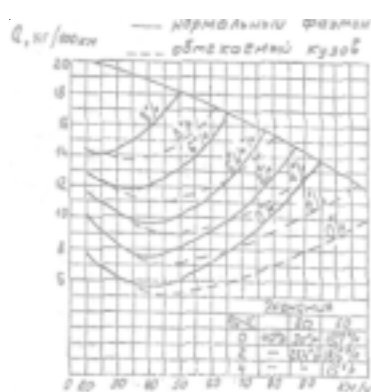


Рис. 1.5.
Экономическая характеристика
автомобиля Форд А

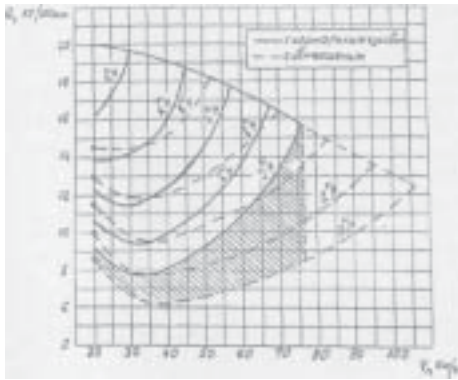


Рис. 1.6.
Экономическая характеристика
автомобиля Форд А при
встречном ветре в 30 км/ч

подсчитаны сопротивления движению $N_w + N_f$ и запас мощности N_u при различных скоростях встречного ветра.

Для автомобиля с нормальным кузовом расход топлива на 100 км пути после определенного минимума обычно резко возрастает с увеличением скорости, т. е. пределы скорости, соответствующей экономической работе, очень ограничены. У автомобиля с обтекаемым кузовом условия более благоприятны. Расход топлива с повышением скорости движения увеличивается не так резко, как у автомобиля с нормальным кузовом. Таким образом пределы скорости, соответствующей экономичной работе, здесь значительно шире. Вообще экономичными мы считаем скорости, при которых расход топлива не превышает 15 % сверх минимума, соответствующего данному профилю дороги. При ровной дороге экономичны скорости от 25 до 65 км/ч для

автомобиля с обтекаемым кузовом и от 21,5 до 47,5 км/ч для автомобиля с нормальным кузовом.

Влияние экономичности автомобиля Форд А при движении с встречным ветром можно проследить из графика (рис. 1.6).

В случае попутного ветра преимущества обтекаемого кузова сказываются в меньшей степени. В табл. 1.2 даны соотношения максимального запаса мощности для обеих моделей.

Таблица 1.2

Запас мощности для автомобилей с нормальным и обтекаемым кузовами при отсутствии ветра и попутном ветре

w, км/ч	$N_{u \max}^H$	$N_{u \max}^0$	A, %
0	18,6	28,8	29,3
30	25	27,4	9,6
в %	40,8	15,1	

Остается разобрать еще вопрос о влиянии бокового ветра. Ему часто не придают никакого значения, считая, что боковой ветер, дующий перпендикулярно к направлению движения автомобиля, не создает никакого аэродинамического эффекта, вызывая лишь небольшое увеличение сопротивления качению за счет боковой деформации шин.

Рис. 1.6.

Экономическая характеристика автомобиля Форд А при встречном ветре в 30 км/ч

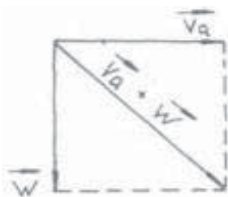


Рис. 1.7.
Влияние бокового ветра на
скорость обдува автомобиля

Представим себе автомобиль,двигающийся с определенной скоростью и обдуваемый ветром сбоку под углом в 90° . Если пренебречь влиянием дороги (трением воздуха о дорогу), то условия езды будут такими же, как если бы автомобиль обдувался воздухом под некоторым углом со скоростью, равной геометрической сумме скоростей встречного потока воздуха и ветра (рис. 1.7).

Разберем пример. Автомобиль движется со скоростью $V_a = 30$ км/ч и на него сбоку дует ветер под углом 90° тоже со скоростью 30 км/ч.

Складывая скорости встречного и бокового ветра V_a и w , получим

$$R = \sqrt{V_a^2 + w^2} = \sqrt{30^2 + 30^2} = 42,5 \text{ км/ч}$$

При лобовой площади автомобиля $F = 2,3 \text{ м}^2$ и коэффициенте сопротивления $k = 0,397$, сопротивление воздуха при отсутствии бокового ветра равно $8,35 \text{ кГс}$.

Если бы площадь F сечения автомобиля, перпендикулярного результирующему вектору:

$$\vec{R} = \vec{V} + \vec{w},$$

была тоже $2,3 \text{ м}^2$ и коэффициент сопротивления воздуха k при обдуве автомобиля сбоку также $0,397$, то сопротивление боковому обдуву составило бы $16,7 \text{ кГс}$.

Раскладывая это сопротивление на два направления — направление ветра и направление движения, получим:

$$P_w^w = P_w = P_w^R \cdot \cos 45^\circ = 11,82 \text{ кГс},$$

где P_w^w — составляющая сопротивления воздуха, перпендикулярная направлению движения, и P_w — составляющая сопротивления воздуха по направлению движения.

Сопротивление, которое приходится преодолевать при движении в случае бокового ветра, оказывается больше, чем без этого ветра, — соответственно $11,82$ и $8,35 \text{ кГс}$. Как в действительности протекает явление — сказать очень трудно. Если еще можно подсчитать площадь сечения автомобиля, перпендикулярную результирующему вектору, т. е. еще больше увеличить силу P_w^w и, следовательно, составляющую в направлении движения P_w , то характер изменения коэффициента k с изменением угла обдува можно определить только экспериментальным путем.

