

$$p = \frac{-F_{1(2)} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \sqrt{f^2 \cdot F_{1(2)}^2 + \cos^2 \frac{\varphi}{2} (f^2 - \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}) \cdot \left(\frac{dF}{d\alpha}\right)^2}}{2h \cdot r_{1H(2H)} \cdot (f^2 - \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2})} \quad (12)$$

определяется удельное давление на боковой (рабочей) поверхности элемента.

При известном  $p$  по формуле:

$$r = R_{1(2)} + \frac{B_p \cdot F}{4h \cdot r_{1H(2H)} \cdot E_c} - \frac{p \cdot B_p}{E_c \sin \varphi} \quad (13)$$

вычисляем радиус расположения элемента ремня в канавке шкива, а затем по формуле:

$$\frac{dr}{d\alpha} = \frac{r - r_{1H(2H)}}{d\alpha} \quad (14)$$

вычисляем производную радиуса по углу обхвата.

Полученные величины позволяют определить и производную окружного перемещения по углу обхвата по формуле:

$$\frac{d\tau}{d\alpha} = \frac{\frac{dr}{d\alpha} \cdot \frac{dF}{d\alpha}}{2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} r_{1H(2H)} \cdot h \cdot p \cdot F} \quad (15)$$

После этого определяется величина потери скорости при набегании ремня на ведущий шкив:

$$\xi_1 = 1 - \frac{1}{1 - \frac{1}{r_{1H}} \frac{d\tau}{d\alpha}} \quad (16)$$

Или на ведомый шкив:

$$\xi_2 = \frac{1}{r_{2H}} \cdot \frac{d\tau}{d\alpha} \quad (17)$$

Зная величины  $F$ ,  $r$ ,  $\tau$ ,  $\xi_{I(2)}$  при  $\alpha = d\alpha$ , можно переходить к интегрированию дифференциальных уравнений, т.е. к решению поставленной задачи.

Теперь необходимо найти такую величину  $\frac{dF}{d\alpha}$  (и соответственно  $\xi_{I(2)}$ ), т.е. чтобы при  $\alpha = \alpha_{I(2)}$ , т.е. в конце основной дуги обхвата при расчете ведущего шкива натяжение ремня равнялось  $F_2$ , а в конце дуги обхвата ведомого шкива при его расчете –  $F_1$ .

### Литература

1. Виравов Р.В., Чепурной С.И. Тяговые свойства клиноременной передачи. Вестник машиностроения, № 4, с. 20-27, 1981.

### Корректировка расчетов на плавность хода колесных машин по их динамическим моделям

д.т.н. проф. Вольская Н.С., к.т.н. доц. Чичекин И.В.

ФГБОУ ВПО «МГИУ»

(495) 675-62-42, [volskaja@mail.msiu.ru](mailto:volskaja@mail.msiu.ru), [hiv2@mail.ru](mailto:hiv2@mail.ru)

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме расчета плавности хода колесных машин осуществляющих движение по неровным недеформируемым опорным поверхностям. Приведена методика, корректирующая известный алгоритм оценки за счет расширения диапазона частоты действия возмущающей силы на динамические модели колесных машин. Представлено сравнение результатов натурных испытаний и расчетных методик.

**Ключевые слова:** плавность хода, колесная машина, подвеска, шина, неровности, частота возмущающей силы, среднеквадратические вертикальные ускорения, динамические модели

В настоящее время к колесным машинам (КМ) предъявляются все более высокие требования по экологичности, безопасности, управляемости, динамичности, шумности и уровню комфорта.

Все вышеперечисленные требования напрямую связаны с работой подвески. Поэтому очень важно подобрать правильные параметры подвески, обеспечивающие необходимую

жёсткость, демпфирование, кинематику перемещения колеса и т.д. Современные подвески КМ могут работать в разнообразных условиях, удовлетворить которые, подобрав постоянные параметры подвески, как правило, не всегда возможно. Поэтому выбираются средние значения параметров, наиболее соответствующие типичным условиям эксплуатации, или применяются подвески с регулируемыми характеристиками, изменяемыми в зависимости от условия эксплуатации и нагружения в процессе движения.

