

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
ХАРЬКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Asп. ГРЕДЕСКУЛ А. Б.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ НА ПОДЪЕМАХ И СПУСКАХ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
проф. Е. И. МИЛОСЛАВСКИЙ

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ
ХАРЬКОВ 1950

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ХАРЬКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

Асп. ГРЕДЕСКУЛ А. Б.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ
АВТОМОБИЛЯ НА ПОДЪЕМАХ
И СПУСКАХ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
проф. Е. И. МИЛОСЛАВСКИЙ

ГРЕДЕСКУЛ
1950

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

ХАРЬКОВ

1950

I. Значение исследования движения автомобиля на подъёмах и спусках и методика исследования

В числе других факторов, определяющих производительность и себестоимость автомобильных перевозок, большое значение имеют скорость движения автомобиля и расход топлива. В свою очередь, скорость и расход топлива зависят от конкретных условий взаимодействия автомобиля и дороги, которые можно рассматривать:

- а) с точки зрения динамики автомобиля,
- б) с точки зрения безопасности движения,
- в) с точки зрения уменьшения расхода топлива при движении.

Научное рассмотрение в указанных направлениях вопросов взаимодействия автомобиля и дороги является задачей теории автомобиля. Анализ развития и состояния этой науки в СССР и в капиталистических странах позволяют с полным основанием утверждать, что теория автомобиля создана силами советских ученых.

Условия взаимодействия автомобиля и дороги определяются различными факторами, из которых существенное значение имеет продольный профиль дороги, как сочетание прямолинейных участков с различными уклонами (подъёмы и спуски), сопряженных вертикальными кривыми. В настоящем исследовании рассматривается влияние элементов продольного профиля дороги—подъёмов и спусков—на скорость движения автомобиля и расход топлива. Комплексное исследование этого вопроса до настоящего времени не получало освещения в специальной литературе и поэтому представляет значительный интерес. Исследование должно дать материал для тяговых расчетов движения автомобилей, для инструктирования водителей по режиму движения и для проектирования автомобильных дорог.

Большая часть величин, определяющих взаимодействие автомобиля и дороги, изменяется в очень широких пределах, что усложняет изучение вопроса. В связи с этим в данном исследовании приняты следующие допущения:

- а) движение автомобиля рассматривается при постоянном открытии дроссельной заслонки — полном или частичном;
 б) подъём и спуск рассматриваются на прямолинейных в плане участках дороги;
 в) уклон на подъёме (спуске) не изменяет своей величины по длине участка;
 г) влияние поперечного профиля дороги не принимается во внимание;

д) коэффициент сопротивления качению f и коэффициент сцепления φ остаются постоянными по длине участка;

В исследовании поставлены и разрешены такие конкретные вопросы:

1. Получены и проанализированы аналитические зависимости для основных элементов движения на подъёмах и спусках — путь, время, скорость.

2. Рассмотрены особенности неустановившегося движения на подъёмах и спусках, особенно при низком коэффициенте сцепления.

3. Исследована устойчивость автомобиля при движении на подъёмах и спусках.

4. Разработаны рекомендации по режиму движения автомобиля на подъёмах и спусках — переход на низшие передачи на подъёмах, переход на свободное качение на спусках, ограничение скорости на спусках.

5. Рассмотрены особенности движения автомобиля на затяжных подъёмах и спусках.

При этом подвергся анализу ряд общих вопросов движения автомобиля в порядке уточнения тех основных положений теории автомобиля, на основе которых производится исследование. Изменение скорости и расхода топлива при движении на подъёмах и спусках исследовано экспериментально для подтверждения выводов, полученных в теоретическом исследовании.

II. Интегрирование дифференциального уравнения движения

Взаимная зависимость величин пути, времени и скорости при движении автомобиля на подъёмах и спусках может быть получена интегрированием дифференциального уравнения движения.

$$\frac{G_a}{g} \delta \frac{dV}{dt} = P_k - \Sigma P_c \quad (7) *$$

где: $\frac{G_a}{g}$ — масса автомобиля

*) NN формул те же, что и в диссертации.

δ — коэффициент, учитывающий влияние врачающихся масс,

$\frac{dv}{dt}$ — ускорение автомобиля в направлении движения,

P_k — тяговое усилие на ведущих колесах при установившемся движении,

ΣP_c — сумма сил сопротивления движению.

