

А.А. Макенов, А.А. Давыдов

Восточно-Казахстанский государственный технический
университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

М.Ю. Петухов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Россия

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЕЙ

Рассмотрены вопросы выбора оптимальных показателей плавности хода автотранспортных средств (на примере легковых автомобилей), в частности упругих элементов подвески. При этом выполнена проверка соответствия их основных характеристик необходимой плавности хода. Приведено программное обеспечение, которое позволяет выполнить автоматизированный расчет показателей плавности хода автотранспортных средств.

Ключевые слова: автотранспортное средство, плавность хода, упругий элемент подвески, комфортабельность движения, безопасность движения.

При длительном нахождении в автотранспортном средстве из-за колебаний кузова у его пассажиров и водителя часто появляются чувство усталости, головокружение и другие нежелательные ощущения, которые наносят вред их здоровью, а также снижается производительность труда водителя. Колебания кузова сказываются также на сохранности груза и самого транспортного средства. Поэтому одним из основных требований, которые предъявляются к современному автотранспортному средству, является максимальное повышение плавности хода и улучшение комфортабельности (удобства) движения.

Водитель транспортного средства и его пассажиры оценивают плавность хода субъективно на основе собственных ощущений. Ощущения людей и наступающее при этом утомление обычно связывают с ускорениями колебаний и их повторяемостью. Наиболее простым оценочным показателем плавности хода может служить частота собствен-

ных колебаний кузова. Экспериментально установлено, что условием хорошей плавности хода является совпадение величин собственных частот колебаний со средней частотой шагов (60–90 в минуту) человека, что соответствует 1,7–2,5 Гц [1].

Основными оценочными показателями плавности хода автотранспортных средств являются уровни вибронегруженности водителя, пассажиров, грузов и характерных элементов шасси и кузова транспортного средства. Оценка уровня вибронегруженности производится по средним квадратическим значениям ускорений колебаний (виброускорений) или скоростей колебаний (виброскоростей) в вертикальном направлении.

Для того чтобы обеспечить безопасность и комфортабельность движения автотранспортных средств, необходимо улучшать параметры упругих элементов подвески.

Принято считать, что кузов автотранспортного средства имеет шесть степеней свободы и может совершать шесть различных типов колебаний: линейные перемещения вдоль осей X ; Y ; Z и угловые перемещения вокруг осей X ; Y и Z (рис. 1) [2, 3].

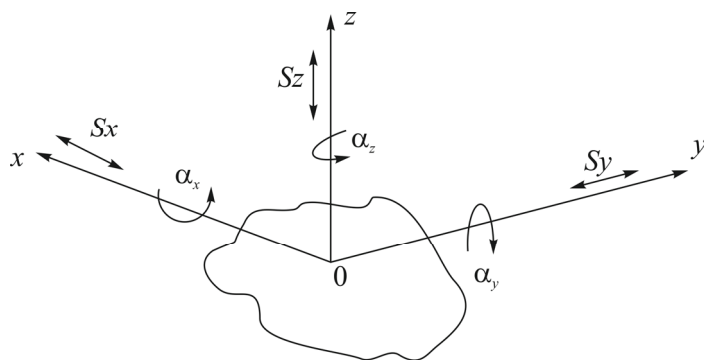


Рис. 1. Схема колебательной системы автотранспортного средства

Из-за сложности исследования системы с шестью степенями свободы при расчете подвески автотранспортного средства обычно изучают только два вида колебаний его кузова, т.е. рассматривают автомобиль как систему с двумя степенями свободы: линейные колебания вдоль оси Z и угловые колебания вокруг оси Y . Отмеченные типы колебаний имеют первостепенное значение для комфортабельности автотранспортного средства, поскольку именно они вызывают у его водителя и пассажиров наиболее болезненные ощущения. Все это обуслов-

лено большой амплитудой и плохо переносимой направленностью, что, в конечном счете, вызывает повышенную утомляемость и существенно влияет на безопасность дорожного движения. При этом наиболее пагубное влияние оказывает галопирование.

Для определения положения центра упругости (ЦУ) рассмотрим стержень, который опирается на упругие элементы подвески (рис. 2).