Для проверки правильного выбора характеристик подвески на стадии ее проектирования проводят расчеты на плавность хода, установив критерии ее оценки.

Как известно из курса «Теория автомобиля» [1], характеристикой плавности хода является зависимость от скорости движения среднеквадратических вертикальных ускорений  $\ddot{z}_c$  точки, взятой на соответствующем уровне сечения поддрессоренной массы машины. Плавность хода обычно оценивают или над осями КМ или на местоположении сиденья водителя.

Вопросам, связанным с изучением плавности хода, оценки ее влияния на организм человека, критериям оценки, математическим моделям, описывающим движение автомобиля по неровным опорным поверхностям, посвящено много работ как в нашей стране, так и за рубежом [1, 2, 4].

При движении по неровным опорным поверхностям (ОП) КМ совершает вынужденные колебания случайного характера. Особенно неприятными для человека являются периодические возмущения, действующие через равные промежутки времени.

Рассмотрим подробнее методику расчета плавности хода КМ.

**На первом этапе расчета** задают ОП, имеющую микропрофиль в виде синусоидальных неровностей, при движении по которым КМ испытывает гармоническое возмущение (рисунок 1). Неровности, вызывающие колебания КМ, могут быть любой формы, но из-за сглаживающей способности пневматических шин перемещение оси колеса будет соответствовать синусоидальным неровностям. Оценка сглаживающей способности шин выходит за рамки данной статьи и требует дальнейшего исследования с применением современных компьютерных приложений, имитирующих движение пневматической шины по различным видам неровностей.

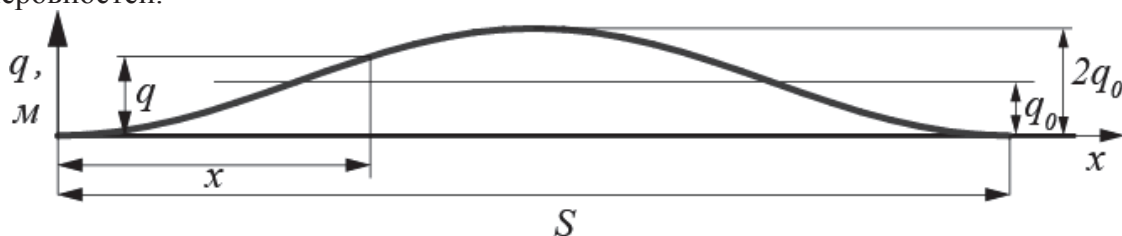


Рисунок 1. Микропрофиль синусоидальной неровности

Принимается также допущение о точечном контакте колеса с ОП, которое позволяет считать изменение кинематического воздействия гармоническим.

За начало отсчета обычно выбирается дно впадины, а вертикальное перемещение точки контакта колеса  $q$  определяется уравнением:

$$q = q_0 \cdot [1 - \cos(2\pi \cdot x/S)], \quad (4)$$

где:  $q_0$  — амплитуда волны неровности;

$x$  — абсцисса определяемой точки контакта;

$S$  — длина волны неровности.

Так как в рассматриваемом случае только микропрофиль ОП вызывает колебания КМ, при расчете плавности хода следует учитывать только длины неровностей в диапазоне  $S = S_{\min} \dots S_{\max} = 0,3 \dots 25$  м, причем в зависимости от типа ОП диапазон длин волн неровностей будет варьироваться.

При расчете плавности хода делают допущение — КМ движется равномерно  $V_a = \text{const}$ . Расчет производят для каждой скорости из диапазона  $V_a = 0 \dots V_{a\max}$ , км/ч, где  $V_{a\max}$  — мак-

симально возможная (допустимая) скорость движения автомобиля на рассматриваемой опорной поверхности. Шаг выбирают равным –  $\Delta V_a = 1...10$  км/ч.

При равномерном движении КМ, принимая  $x = V_a \cdot t$ , для определения ординаты текущей высоты неровности:

$$q = q_0 \cdot [1 - \cos(2\pi \cdot V_a \cdot t / S)] = q_0 \cdot [1 - \cos(\nu \cdot t)], \quad (5)$$

$$\text{где: } \nu = 2\pi \cdot V_a / S \quad (6)$$

$\nu$ , рад/с – частота кинематического воздействия.

