

Тема 1.2

Силы

сопротивления

движению



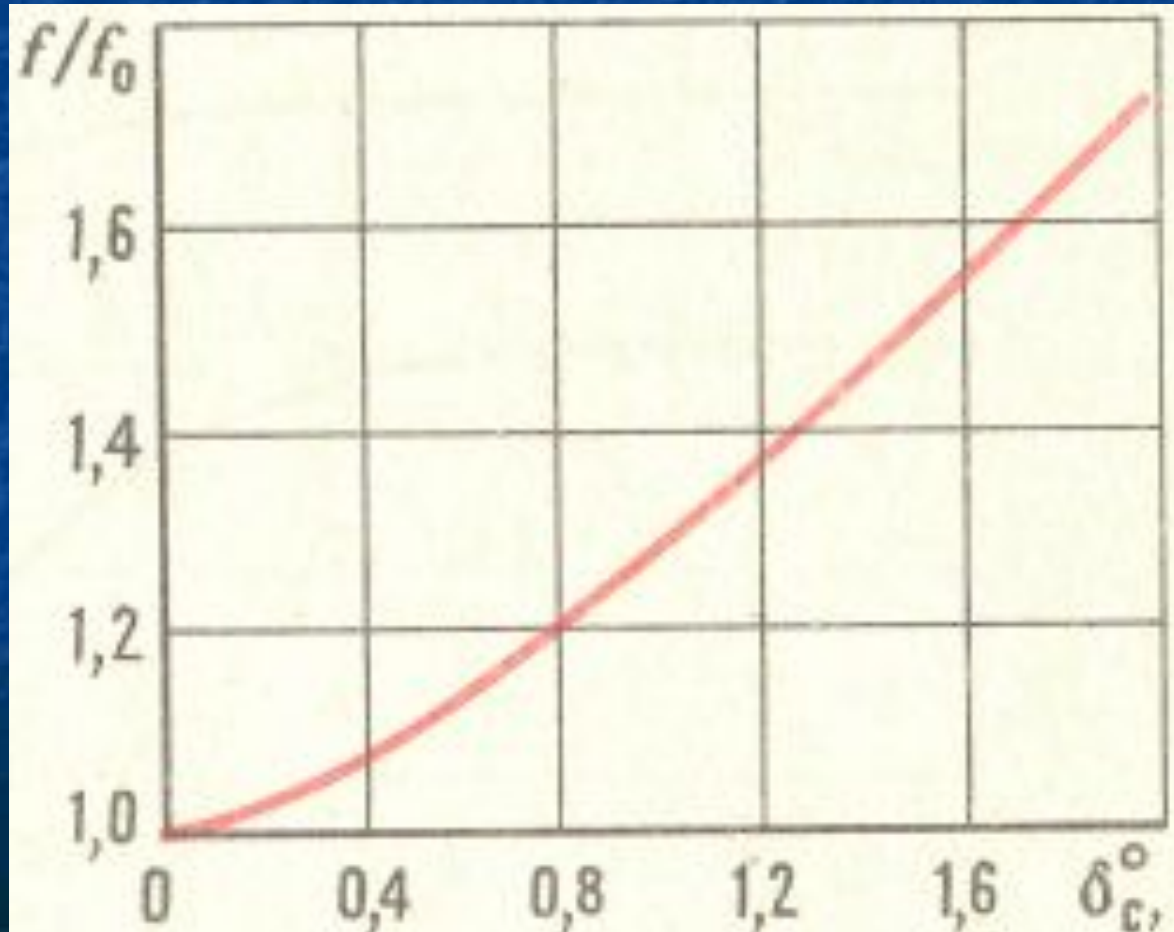
Для анализа процесса движения автомобиля, действующие силы делят на движущие, направление которых совпадает с направлением вектора скорости центра масс, и силы сопротивления, направление которых противоположно этому вектору.

Условно к движущим силам относят **полную окружную силу** или **полную тяговую силу**. В дальнейшем будем движущей считать полную тяговую силу. Все остальные силы, действующие на автомобиль, считают силами сопротивления. У ведущих колес по движению направлена продольная реакция дороги R_x , эту силу можно представить в виде трех составляющих, одна из которых P_m - положительна, вторая $R_z f_c$ - отрицательна, а знак последней зависит от знака j . Считают, что обе составляющие (кроме P_m) являются силами сопротивления.