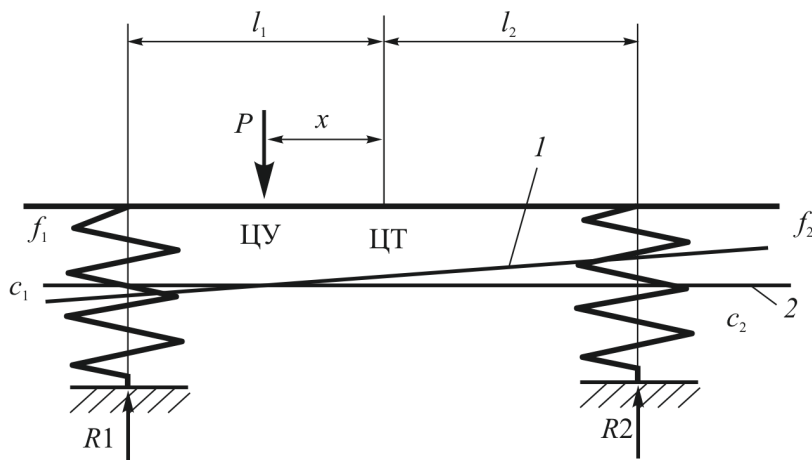


Рис. 2. Схема для определения положения центра упругости системы

Если возмущающая сила P приложена не к центру упругости, а в другой точке, то возникают линейные и угловые перемещения (положение стержня 1 (см. рис. 2)). Если же сила P приложена к центру упругости системы, то происходит только линейное перемещение (положение стержня 2). В последнем случае деформации упругих элементов равны $f_1 = f_2$, вследствие чего галопирование отсутствует.

Определим расстояние от центра тяжести (ЦТ) до ее центра упругости x . Из условия равновесия стержня относительно ЦТ имеем [3]

$$R_1 l_1 - Px - R_2 l_2 = 0, \quad (1)$$

где R_1 и R_2 – реакции опор.

Решим данное уравнение относительно

$$x = (R_1 l_1 - R_2 l_2) / P. \quad (2)$$

Заменим реакции опор $R_1 = c_1 f_1$ и $R_2 = c_2 f_2$, тогда получим

$$P = R_1 + R_2 = c_1 f_1 + c_2 f_2,$$

где c_1 и c_2 – жесткости упругого элемента.

Подставив в уравнение (2) найденные значения R_1 , R_2 и P , находим

$$x = (c_1 f_1 l_1 - c_2 f_2 l_2) / (c_1 f_1 + c_2 f_2).$$

При отсутствии галопирования $f_1 = f_2$, следовательно,

$$x = (c_1 l_1 - c_2 l_2) / (c_1 + c_2).$$

Если расстояние от центра тяжести системы до ее центра упругости равно нулю, т.е. плечо $x = 0$ (ЦТ совпадает с ЦУ), то можно записать $x = (c_1 l_1 - c_2 l_2) / (c_1 + c_2) = 0$. Тогда

$$c_1 l_1 = c_2 l_2 \text{ или } c_1 / c_2 = l_2 / l_1. \quad (3)$$

С другой стороны, указанные расстояния l_1 и l_2 можно выразить через вес автотранспортного средства, который распределяется на переднюю ось G_1 и заднюю ось G_2 , и его базу L :

$$l_1 = (G_2 L / G), \quad l_2 = (G_1 L / G).$$

С учетом этого уравнение (3) может быть записано в следующем виде:

$$c_1 / c_2 = G_1 / G_2. \quad (4)$$

Следовательно, жесткости упругих элементов подвески необходимо выбирать таким образом, чтобы они были обратно пропорциональны расстояниям от центра тяжести до передней и задней осей автомобиля или прямо пропорциональны его весу, который приходится на переднюю и заднюю оси. Тогда при одинаковых прогибах передней (f_1) и задней подвесок (f_2) кузов транспортного средства будет перемещаться вертикально без галопирования.

Оптимизация показателей плавности хода автотранспортных средств может осуществляться по двум основным направлениям: на стадии проектирования и в условиях эксплуатации.

На стадии проектирования, как правило, осуществляется определение оптимальных параметров упругих элементов подвески. В качестве примера нами была проведена проверка упругих элементов подвески автомобиля ВАЗ-2109 на соответствие их характеристик необходимой плавности хода (табл. 1).

При расчете подвески на прочность определяются жесткость, прогибы и напряжения в упругих устройствах, которые испытывают наибольшие динамические нагрузки из всех устройств подвески во время движения автотранспортного средства по неровной дороге [4, 5].