Для дальнейших расчетов в известных методиках определения плавности хода КМ задают диапазон частот кинематического воздействия, как правило,  $\nu = \nu_{\min} \dots \nu_{\max} = 0,1 \dots 90$  рад/с [1, 4].

К сожалению, этого диапазона не хватает, чтобы охватить все возможные сочетания длин неровностей и скоростей. Но самое главное, что с изменением скорости движения КМ этот диапазон будет изменяться. Так с ростом скорости движения диапазон частот смещается в сторону больших частот.

Поэтому применение в расчетах ограниченного диапазона частот кинематического воздействия (до 90 рад/с) не вполне корректно. Связано это, прежде всего, с тем, что частота возмущающего воздействия  $\nu$  зависит одновременно от скорости движения автомобиля  $V_a$ , которая для рассматриваемой КМ изменится  $V_a = 0 \dots V_{a\max}$ , а также от длины волны неровности, диапазон которых выбирается в зависимости от типа ОП. Одну и ту же частоту можно получить различным сочетанием скорости и длины волны неровности, причем с увеличением скорости движения длины неровностей должны уменьшаться, что противоречит физическому смыслу.

КМ может двигаться по одним и тем же неровностям с различными скоростями (без учета воздействия колебаний на организм человека и на элементы самой КМ). Поэтому в уточняемой методике расчета плавности хода КМ предлагается задавать варьируемым параметром длину волны неровности из возможного диапазона длин волн для рассматриваемой ОП ( $S = S_{\min} \dots S_{\max}$ ), а частоту кинематического воздействия пересчитывать по уравнению (6). Границы диапазона частот кинематического воздействия запишем в виде:

$$\begin{aligned} \nu_{\min} &= \frac{2\pi}{S_{\max}} \cdot V_a; \frac{\text{рад}}{\text{с}} \\ \nu_{\max} &= \frac{2\pi}{S_{\min}} \cdot V_a; \frac{\text{рад}}{\text{с}} \end{aligned} \quad (7)$$

В литературе приведены для различных типов ОП длины неровностей, а также амплитуды волны неровности [4]. Поэтому рассчитать требуемый диапазон частот кинематического воздействия не составит труда.

Дальнейший расчет плавности хода практически не изменяется. Так **на втором этапе расчета**, в зависимости от стоящих перед исследователем задачи, выбирают или разрабатывают физическую и математические модели, эквивалентные рассматриваемой КМ [5]. На рисунк 2 в качестве примера представлена физическая двухмассовая модель, эквивалентная колебаниям одной оси КМ.

Законы движения поддрессоренной ( $M$ ) и неподдрессоренной масс ( $m$ ) системы можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} M \cdot \ddot{z} + k_A \cdot \dot{z} + c_P \cdot z = k_A \cdot \ddot{\xi} + c_P \cdot \dot{\xi} \\ -k_A \cdot \dot{z} - c_P \cdot z + m \cdot \ddot{\xi} + (k_{III} + k_A) \cdot \dot{\xi} + (c_{III} + c_P) \cdot \xi = k_{III} \cdot \dot{q} + c_{III} \cdot q \\ q = q_0 \cdot (1 - \cos(\nu \cdot t)) \end{cases} \quad (8)$$

где:  $k_A$  – коэффициент сопротивления амортизатора, Н\*с/м;

$k_{ш}$  – коэффициент сопротивления шины, Н\*с/м;

$c_p$  – жесткость упругого элемента подвески, Н/м;

$c_{ш}$  – нормальная жесткость шин, Н/м;

$z$  – вертикальные перемещение поддрессоренной массы, м;