Сила сопротивления качению R_k . Сумма направленных против движения автомобиля продольных реакций дороги, к которым, прежде всего, относят силовые составляющие $R_z f_c$ сопротивления качения каждого из колес, определяет R_k . Кроме этих сил, со стороны дороги на автомобиль могут действовать и другие силы. Прежде всего, это приведенные к колесам силы, возникающие в результате потерь энергии при колебательных деформациях шины и колебаниях колес относительно кузова в результате взаимодействия колес с неровностями опорной поверхности. На различных отрезках пути эти дополнительные силы различны по величине и направлению, но в среднем они всегда приводят к увеличению потерь, что может быть учтено соответствующим увеличением коэффициента f .

Можно считать, что при средних скоростях движения на изношенном асфальтовом шоссе коэффициент f в результате действия этих факторов возрастает на 5...10%, на ровном булыжнике на 30...50%, на хорошей грунтовой дороге на 10...30%.

Дополнительные силы сопротивления движению, связанные с взаимодействием колес и опорной поверхности, возникают также в тех случаях, когда на колеса действуют боковые силы. При прямолинейном движении автомобиля и отсутствия внешних боковых сил, дополнительные силы сопротивления могут быть обусловлены схождением колес



С учетом перечисленных выше факторов условную силу сопротивления качению можно представить так:

$$P_{\kappa} = \sum_{i=1}^{i=n} (R_{zi} f_i),$$

где n — число колес, R_{zi} — нормальная реакция опорной поверхности i -го колеса, f_i — коэффициент сопротивления качению i -го колеса с учетом дополнительных сил сопротивления.

Коэффициенты сопротивления качению различны у разных колес. Для удобства расчета реальные значения коэффициентов сопротивления каждого из колес заменяют осредненными $P_{\kappa} = f_a \sum R_{zi}$ (f_a — осредненный коэффициент сопротивления качению с учетом дополнительных сил сопротивления движению), считая их одинаковыми для каждого из колес. Если автомобиль движется по плоской поверхности дороги, то $\sum R_{zi} = G_a \cos \alpha$, при этом $P_{\kappa} = f_a G_a \cos \alpha$.

Сила сопротивления подъему P_n - Составляющая силы тяжести является ее проекцией на направление вектора скорости центра масс автомобиля.

$$P_n = G_a \sin \alpha$$

При небольших углах α синус может быть заменен тангенсом. И тогда сила сопротивления подъему равна

$$P_n = G_a i$$

Сила сопротивления дороги P_d . Эта сила определяется суммой сил сопротивления качению и сопротивлению подъему.

$$P_d = G_a (f_a \cos \alpha + \sin \alpha) \approx G_a (f_a + i) = G_a \psi.$$

Сумму $f_a \cos \alpha + \sin \alpha = \psi \approx f_a + i$ называют **суммарным коэффициентом сопротивления дороги**.

Сила сопротивления воздуха R_w .

R_w называют полной аэродинамической силой

$$R_w = c_w F q.$$

где c_w — безразмерный коэффициент полной аэродинамической силы; F — площадь Миделя, м².

$q = 0,5 \rho_v V_w^2$ — **скоростной напор**, кг/(м·с²), равный кинетической энергии кубического метра воздуха, движущегося со скоростью V_w движения автомобиля относительно воздушной среды (ρ_v — плотность воздуха, кг/м³);

Момент M_w называют **полным аэродинамическим моментом**

$$M_w = m_w F q b,$$

где m_w — безразмерный коэффициент аэродинамического момента; b — характерный линейный размер по ширине (обычно принимают равным колее B), м.

Проекция R силы R_w на ось Ox – **сила сопротивления воздуха** (сила лобового сопротивления).

$$R_x = 0,5 c_x \rho F V_w^2.$$

Формулы для определения проекций силы R_w на оси Oy и Oz отличаются только коэффициентами c . Для проекции R_{wy} (**боковая аэродинамическая сила**) вместо c_x используют коэффициент c_y , для проекции R_{wz} (**подъемная сила**) — коэффициент c_z . Проекцию $M_{wx}^{wz} = 0,5 m_x \rho F V_w^2$ момента M_{wx} называют **моментом крена**. Формулы для определения аэродинамических моментов относительно осей Oy и Oz отличаются только коэффициентами m : m_y для **опрокидывающего момента** M_{wy} , m_z — для **поворачивающего момента** M_{wz} . Коэффициенты $c_x, c_y, c_z, m_x, m_y, m_z$ — определяют опытным путем при продувке моделей автомобилей (реже автомобилей в натуральную величину) в аэродинамических трубах. Их значения при таком способе определения получаются несколько заниженными, особенно при испытании моделей.