**Исходные данные для расчета упругих элементов подвески
автомобиля ВАЗ 2109**

Наименование упругого элемента	Наружный диаметр пружины D_n , м	Внутренний диаметр пружины d_n , м	Диаметр прутка пружины d_n , м	Рабочее число витков n	Средний диаметр пружины D_{cp} , м
Передняя пружина	0,151	0,9	0,0135	7,5	0,1205
Задняя пружина	0,108	0,85	0,0113	11,5	0,0965

При расчете жесткости пружины используем формулу

$$c = (Gd_n^4)/(8nD_{cp}^3),$$

где G – модуль сдвига (для стали $G = 8...9 \cdot 10^4$ МПа); d_n – диаметр прутка пружины; n – рабочее число витков; D_{cp} – средний диаметр пружины.

Определяем жесткость передней пружины:

$$c_1 = (8 \cdot 10^{10} \cdot 0,0135^4)/(8 \cdot 7,5 \cdot 0,1205^3) = 25311,19 \text{ Н/м};$$

задней пружины:

$$c_2 = (8 \cdot 10^{10} \cdot 0,0113^4)/(8 \cdot 11,5 \cdot 0,0965^3) = 15777,34 \text{ Н/м}.$$

Затем выполним расчет напряжения кручения пружины по формуле

$$\tau_{кр} = (8D_{cp}P_p)/(\pi d^3),$$

где P_p – нагрузка, передаваемая на пружину.

Величина напряжения кручения передней пружины

$$\tau_{кр1} = (8 \cdot 0,1205 \cdot 337,5)/(3,14 \cdot 0,0135^3) = 42113356,57 \text{ Па} = 42,1133 \text{ МПа};$$

задней пружины

$$\tau_{кр2} = (8 \cdot 0,0965 \cdot 332,5)/(3,14 \cdot 0,0113^3) = 56655747,18 \text{ Па} = 56,6557 \text{ МПа}.$$

Результаты расчетов показывают, что передняя и задняя пружины имеют достаточный запас прочности (напряжения кручения не превышают допустимых напряжений $\tau_{кр} = 700...900$ МПа) и соответствуют данному типу автомобиля.

Далее проверим выполнение соотношения (4).

Вес автомобиля, приходящийся на передние пружины, $G_1 = 675$ кг, а вес автомобиля, приходящийся на задние пружины, $G_2 = 665$ кг.

Определяем соотношение параметров жесткости и веса: $0,253/0,141 = 665/675$, откуда следует, что оно не соблюдается.

Чтобы получить оптимально возможную плавность хода, необходимо изменить параметры упругих элементов подвески, которые определяют жесткости последних. В данном случае упругими элементами являются пружины, жесткость которых зависит от нескольких параметров (диаметр проволоки, средний диаметр витка, количество витков и материал, из которого изготовлены пружины).

Вначале определим жесткость $c_{1п}$, которая обеспечивает соблюдение пропорции $c_{1п}/15777,34 = 665/675$:

$$c_{1п} = 15777,34 \cdot 665/675 = 15543,6 \text{ Н/м.}$$

Затем рассчитаем необходимое количество витков передней пружины:

$$n_{1п} = (Gd_n^4)/(8c_{1п}D_{cp}^3) = (8 \cdot 10^{10} \cdot 0,0135^4)/(8 \cdot 15543,6 \cdot 0,1205^3) = 12,2.$$

Рассчитаем жесткость $c_{2п}$, которая необходима для соблюдения пропорции $25311,19/c_{2п} = 665/675$:

$$c_{2п} = 25311,19 \cdot 675/665 = 25691,8 \text{ Н/м.}$$

При подстановке $c_{2п}$ необходимое количество витков задней пружины

$$n_{2п} = (Gd_n^4)/(8c_{2п}D_{cp}^3) = (8 \cdot 10^{10} \cdot 0,0135^4)/(8 \cdot 25691,8 \cdot 0,1205^3) = 7,61.$$

Решить поставленную задачу, изменяя только один из перечисленных параметров упругого элемента подвески, представляется практически невозможным. Поэтому наиболее приемлемым является вариант решения, при котором изменяются два параметра, а именно диаметр проволоки и количество витков пружины.

На стадии эксплуатации, как правило, выполняется подбор упругих элементов подвески на автотранспортные средства, которые сняты с производства или не имеют оригинальных запасных частей. С учетом категории автотранспортного средства и разновидности его подвески следует выполнить расчеты по проверке характеристик упругого элемента, которые отвечают необходимым требованиям плавности хода.