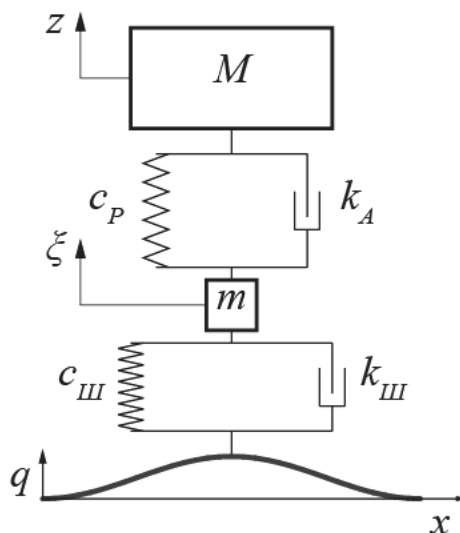
$\dot{z}$  – вертикальные скорость поддрессоренной массы, м/с;

$\ddot{z}$  – вертикальные ускорения поддрессоренной массы, м/с<sup>2</sup>;

$\xi$  – вертикальные перемещение неподдрессоренной массы, м;

$\dot{\xi}$  – вертикальные скорость неподдрессоренной массы, м/с;

$\ddot{\xi}$  – вертикальные ускорения неподдрессоренной массы, м/с<sup>2</sup>.



**Рисунок 2. Эквивалентная колебательная система одной оси колесной машины, движущейся по твердой неровной ОП**

Решение системы уравнений (8) позволяет найти как абсолютные перемещения поддрессоренной  $z_A$  и неподдрессоренной  $\xi_A$  массы, ускорения поддрессоренной массы  $\ddot{z}_A$ , так и эти величины, отнесенные к амплитуде волны неровности ( $z_A/q_0$ ,  $\xi_A/q_0$  и  $\ddot{z}_A/q_0$ ). Полученные абсолютные значения перемещений и ускорений не зависят от скорости движения и параметров ОП, а отражают только характеристики самой динамической системы и влияние ее на частоту действия возмущающей силы. Такие характеристики называются амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ).

**На третьем этапе расчетов** необходимо определить значения среднеквадратических ускорений поддрессоренной массы ( $\ddot{z}_C$ ). Для этого необходимо:

$$\ddot{z}_C = \sqrt{\int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \left( \frac{\ddot{z}_A}{q_0} \right)^2 \cdot S_q(v) \cdot dv}, \quad (9)$$

где:  $S_q(v) = \frac{A \cdot v^2}{V_a}$ ,  $\frac{m^2 \cdot c}{\text{рад}}$  – спектральная плотность – непрерывная функция, характеризую-

щая распределение дисперсий высот неровностей по их длине;

$A$  – постоянная, описывающая степень ровности дороги, м·рад. Она зависит от типа ОП и меняется в широких пределах даже для одного и того же типа ОП в зависимости от ее состояния. Например, для дороги с асфальтобетонным покрытием в очень хорошем состоянии  $A = 2,5 \cdot 10^{-5}$ , а для той же дороги в среднем состоянии  $A = 1 \cdot 10^{-4}$  [1 и 4].