Характер изменения величины P_k при переменном значении скорости движения зависит от протекания кривой крутящего момента двигателя в функции числа оборотов его коленчатого вала (если не изменяется передаточное число силовой передачи).

В реальных условиях движения автомобиля скорость его обычно выше критической скорости ($V_{\text{крит.}}$) и ниже максимальной скорости (V_{\max}) для данного положения дросселя. Критическая скорость соответствует числу оборотов при максимальном крутящем моменте для того же открытия дроссельной заслонки. Как показало исследование, для постоянного открытия дросселя в указанных пределах скоростей можно с незначительной погрешностью ($\pm 2 - 2,5\%$) принять:

$$M_e = A_1 - B_1 n^2 \quad (14)$$

Методика интегрирования дифференциального уравнения движения, предложенная в настоящем исследовании и приведенная ниже, основана на допущении, что зависимость крутящего момента двигателя от числа оборотов коленчатого вала имеет вид уравнения (14). Исходя из этого уравнения получим:

$$P_k = A_2 - B_2 V^2 \quad (15)$$

Последний член в правой части дифференциального уравнения (7) — сумма сил сопротивления движению — в общем случае также может быть выражен, как функция скорости движения.

$$\Sigma P_c = A_3 - B_3 V^2 \quad (16)$$

При этом дифференциальное уравнение получает вид:

$$P_k - \Sigma P_c = A - BV^2 \quad (a)$$

$$\frac{G_a}{g} \delta \frac{dV}{dt} = A - BV^2 \quad (17)$$

В выражениях (14), (15), (16) и (17) величины A_1 , B_1 , A_2 , B_2 , A_3 , B_3 , A и B — постоянные коэффициенты, определяемые конкретными условиями движения. Коэффициенты A_1 и B_1 уравнения (14) могут быть получены математиче-

ской обработкой внешней или частичных характеристик двигателя, а коэффициенты А и В уравнения (17) определяются из выражений:

$$A = A_1 \frac{i_k i_o}{r_k} \eta_m - G_a (f \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (18)$$

$$B = B_1 \frac{3600}{4\pi^2} \frac{i_k^3 i_o^3}{r_k^3} \eta_m + kF \quad (19)$$

где:

i_k и i_o — передаточные числа коробки перемены передач и главной передачи,

r_k — радиус качения ведущих колес,

η_m — механический к. п. д. силовой передачи,

kF — фактор обтекаемости автомобиля,

α — угол наклона оси дороги к горизонту.

Интегрируя дифференциальное уравнение движения (17), получаем выражения для взаимных зависимостей основных показателей движения — пути, времени и скорости, т. е.

$$S = f(v); \quad t = f(v); \quad v = f(S)$$

Конечный результат интегрирования зависит от коэффициентов А и В, которые, в свою очередь, определяются соотношением движущих сил и сил сопротивления движению. Анализ уравнения (а) показал, что коэффициент В для различных случаев движения остается положительным независимо от соотношения сил. В то же время коэффициент А зависит, при прочих равных условиях, от продольного уклона и скорости въезда на уклон. При ускоренном движении ($P_k > \Sigma P_c$) коэффициент А всегда больше нуля, а при замедленном движении возможны три случая:

$$A > 0; \quad A = 0; \quad A < 0.$$

Для тяговых расчетов движения автомобиля на подъемах и спусках наибольший интерес представляет зависимость $S = f(v)$, позволяющая определять скорость автомобиля в любой точке по длине уклона. В результате исследования установлено, что эта зависимость для всех случаев соотношения движущих сил и сил сопротивления выражается логарифмической кривой:

$$S = \frac{G_a \delta}{2gB} \ln \frac{A - B V_1^2}{A - B V_2^2} \quad (23)$$

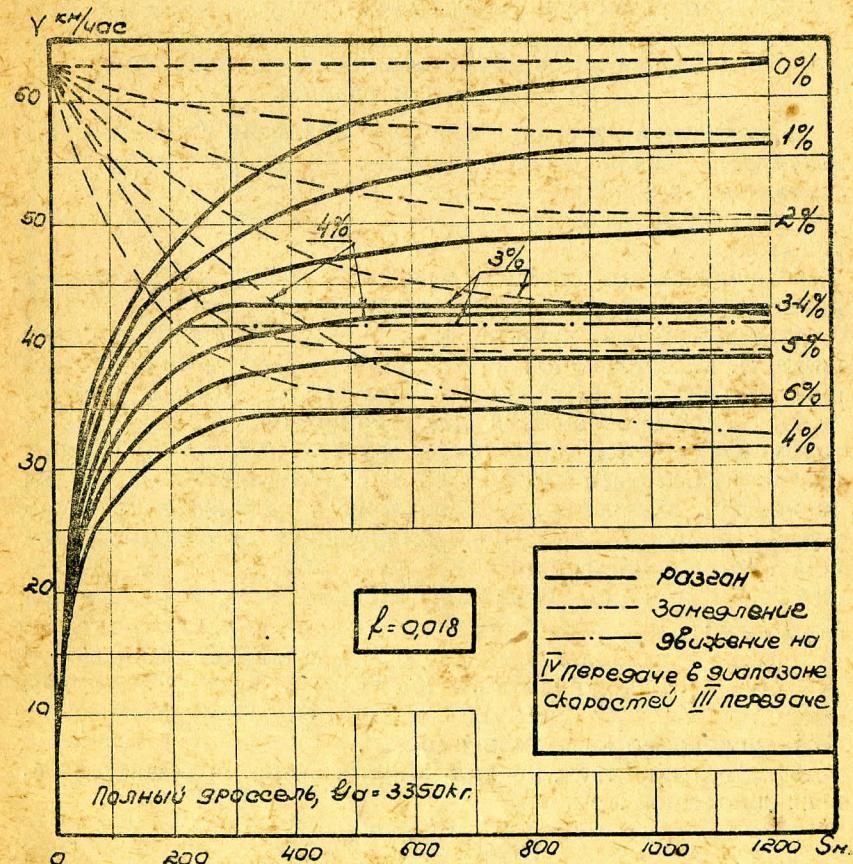
где: V_1 — скорость въезда на уклон ($S = 0$),

V_2 — скорость на расстоянии S от начала уклона.

В тех же случаях, когда условия движения на уклоне требуют перехода на другую передачу (низшую и высшую), в связи с чем должны измениться значения коэффициентов А и В, в качестве конечной скорости V_2 в формулу (23) необходимо подставлять значение скорости, при которой предполагается произвести переключение передач.

Выражение (23) достаточно просто и удобно для практического использования.

Интегрированием дифференциального уравнения движения (17) для указанных выше трех случаев соотношения сил получены выражения $t = f(v)$ и $t = f(s)$. Характер этих зависимостей указан в таблице 1.



Фиг. 1. Зависимости пути и скорости движения на различных подъемах для автомобиля ГАЗ—ММ, полученные по форм. (23) и подвергшиеся проверке в экспериментальной части исследования

Таблица 1

Зависимость	$A > 0$	$A = 0$	$A < 0$
$t = f(V)$	Логарифмическая кривая	Гипербола	Тангенсоида
$t = f(S)$		Сложная показательная функция	

Формулы, выражающие эти зависимости [см. диссертацию—форм. (21), (26), (37), (40), (32) и (35)] несколько сложнее, чем формула (23), однако, в исследовании разработана методика расчета по этим формулам, позволяющая значительно упростить вычисления.

II. Особенности неустановившегося движения на подъёмах и спусках

Особенности неустановившегося движения с работающим двигателем на подъёмах и спусках могут рассматриваться с двух точек зрения:

а) особенности работы двигателя на неустановившихся режимах;

б) особенности передачи усилия от двигателя к ведущим колесам при неустановившемся движении.

Первую часть вопроса исследовали в своих работах проф. Б. С. Фалькевич и канд. техн. наук Д. А. Рубец. В данном исследовании рассмотрена вторая сторона вопроса.

При неустановившемся движении с работающим двигателем имеет место обратимая затрата энергии на разгон вращающихся масс автомобиля, в силу чего тяговое усилие на колесах изменяется по сравнению с величиной тягового усилия при соответствующем установившемся режиме. Соотношение величин тягового усилия в общем случае движения P'_k и при установившемся движении P_k определяется формулой:

$$P'_k = P_k - (\delta - 1) j \frac{G_a}{g} \quad (53)$$

j —ускорение автомобиля ($j \geq 0$).