В качестве примера нами была проведена проверка упругих элементов подвески автомобиля ГАЗ 330210 «Газель» (1995 года выпуска) на соответствие их характеристик необходимой плавности хода (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Исходные данные для расчета упругих элементов подвески автомобиля ГАЗ 330210 «Газель» (1995 года выпуска)

Наименование упругого элемента	Длина рессоры l , м	Ширина листа b , м	Толщина листа h , м	Количество листов n
Передняя рессора	1,5	0,075	0,008	4
Задняя рессора	1,5	0,075	0,008	5
Поддрессорник	1,1	0,075	0,008	3

Вес автомобиля, приходящийся на передние рессоры, $G_1 = 1155$ кг, вес автомобиля, приходящийся на задние рессоры, $G_2 = 2345$ кг.

Величину нагрузки на листовую рессору определяем по формуле

$$P_p = R_z - 0,5G_{н.м.}$$

$$P_p = 5660 - 0,5 \cdot 70 \cdot 9,8 = 5317 \text{ Н.}$$

Для расчета жесткости рессоры используем формулу

$$c_p = (Enbh^3)/(4\delta l^3),$$

где E – модуль упругости при растяжении (для стали $E = 2,1 \cdot 10^6$ МПа); n – количество листов; b – ширина листа; h – толщина листа; δ – коэффициент прогиба рессоры ($\delta = 1,25 \dots 1,40$); l – длина рессоры.

Определим жесткость передней рессоры:

$$c_{p,п} = (2,1 \cdot 10^{11} \cdot 4 \cdot 0,075 \cdot 0,008^3)/(4 \cdot 1,32 \cdot 1,5^3) = 18101,01 \text{ Н/м.}$$

Затем выполним расчет прогиба пружины по следующей формуле:

$$f_p = (4\delta l_1 l_2 P_p)/(Enbh^3 l),$$

где l_1 и l_2 – плечи изгиба.

Величина прогиба передней пружины

$$f_{pn} = (4 \cdot 1,32 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 5317)/(2,1 \cdot 10^{12} \cdot 4 \cdot 0,075 \cdot 0,008^3 \cdot 1,5) = 0,03249 \text{ м.}$$

Рассчитаем напряжение изгиба рессоры по формуле

$$\sigma_{изг} = (6l_1 l_2 P_p)/(lnbh^2),$$

где P_p – нагрузка, передаваемая на рессору.

Величина напряжения изгиба передней рессоры

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{изг.п}} &= (6 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 5317) / (1,5 \cdot 4 \cdot 0,075 \cdot 0,008^2) = \\ &= 620316666,7 \text{ Па} = 620,316 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

Далее мы аналогично выполняем расчет прочности задней рессоры.

Результаты расчетов показывают, что передняя и задняя рессоры имеют достаточный запас прочности (напряжения изгиба не превышают допустимых напряжений $\sigma_{\text{изг}} = 800 \dots 1000$ МПа) и соответствуют данному типу автомобиля.

Соотношение параметров жесткости и расстояния от моста до центра тяжести находим из пропорции

$$c_1/c_2 = l_2/l_1.$$

Чтобы найти расстояния от мостов до центра тяжести, необходимо знать базу автомобиля. Допустим, что $l_1 = L - l_2$, тогда $c_1/c_2 = l_2/(L - l_2)$. Из данного уравнения следует, что $l_2 = c_1L/(c_1 + c_2)$. Находим величину $l_2 = 18101,01 \cdot 2,9 / (57050,13 + 18101,01) = 0,70$ м, тогда $l_1 = 2,9 - 0,70 = 2,20$ м.

Подставляем полученные значения в пропорцию:

$$18101,01/57050,13 = 0,70/2,20.$$

Необходимо отметить, что соотношение выполняется.

С целью получения оптимальных характеристик упругих элементов подвески, которая обеспечивает защиту автотранспортного средства от динамических воздействий дороги и сводит колебания и вибрации к приемлемому уровню, а также исключает пагубное воздействие его колебаний на организм человека (явление *галопирования*), нами разработана программа автоматизированного расчета подвески автомобилей [6].

При запуске программы на экране компьютера появляется окно формы «Загрузка».

После его загрузки появляется окно формы «Главное меню» программы (рис. 3), в котором приведены четыре основных типа упругих элементов, которые устанавливаются на современных автомобилях.

Выбор одного из этих упругих элементов позволяет ознакомиться со схематическим его изображением и с основными расчетными формулами. Кнопки «Схематическое изображение» и «Расчет упругого элемента» всплывают при наведении курсора на поле выбора упругого элемента подвески.