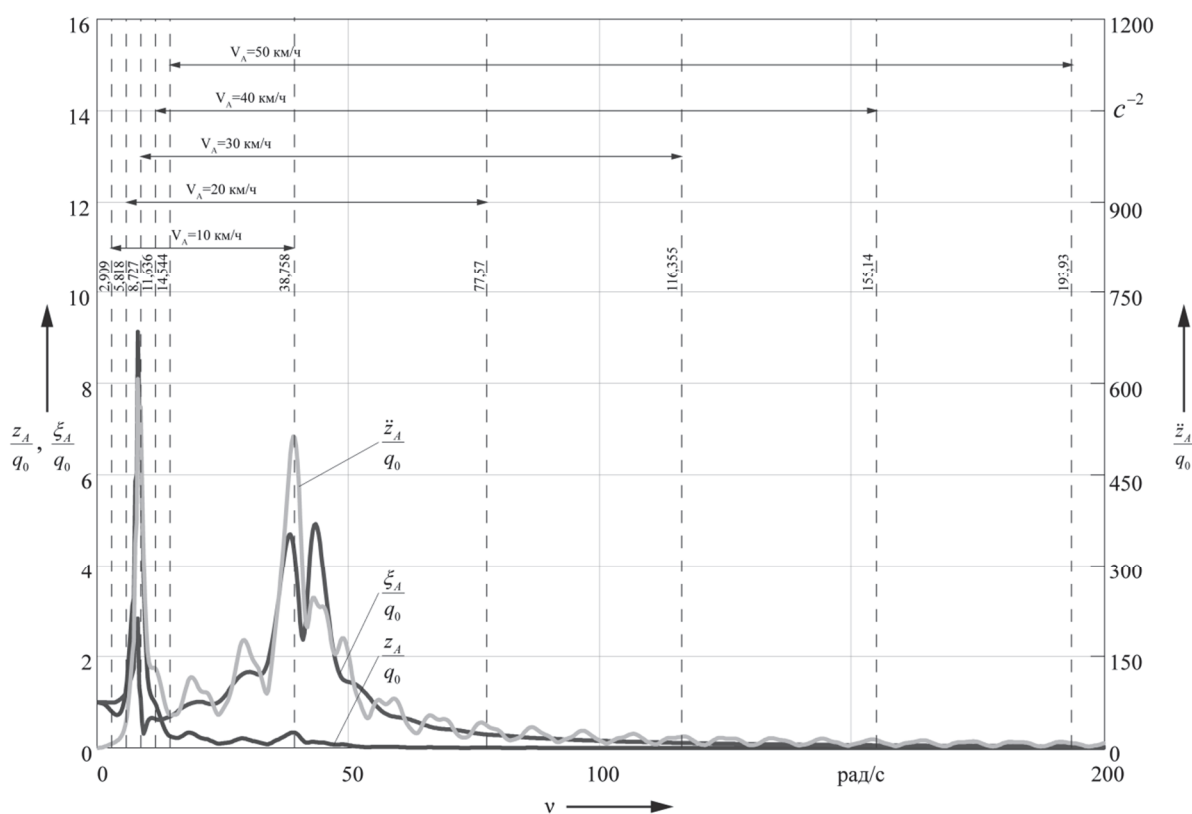
Вопросы, связанные с оценкой плавности хода КМ при движении по ОП со случайным

микропрофилем, описываемым с помощью  $S_q(\nu)$ , подробно рассмотрены в курсе «Теория автомобиля» [1], а также в соответствующей литературе [4].

На этом этапе при интегрировании следует использовать границы интегрирования, полученные ранее (7). Таким образом, среднеквадратические значения ускорений поддрессоренной массы  $\ddot{z}_C$  для частот кинематического воздействия, не превышающих  $\omega_K$  – парциальную частоту колебаний неподдрессоренной массы при неподвижной поддрессоренной массе (10), существенно зависят от площади под графиком характеристики абсолютных значений ускорений поддрессоренной массы. При частотах выше  $\omega_K$  ускорения  $\ddot{z}_C$  в большей степени зависят от частоты кинематического воздействия  $\nu$ .

$$\omega_K = \sqrt{\frac{c_P + c_{III}}{m}}. \quad (10)$$

На рисунок 3 в качестве примера представлены АЧХ, полученные для динамической системы, эквивалентной передней оси автомобиля ЗИЛ 432720, постоянные для диапазона длин неровностей  $S = 0,45 \dots 6$  м. Также приведены диапазоны частот при разных скоростях движения  $V_a = 10, 20, 30, 40, 50$  км/ч.