Введено понятие „динамический фактор неустановившегося движения“:

$$D_H = \frac{P'_k - P_w}{G_a}$$

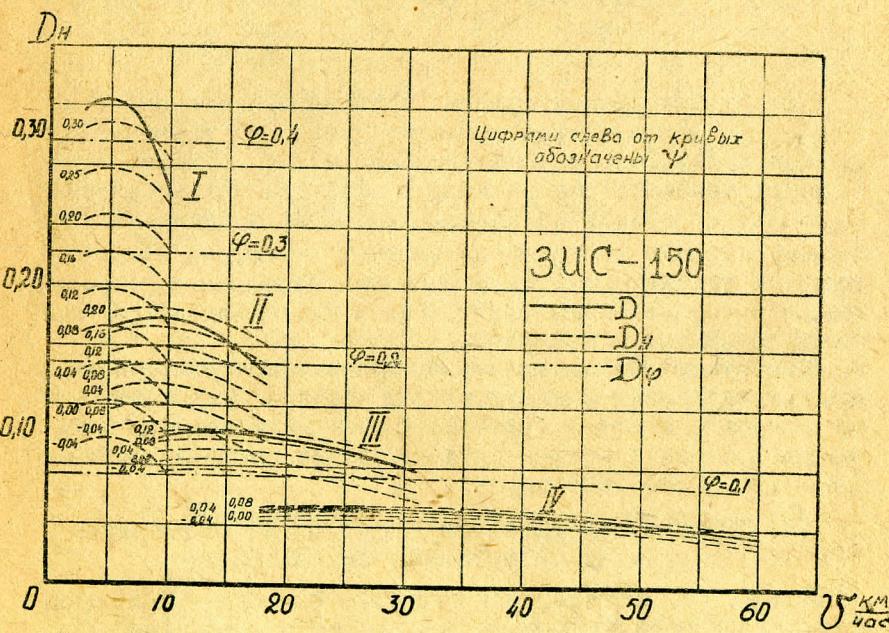
P_w —сопротивление воздуха движению автомобиля.

Величина D_H зависит от значения P'_k , а последнее, как

показывает ф-ла (53), в свою очередь зависит от ускорения j . Выражая ускорение через динамический фактор установившего движения D и коэффициент суммарного сопротивления дороги ϕ , получаем окончательную формулу для динамического фактора неустановившегося движения:

$$D_H = \psi + \frac{1}{\delta} (D - \psi) \quad (56)$$

Пользуясь ф-лой (56) можно преобразовать график динамической характеристики автомобиля в динамическую характеристику неустановившегося движения, на которой каждому значению ψ соответствует свое семейство кривых D_H (для различных передач). На фиг. 2 изображена динамическая характеристика неустановившегося движения автомобиля ЗИС-150. На графике сплошными линиями нанесены



Фиг. 2. Динамическая характеристика неустановившегося движения автомобиля ЗИС-150

кривые $D = f(v)$, пунктирными линиями— $D_H = f(v)$, а штрих-пунктирными—пределные значения динамического фактора по условиям сцепления $D_\phi = f(v)$. Взаимное расположение кривых D , D_H и D_ϕ для данной скорости, передачи, сопро-

тивления дороги (цифры у кривых D_H) и коэффициента сцепления в полной мере определяют характер движения в этих условиях, как это видно из табл. 2.

Таблица 2

Соотношение D и D_H	Характер движения	Соотношение D_H и D_φ	Характер движения
$D > D_H$	Ускоренное движение	$D_H < D_\varphi$	Нормальное движение без буксования
$D_H = D = \psi$	Установившееся движение	$D_H = D_\varphi$	Пределные условия движения по сцеплению
$D_H > D$	Замедленное движение	$D_H > D_\varphi$	Движение невозможно. Буксование

Сопоставляя данные графика и таблицы, приходим к выводу, что динамическая характеристика установившегося движения $D = f(v)$ с нанесенными на ней кривыми предельных значений динамического фактора по сцеплению $D_\varphi = f(v)$ позволяла оценивать возможности движения при низком φ только для установившегося движения. Этот недостаток динамической характеристики устранен в разработанной в данном исследовании динамической характеристике неустановившегося движения.

В настоящей работе график динамической характеристики неустановившегося движения предложен, в частности, для оценки возможностей трогания с места на подъёмах при низких значениях коэффициента сцепления, когда буксование наблюдается особенно часто.

IV. Ограничение скорости движения на подъёмах и спусках по условиям безопасности

При движении автомобиля на спуске скорость его должна быть ограничена условиями безопасности движения. При выборе величины максимально допустимой скорости движения на спуске необходимо учитывать:

- а) данные конструкции автомобиля, позволяющие развивать ту или иную максимальную скорость движения,
- б) уклон на спуске i ,
- в) условия сцепления, определяемые коэффициентом сцепления,
- г) тип и состояние покрытия, определяемые коэффициентом сопротивления качению.