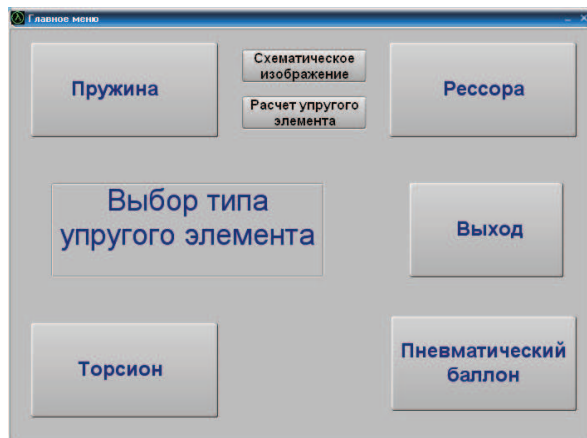


Рис. 3. Главное меню программы

Кнопка «Схематическое изображение» содержит схематическое изображение упругого элемента с расшифровкой всех основных параметров. При нажатии кнопки «Расчет упругого элемента» всплывает окно, которое позволяет ознакомиться с расчетными формулами, ввести значения необходимых исходных данных и получить результаты расчета (рис. 4).

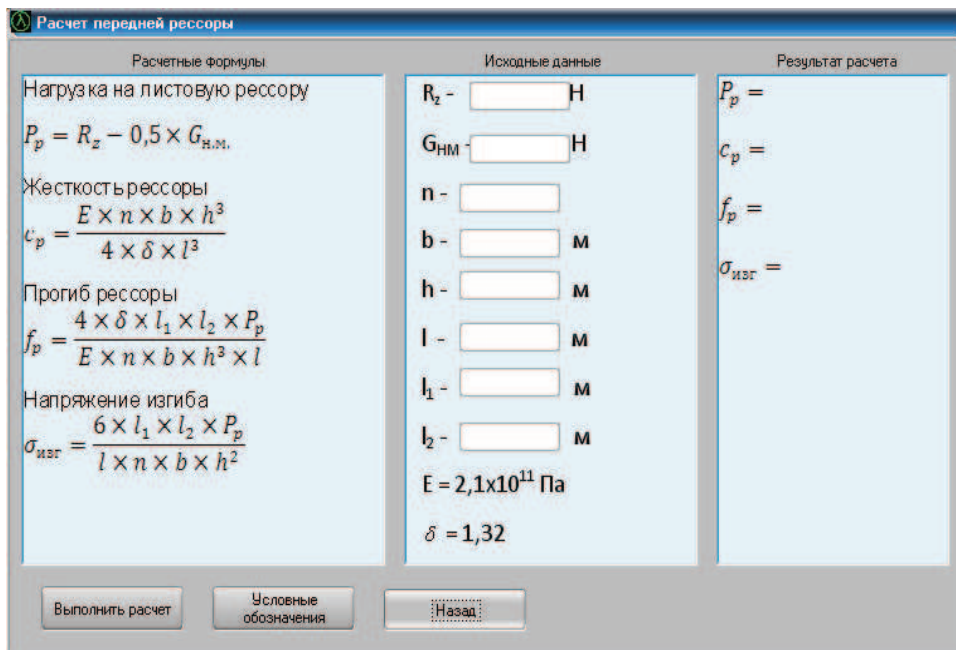


Рис. 4. Фрагмент окна «Расчет передней рессоры»

Упругие элементы «Торсион» и «Пневматический баллон» используются в подвесках современных автомобилей крайне редко, однако нами в программе предусмотрен расчет жесткости данных упругих элементов.

Использование данной программы позволяет производить оптимизацию параметров упругих элементов подвески автотранспортных средств, что будет способствовать повышению плавности хода и улучшению комфортабельности движения в эксплуатационных условиях.

Список литературы

1. Афанасьев Л.Л., Дьяков А.Б., Иларионов В.А. Конструктивная безопасность автомобиля. – М.: Машиностроение, 1983. – 215 с.
2. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
3. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств. – М.: Машиностроение, 1989. – 237 с.
4. Осепчугов В.В., Фрумкин А.К. Автомобиль: Анализ конструкций, элементы расчета. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
5. Вахламов В.К. Автомобили: Конструкция и элементы расчета. – М.: Академия, 2006. – 480 с.
6. Гофман Е.В., Давыдов А.А., Макенов А.А. Выбор оптимальных показателей плавности автотранспортных средств// Вестник ВКГТУ. – У.-Каменогорск, 2010. – № 3 (49). – С. 48–54.

Получено 28.02.2012