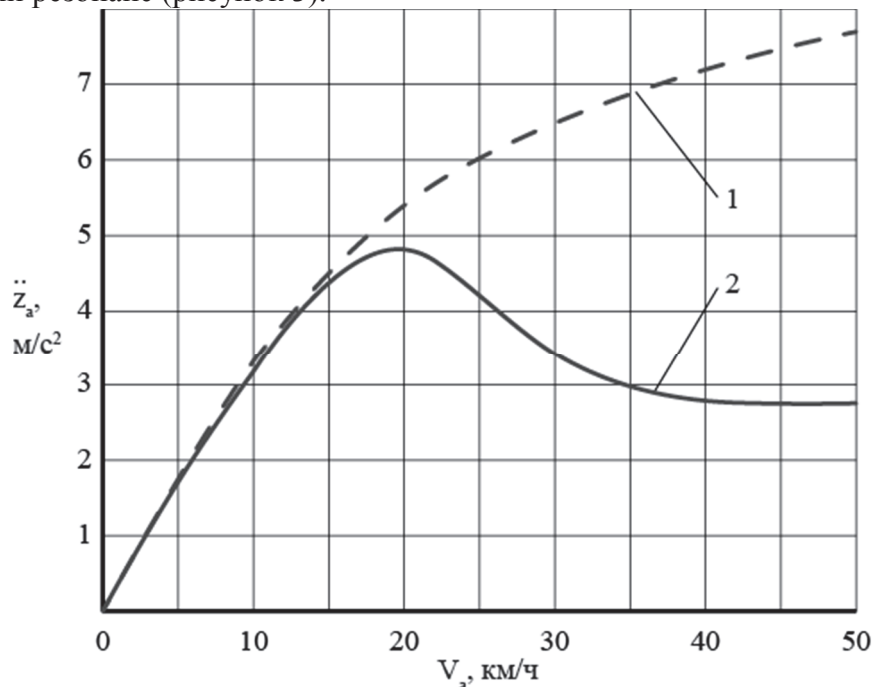


**Рисунок 3. АЧХ для точки, находящейся над передним левым колесом автомобиля ЗИЛ 432720**

Как видно по представленным характеристикам, при расчете среднеквадратического значения ускорения поддрессоренной массы  $\ddot{z}_C$  для каждой из перечисленных выше скоростей  $V_a$  км, диапазон частот при увеличении скорости увеличивается, смещаясь в сторону высоких частот. При увеличении скорости в область интегрирования будут попадать новые значения участка характеристики.

**На четвертом этапе расчета** строят характеристики плавности хода и делают выводы по полученным результатам, при необходимости изменяют исходные данные для расчетов.

На рисунок 4 представлена характеристика плавности хода  $\ddot{z}_c$ , имеющая максимум при скорости 20 км/ч. Именно при этой скорости в диапазон частот действия возмущающих сил попадают низкочастотный и высокочастотные резонансы (рисунок 3) и, соответственно, наибольшая площадь под кривой. При дальнейшем росте скорости среднеквадратические ускорения подрессоренной массы снижаются, т.к. из диапазона возможных частот пропадает низкочастотный резонанс (рисунок 3).



**Рисунок 4. Характеристики плавности хода: 1 – старая методика, 2 – новая методика расчета**

При движении по разбитым дорогам при скорости 20 км/ч могут наблюдаться сильные толчки, тряска и т.д. Если водитель увеличит скорость движения, неприятные ощущения могут уменьшиться.

При увеличении скорости движения (более 50 км/ч) среднеквадратические значения ускорений подрессоренной массы будут увеличиваться, т.к. будет сказываться увеличение частоты кинематического воздействия.

#### **Сравнение результатов расчета и экспериментальных исследований.**

Уточненная методика расчета плавности хода нашла экспериментальное подтверждение в работе Д.Б. Гельфрата и В.А. Ошнокова [3]. По представленным экспериментальным данным определены среднеквадратические ускорения подрессоренной массы, приходящиеся на переднюю и заднюю оси автомобиля ГАЗ 63 при движении по типичной ОП. Экспериментальные ускорения определялись для точек на раме, находящихся над рессорами КМ.