В качестве критерия безопасности движения принимается величина пути торможения. Максимально допустимой величиной пути торможения предлагается считать путь торможения от максимальной скорости движения (V_{max}) до полной остановки на горизонтальном участке гладкой ($f = 0,02$) дороги в хороших условиях сцепления, оцениваемых величиной коэффициента сцепления $\varphi = 0,6$.

Движение с такой же скоростью (V_{max}) на спуске или при меньшем φ связано с увеличением пути торможения, т. е. будет более опасным.

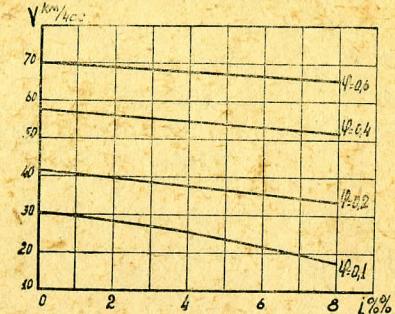
Величину максимально допустимой скорости по условиям безопасности движения на спуске при различных значениях коэффициента сцепления и коэффициента сопротивления качению предлагается выбирать по формуле (47), выведенной на основании вышеизложенных соображений.

$$V = 1,27 V_{max} \sqrt{f + f_i - i} \quad (47)$$

Этой формулой можно пользоваться для ограничения скорости движения по условиям безопасности не только на спусках, но и при движении в условиях низкого коэффициента сцепления на горизонтальных участках дороги и на пологих подъёмах.

V. Устойчивость автомобиля при движении на подъёмах и спусках

В специальной литературе подвергались рассмотрению условия потери продольной устойчивости автомобиля на подъёмах и спусках для статического состояния автомобиля и установившегося движения. В настоящем исследовании рассматривается продольная устойчивость при неустановившемся движении — при движении с максимальным ускорением на подъёме и при торможении с максимальной интенсивностью на спуске. Как первый признак потери продольной устойчивости принято условие равенства нулю реакции дороги на одну из осей — на передних колесах при разгоне на подъёме и на задних колесах при торможении на спуске.



Фиг. 3. График максимально допустимой скорости движения на спусках автомобиля ГАЗ-51 при различных значениях коэффициента сцепления

Потеря продольной устойчивости при разгоне на подъемах будет наблюдаться при условиях:

$$D_{\max} > \sin \alpha'_{\max} \quad (67)$$

$$\varphi \geq \frac{b}{hg} \quad (72)$$

где:

D_{\max} — максимальное значение динамического фактора установившегося движения.

α'_{\max} — максимальный подъем, соответствующий условию потери продольной устойчивости в статистическом состоянии автомобиля и при установившемся движении.

b и hg — координаты центра тяжести автомобиля.

Исследование продольной устойчивости при торможении с максимальной интенсивностью на спуске показало, что для этого случая условия потери продольной устойчивости не зависят от уклона дороги, т. е. совершенно одинаковы как для подъемов, так и для спусков, и определяются, главным образом, координатами центра тяжести и коефициентом сцепления.

Произведенные примерные расчеты показали, что оба рассмотренных случая потери продольной устойчивости не могут иметь места в нормальных условиях эксплуатации.

Боковая устойчивость автомобиля определяется, главным образом, устойчивостью задней (ведущей) оси, так как начавшийся занос задней оси уже при небольшой скорости движения автоматически не погашается, а прогрессивно увеличивается. На спуске уменьшается величина реакции на задних колесах, в связи с чем значительно увеличивается опасность заноса задней оси. Для обеспечения боковой устойчивости нельзя прибегать к интенсивному торможению. Это обстоятельство подтверждает правильность предлагаемой методики ограничения скорости движения на спусках по условию сохранения постоянной величины пути торможения.

VI. Расход топлива при движении на подъемах и спусках

При прочих равных условиях, расход топлива зависит от скорости движения на подъеме или спуске и при некотором значении скорости достигает минимальной величины. Применявшаяся ранее оценка этой скорости как „экономической“, неправильна, так как далеко не всегда эта скорость соответствует минимальной стоимости выполненной перевозочной работы в тоннокилометрах (при движении с такой скоростью снижается производительность автомобиля).