Сопротивление формы (50...60% P_e) обусловлено разностью между повышенным фронтальным давлением, возникающим перед автомобилем и пониженным давлением, вызванным завихрениями позади него.

Внутреннее сопротивление. (10...15% P_e), создаваемое потоками воздуха, проходящими внутри автомобиля для вентиляции или обогрева кузова, а также охлаждения двигателя.

Сопротивление поверхностного трения (5...10% P_e), вызываемое силами вязкости пограничного слоя воздуха, движущегося у поверхности автомобиля, и зависящее от размера и шероховатости этой поверхности.

Индуктируемое сопротивление (5...10% P_e), вызываемое взаимодействием сил, действующих в направлении продольной оси автомобиля (подъемной) и перпендикулярно этой оси (боковой).

Дополнительное сопротивление (15% P_e), создаваемое различными выступающими частями: фарами, указателями поворота, ручками, номерными знаками.

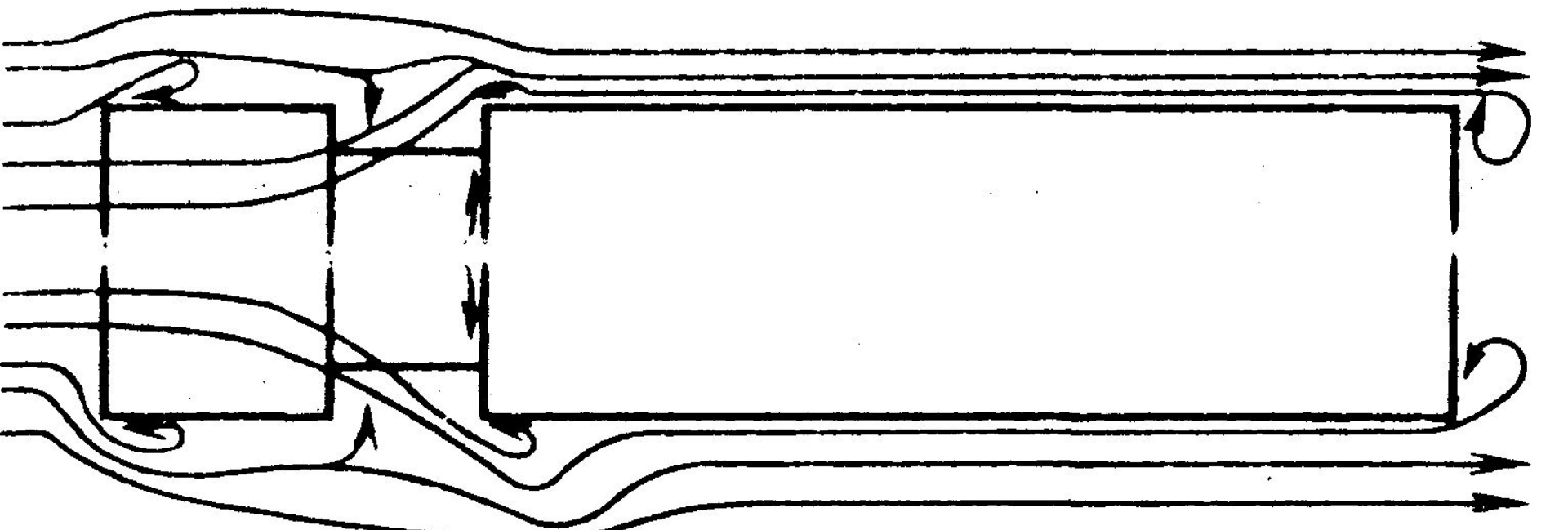
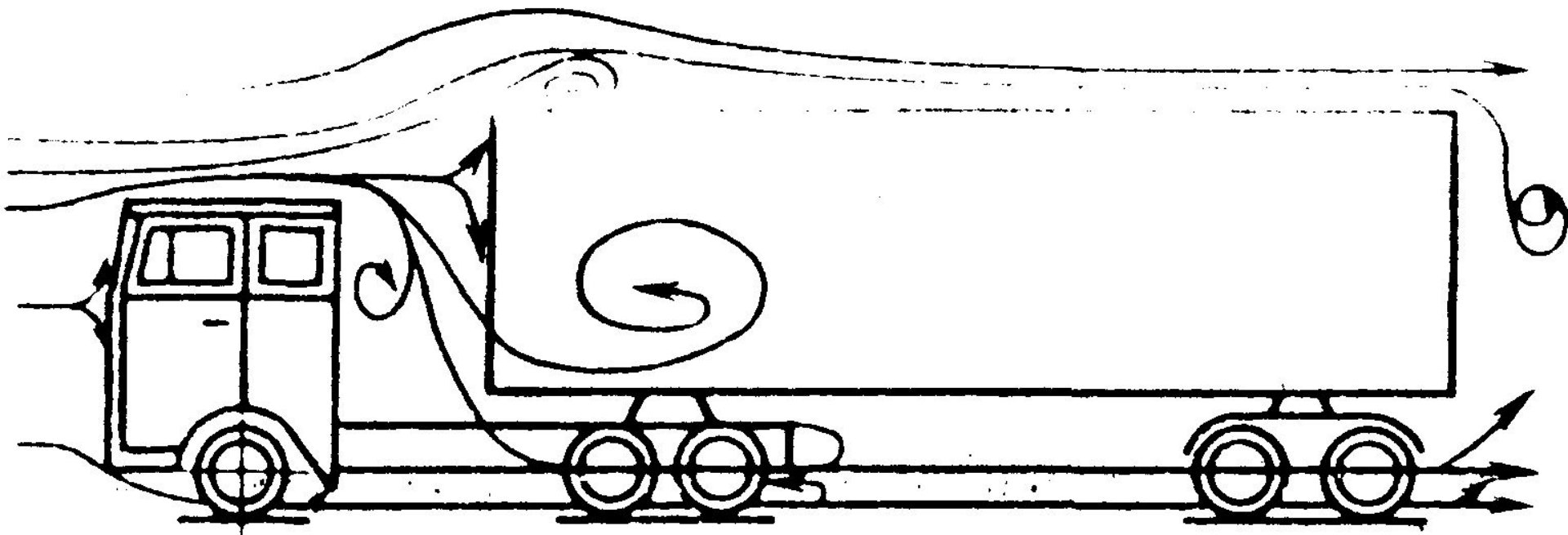
На коэффициент c_x оказывают влияние различные мелкие изменения формы. При открытых окнах c_x увеличивается приблизительно на 5%, на столько же увеличивают сопротивление воздуха открытые фары. Использование небольших пластин, укрепленных на кузове так, что они препятствуют срыву воздушной струи, позволяет уменьшить c_x на 5...15 %.