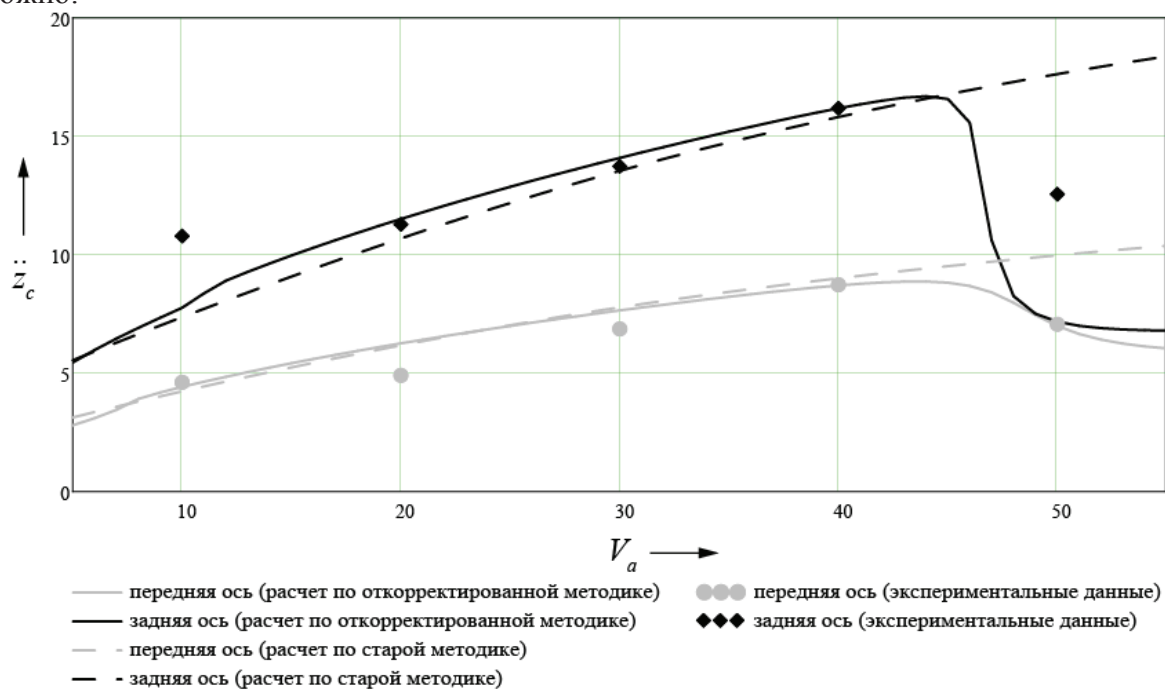
Выполнен уточненный расчет плавности хода автомобиля ГАЗ 63. Результаты сопоставлены с экспериментальными данными [3], а также с результатами, полученными по известной методике. Сравнительный анализ представлен на рисунок 5.

В расчете моделируется движение по булыжному шоссе плохого качества. В диапазоне скоростей 10...40 км/ч по обеим расчетным методикам получены близкие расчётные значения среднеквадратических ускорений подрессоренной массы. Разница экспериментальных и расчетных данных не превышает 15% в этом диапазоне скоростей.

При скорости движения порядка 40 км/ч выявлены максимальные среднеквадратические ускорения, полученные как при расчетах по откорректированной методике, так и в ходе эксперимента. В дальнейшем с ростом скорости ускорения уменьшаются. Для этой скорости также видно различие в полученных результатах по различным методикам расчета. По ста-



рой методике среднеквадратические ускорения поддрессоренной массы с ростом скорости увеличиваются, в то время как по разработанной методике и данным, полученным в ходе эксперимента, эти ускорения уменьшаются. Большую разницу можно наблюдать при расчетах плавности хода грузовых автомобилей, двигающихся по неровной ОП с частичной загрузкой. В таком случае разница будет уже видна при скоростях движения 20–30 км/ч. По данным, полученным по откорректированной методике, можно подобрать параметры подвески, позволяющие уменьшить среднеквадратические ускорения поддрессоренной массы и существенно увеличить скорость движения КМ. По старой методике такого сделать было невозможно.



**Рисунок 5. Характеристики плавности хода КАМАЗ 63 при движении по булыжному шоссе**

Однако необходимо отметить, что при скорости движения свыше 40 км/ч разница расчетных (по новой методике) и экспериментальных для задней оси КАМАЗ значений увеличивается и составляет 43%. Для передней оси результаты экспериментальных исследований и расчета по откорректированной методике совпадают.

Отклонения полученных результатов для задней оси можно объяснить двумя причинами. Во-первых, представленные в работе [3] данные по КАМАЗ недостаточны для точного описания динамической модели, эквивалентной автомобилю КАМАЗ 63. Поэтому часть необходимых данных выбиралась по среднестатистическим значениям для автомобилей КАМАЗ 63.