Можно было бы принять, что коэффициент k при боковом обдуве будет значительно больше, чем при лобовом, т. е. составляющая сопротивления воздуха по оси автомобиля еще возрастет. На самом же деле исследования влияния бокового ветра на сопротивление воздуха дают совсем неожиданные и даже парадоксальные результаты.

При установке на шасси Форд А обтекаемого кузова динамические и экономические качества машины, как видим, значительно изменяются. Максимальная скорость, которую может развить автомобиль, по нашим подсчетам равнялась 118 км/ч , двигатель при этом развивает 3180 об/мин . На такое число оборотов двигатель не рассчитан, а поэтому было бы желательно уменьшить число оборотов, не уменьшая максимальной скорости в 118 км/ч .

Есть две возможности: во-первых, смонтировать шины большего размера и, во-вторых, изменить передаточное число в главной передаче.

На рис.1.8 приведены две характеристики: при нормальной передаче в заднем мосту $i_0 = 3,77$ и при уменьшенной — $i_0 = 3,1$. Беря передаточное число $i_0 = 3,1$, мы не рассматриваем вопроса о возможности выполнения именно такой передачи, а исходим исключительно из кинематики механизма, т. е. подбираем такую передачу, чтобы при движении автомобиля с обтекаемым кузовом со

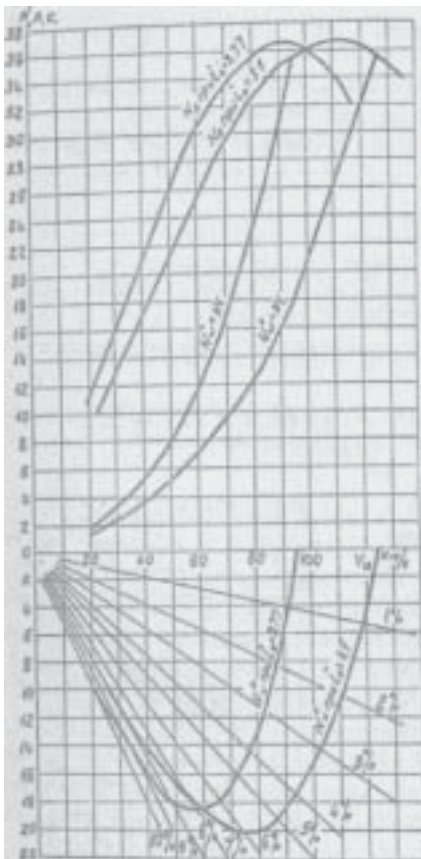


Рис. 1.8. Рабочий баланс автомобиля Форд А с главной передачей $i_0 = 3,77$ и $i_0 = 3,1$

скоростью $V_a = 118$ км/ч двигатель делал такое же число оборотов, как и при $V_a = 95$ км/ч в автомобиле с нормальным кузовом. При передаче $i_o = 3,1$ на скорости 118 км/ч двигатель будет развивать 2620 об/мин. Если сравнить расход топлива на 100 км, то при передаче $i_o = 3,1$ для автомобиля с обтекаемым кузовом он будет меньше, чем при передаче $i_o = 3,77$, и, следовательно, экономия за счет обтекаемости кузова увеличится (табл.1.3).

Таблица 1.3

Экономия топлива в % за счет обтекаемости при передаче в заднем мосту $i_o = 3,77$ и $i_o = 3,1$

i	V, км/ч		
	90	80	60
3,77	40,0	30,0	19,7
3,10	46,7	37,0	21,7

Уменьшение передаточного числа в главной передаче понижает динамические качества автомобиля с обтекаемым кузовом, улучшает экономику и снижает обороты двигателя на больших скоростях до нормальных.

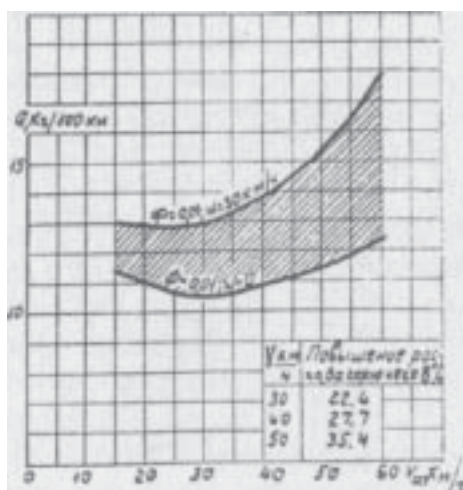


Рис. 1.9
Влияние встречного ветра на расход топлива для грузового автомобиля Форд АА

Попутно отметим и влияние ветра на экономику грузовых автомобилей. Обычно при оценке экономических качеств автомобиля рассматривается влияние на расход топлива профиля пути от суммарного сопротивления движению. Ветру не придают никакого значения, как будто он не может влиять на экономику машины. На рис. 1.9 приведен расход топлива на 100 км пути для грузового автомобиля Форд АА. При отсутствии ветра и при встречном ветре в 30 км/ч коэффициент сопротивления дороги $= 0,01$.

Повышение расхода топлива в среднем на 30% при нормальных скоростях движения является довольно значительным. С таким увеличением в расходе горючего эксплуатационным хозяйствам нужно считаться, и в особенности при таких работах, как перевозка зерна, когда маршруты исчисляются десятками, а то и сотнями километров.

В условиях Советского Союза, с его равнинной местностью и с развитием в самое ближайшее время сети шоссейных дорог и междугородного пассажирского автосообщения, вопрос об обтекаемости автомобиля становится вопросом довольно крупной экономии. Если она и не достигнет тех больших размеров, какие подсчитаны Барнеем для США, то во всяком случае она достаточно значительна, чтобы вплотную заняться проблемой обтекаемости.