Приняв $\rho_v = const$ (согласно ГОСТ 4401—81, на уровне моря $\rho_v = 1,225 \text{ кг/м}^3$), можно коэффициент $0,5c_x\rho_v = k_v$ считать зависящим только от формы кузова. Этот коэффициент называют **коэффициентом обтекаемости**. k_v эквивалентен силе сопротивления воздуха действующей на 1 м^2 площади автомобиля при относительной скорости 1 м/с . Между коэффициентами c_x и k_v существует численная зависимость $k_v = 0,61 c_x$.

Коэффициент k_v по определению имеет размерность плотности, в системе СИ его размерность кг/м^3 или Н/м^2 .

Приближенные значения k_v и c_x для различных типов автомобилей

	c_x	k_v
Легковые автомобили	0,3...0,6	0,2...0,35
Автобусы:		
капотной компоновки	0,75...0,9	0,45...0,55
вагонной компоновки	0,6...0,75	0,35...0,45
Грузовые автомобили:		
Бортовые	0,9...1,15	0,5...0,7
с кузовом фургон	0,8...1,0	0,5...0,6
Автоцистерны	0,9...1,1	0,55...0,65
Автопоезда	1,4...1,55	0,85...0,95
Гоночные автомобили	0,25...0,3	0,15...0,2



При движении автомобиля в неподвижной воздушной среде относительная скорость воздуха $V_w = V$

$$P_{\epsilon} = k_{\epsilon} F V^2$$

Произведение $k_{\epsilon} F$ называют *фактором обтекаемости*.