Во-вторых, при расчете использовалась простая двухмассовая модель, эквивалентная одной оси автомобиля, которая учитывает только вертикальные колебания поддрессоренной и неподдрессоренной массы колесной машины. Установлено [5], что при использовании пространственной динамической модели, в которой учитываются совместные вертикальные, продольноугловые и поперечноугловые колебания, а также крутильные колебания рамы, ускорения точек кузова могут быть выше на 25–35% в сравнении с плоской динамической системой. Поэтому можно ожидать более точные результаты расчетов.

Известная методика расчета плавности хода, использующая постоянный диапазон частот кинематического воздействия имеет существенный недостаток. При проведении расчетов необходимо учитывать изменяющуюся длину неровностей независимо от скорости автомобиля.

Разработанная методика оценки плавности хода автомобиля имеет качественное экспериментальное подтверждение. Результаты расчета дают погрешность, не превышающую 15%.

Использование постоянных значений длин неровностей, характерных для рассматриваемой неровной опорной поверхности, не противоречит физическому смыслу. Накопленный опыт исследователей, занимающихся вопросами плавности хода КМ, позволяет выбирать для типичных ОП значения диапазона возможных длин неровностей.

Уточненная методика расчета плавности хода позволяет более точно подобрать характеристики подвески КМ для снижения среднеквадратических значений вертикальных ускорений подрессоренной массы, увеличив скорости ее движения, а следовательно, и производительность.

Однако требуются дальнейшие исследования по оценке плавности хода с использованием пространственных динамических моделей колесных машин с учетом откорректированной методики. Также представляет интерес расширение экспериментальных и аналитических исследований по расчетной оценке влияния плавности хода на движение колесных машин по неровным деформируемым грунтовым поверхностям.

Такие исследования являются приоритетным научным направлением кафедры автомобилей и двигателей МГИУ [2, 5].

### Литература

1. Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Теория автомобиля: Учебное пособие. М.: МГИУ, 2007 – 324 с.
2. Агейкин Я.С., Вольская Н.С., Чичекин И.В. Проходимость автомобиля: Учебник. – М.: МГИУ, 2010 – 275с.
3. Гельфрат Д.Б., Ошноков В.А. Рамы грузовых автомобилей. Под редакцией проф. Липгарда А.А. М. – МАШГИЗ, 1959. – 237 с.: ил.
4. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля Изд. 3 е перабот. и доп. М., «Машиностроение», 1972, с. 392.
5. Чичекин И.В. Разработка пространственных динамических моделей колесных машин для анализа проходимости при движении по неровным грунтовым поверхностям: автореферат на дис. канд. тех. наук: 01.02.06, 05.05.03 – Москва, 2010. – 23 с.

### **Идентификация параметров сопротивления движению колесных транспортных средств в эксплуатации**

к.т.н. Шадрин С.С.

МАДИ (ГТУ)

+7-495-507-81-91, shadrin@madi.ru

*Аннотация.* В настоящей статье рассмотрена методика проведения испытаний современного легкового автомобиля, находящегося в эксплуатации, с идентификацией параметров сопротивления движению для дальнейшего более точного математического моделирования управляемого движения и возможности внесения корректировок в алгоритмы предикативных систем активной безопасности и систем межобъектного взаимодействия интеллектуальных транспортных средств .

*Ключевые слова:* *автотранспортное средство, идентификация параметров автомобиля, проведение эксперимента, шина CAN, имитационное моделирование движения автомобиля, многокритериальная оптимизация.*

Постановка задачи: определение коэффициента аэродинамического сопротивления и приведенного коэффициента сопротивления движению современного легкового автомобиля, находящегося в эксплуатации.

Объект испытаний – автомобиль категории M1 Land Rover Discovery 3 2009 года выпуска с дизельным ДВС 2,7TdV6, автоматической 6-ти ступенчатой трансмиссией, снаряженной массой 2718 кг, пневматическими шинами 255/60R18 M+S Good Year Wrangler. Пробег автомобиля на момент проведения испытаний составил 83247 км.

Измерительное оборудование: декодер CAN шины «NI-8473s» (National Instruments),