В исследовании рассматривается изменение расхода топлива при движении на подъемах и спусках с фиксированным открытием дросселя без учета и с учетом влияния неустановившегося режима. В последнем случае подтверждается целесообразность инерционного преодоления подъемов.

VII. Режим движения на подъемах и спусках

При движении автомобиля с полным (или постоянным) открытием дросселя, режим движения определяется выбором моментов перехода на низшие передачи (на подъемах) или на свободное качение (на спусках). Анализ условий движения на подъемах и спусках с точек зрения увеличения средней скорости движения, снижения расхода топлива и уменьшения износа двигателя и автомобиля позволил получить определенные рекомендации по этому вопросу.

Выбор момента перехода на низшую передачу при преодолении подъемов зависит от уклона и длины подъема и должен базироваться на следующих соображениях:

а) Если на низшей передаче потребуется движение в течение длительного времени (длинный подъем), то переключение передач целесообразно произвести при скорости, которая соответствует максимально допустимым оборотам двигателя на низшей передаче.

б) Если переход на низшую передачу неминуем, но движение на этой передаче должно быть кратковременным, то переключение рекомендуется производить при скорости, соответствующей установившемуся движению на низшей передаче на данном подъеме.

в) Можно допустить падение скорости при движении на высшей передаче до критической скорости $V_{\text{крит.}}$ и даже несколько меньшей, если таким образом имеется возможность преодолеть подъем без перехода на низшую передачу (короткий подъем).

Для движения на спусках при выборе моментов отключения и включения двигателя необходимо учитывать уклон и длину спуска, а также уклон на последующем участке, а именно:

а) Если максимально допустимая скорость по условиям безопасности ($V_{\text{безоп.}}$) меньше максимальной скорости свободного качения ($V_{\text{св. кач.}}$), что имеет место на вредных уклонах, то двигатель нужно отключать при скорости несколько меньшей, чем $V_{\text{безоп.}}$. Если позволяет продольный профиль предшествующего участка, двигатель в этих условиях желательно отключать еще перед спуском, с таким расчетом, чтобы скорость въезда на спуск равнялась бы $V_{\text{безоп.}}$.

б) Если имеет место обратная зависимость, т. е. $V_{\text{св. кач.}} = V_{\text{безоп.}}$, то отключать двигатель следует при $V_{\text{безоп.}}$.

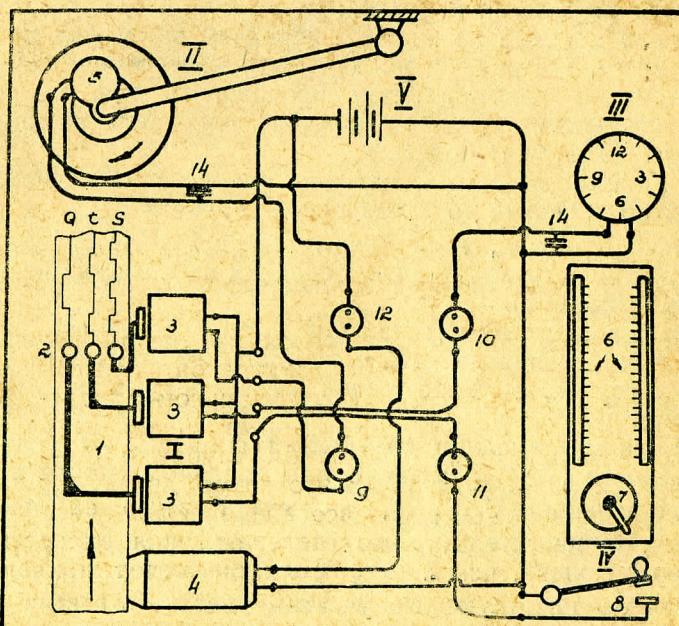
в) Если за данным спуском следует подъём, то включать двигатель рекомендуется перед концом спуска, чтобы не допустить падения скорости ниже $V_{\text{безоп.}}$ на спуске и на последующей вертикальной кривой.

г) Если за спуском следует горизонтальный участок, то целесообразно задержать включение двигателя и использовать накат.

Законом движения автомобилей на подъёмах и спусках должно стать максимальное использование возможностей инерционного преодоления подъёмов и минимальное применение торможения на спусках (в пределах безопасности). Используя эти правила передовые водители-стахановцы добиваются высоких показателей производительности и экономии горючего на автотранспорте.