Приблизительно площадь лобового сопротивления грузовых автомобилей $F = B H_2$, легковых автомобилей $F_{\text{лег}} = 0,8 B_2 H_2$ (где B_2 — колея, м; H_2 — габаритная высота, м; B_2 — габаритная ширина автомобиля, м) <http://auto.mail.ru/news?id=15462>

При наличии ветра относительная скорость V_w равна геометрической сумме скоростей V автомобиля и V_{ϵ} ветра

$$V_w = \sqrt{V^2 + V_B^2 + 2VV_B \cos \beta_B},$$

где β_{ϵ} - угол между направлением ветра V_{ϵ} и продольной осью автомобиля

1.6. Уравнение движения автомобиля

Для составления уравнения поступательного движения автопоезда с любым числом звеньев при принятых выше допущениях, его можно условно заменить двухосным автомобилем массой m_a , равной сумме масс всех звеньев. При движении по плоской поверхности можно записать

$$m_a j = R_{x1} + R_{x2} - P_n - P_v.$$

Для автомобиля с одним задним ведущим мостом

$$m_a j = P_m - R_{z2} f_{c2} - J_{k2} j / (r_k r_d) - J_M u^2 / m \eta_m j / (r_k r_d) - R_{z1} f_{c1} - J_{k1} j / (r_k r_d) - P_n - P_v$$

Решая это уравнение относительно P_m , после преобразований получим *уравнение силового баланса*

$$P_m = P_n + P_k + P_v + P_u = P_d + P_v + P_u,$$

где $P_n = G_a \sin \alpha = G_a i$ — сила сопротивления подъему, $P_k = f_c (R_{z1} + R_{z2})$ — сила сопротивления качению, $P_u = m_a \delta_{вр} j$ — сила сопротивления разгону (приведенная сила инерции).

Коэффициент учета вращающихся масс

$$\delta_{вр} = 1 + (J_m u_m^2 \eta_m + \Sigma J_k) / (m_a r_k r_d),$$

где $\Sigma J_k = J_{k1} + J_{k2}$ - суммарный момент инерции колес

Коэффициент $\delta_{вр}$ показывает, во сколько раз сила, необходимая для разгона с заданным ускорением j поступательно движущихся и вращающихся масс автомобиля, больше силы, необходимой для разгона только его поступательно движущихся масс.

можно записать так

$$\delta_{вр} = 1 + \delta_{1в} u_k^2 + \delta_{2в},$$

где $\delta_{1в} = J_m u_m^2 \eta_m / (m_a r_k r_d)$; $\delta_{2в} = \Sigma J_k / (m_a r_k r_d)$.

Для одиночных автомобилей при их номинальной нагрузке можно считать $\delta_{1в} = \delta_{2в} = 0,04$

Если m_x — масса автомобиля с нагрузкой, отличающейся от номинальной, а m_a — с номинальной нагрузкой, то $\delta_{1в}$ и $\delta_{2в}$ увеличиваются в отношении m_a / m_x . Для автопоезда массой m_a и числом колес $z_{ка}$ при массе автомобиля-тягача m_m и числе его колес $z_{км}$

$$\delta_{1в} = 0,04 m_m / m_a; \delta_{2в} = 0,04 m_m z_{ка} / (m_a z_{км}).$$

Уравнение мощностного баланса автомобиля

$$N_m = (N_n + N_k + N_v + N_u) r_{\delta} / r_k = (N_{\delta} + N_v + N_u) r_{\delta} / r_k,$$

$$P_m V / 1000 = M_k u_m \eta_m V / (1000 r_{\delta}) = M_k \omega_e \eta_m r_k / (1000 r_{\delta}) = N_e \eta_m r_k / r_{\delta} = N_m r_k / r_{\delta},$$

где $N_m = N_e \eta_m$ — тяговая мощность;

$N_n = P_n V / 1000 = G_a \sin \alpha V / 1000 \approx G_a i V / 1000$ — мощность, затрачиваемая на преодоление подъема;

$N_k = P_k V / 1000 = G_a f_a \cos \alpha V / 1000 \approx G_a f_a V / 1000$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению;

$N_v = P_v V / 1000 = k_v F V^3 / 1000$ - мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха;

$N_u = P_u V / 1000 = m_a \delta_{вр} V j / 1000$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления разгону;

$N_{\delta} = N_k + N_n = G_a \psi V / 1000$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления дороги.

Тема 1.2

Силы

сопротивления

движению