VIII. Экспериментальное исследование

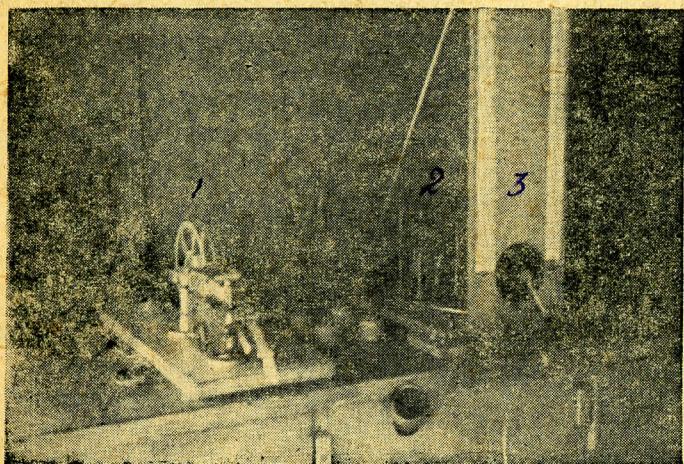
Экспериментальному исследованию подверглись взаимные зависимости элементов движения (путь, время, скорость)



Фиг. 4. Схема прибора для комплексных дорожных испытаний автомобиля на динамику и экономику

на различных подъёмах и спусках и изменение расхода топлива в этих условиях. Произведены дорожные испытания автомобиля ГАЗ-ММ, оборудованного специально сконструированным и изготовленным прибором для комплексных дорожных испытаний автомобиля на динамику и экономику, схема которого дана на фиг. 4.

Записывающая часть прибора I фиксировалась с помощью перьев 2, управляемых электромагнитами 3, на ленте 1,



Фиг. 5. Общий вид приборов, установленных в кузове автомобиля:

1. Записывающая часть прибора.
2. Датчик времени.
3. Прибор для замера расхода топлива

приводившейся в движение от мотора 4, сигналы пути, времени и расхода топлива, поступавшие от соответствующих датчиков.

Датчик пути 5 был установлен на „пятом колесе“ II, а датчиком времени служили электроконтактные часы III. Сигналы расхода топлива подавались с помощью телеграфного ключа 8 наблюдателем, который следил за падением уровня бензина в одной из мерных трубок 6 прибора для замера расхода топлива IV. В это время другая трубка 7 заполнялась топливом от бензонасоса до определенного уровня, соответствующего начальному делению шкалы. Переключение трубок производилось двойным трехходовым краном 7.

Параллельно контактам датчиков пути и времени были установлены конденсаторы 14. Питание осуществлялось от аккумуляторной батареи V. Датчики и мотор отключались выключателями 9, 10, 11, 12.

Интервалы между сигналами соответствовали 2,5 м, 0,6 сек. и 2,5—5 см³. Таким образом, имелась возможность определять скорость движения и расход топлива в каждый момент времени и в каждой точке пути.

Результаты экспериментального исследования подтвердили правильность выведенных аналитических зависимостей для элементов движения (путь, время, скорость) и характер протекания кривых расхода топлива в функции пройденного пути, которые были получены в теоретической части работы.

IX. Выводы

1. Полученные аналитические зависимости основных элементов движения подтверждены экспериментально и могут быть рекомендованы для использования при тяговых расчетах движения автомобиля.

2. Разработанная методика определения максимально допустимой скорости движения по условиям безопасности может быть использована для нормирования безопасных скоростей на спусках и при низком коэффициенте сцепления.

3. Предложенная в настоящем исследовании динамическая характеристика неустановившегося движения позволяет полнее оценивать возможности движения автомобиля в различных дорожных условиях, чем применяющаяся в настоящее время динамическая характеристика установившегося движения.

4. Теоретико-экспериментальное исследование переменного движения на уклонах дает возможность обосновать методику проектирования продольного профиля автомобильных дорог, которая до сих пор пользуется, главным образом, условием равномерного движения.

5. Полученные рекомендации по рациональному режиму движения на подъемах и спусках могут служить основой для разработки соответствующих инструкций для водителей, которые будут способствовать улучшению использования подвижного состава, повышению производительности труда и снижению расхода топлива на автомобильном транспорте.

Сдано в набор 16.III-50 г. Подписано к печати 21.III-50 г. 1 п. л.,
уч. авт. 3/4 л. БЦ 00235. Зак. 1646. Тираж 100.

Типография ХСХИ, ул. Артема, 44.