

## Инженерный подход к расчету нагрузок при наезде автомобиля на неровность

© Ю.Н. Барышников

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Разработан инженерный метод расчета вертикальных нагрузок, действующих на автомобиль при наезде на неровности дороги. Получены соотношения между высотами неровностей, наезд на которые разными колесами вызывают равноценные нагрузки. На основе линейной модели установлена взаимосвязь между нагрузками, возникающими при наезде автомобиля разными колесами на одинаковые неровности дороги. Практическое значение полученных уравнений состоит в возможности определения нагрузок на автомобиль в различных случаях на основании результатов одного испытания. Полученные результаты могут быть использованы на ранней стадии проектирования автомобилей при расчете на прочность и долговечность их несущих систем.*

**Ключевые слова:** автомобиль, нагрузки, несущая система, математические модели, аналитический расчет.

**Введение.** Определение нагрузок является важной составной частью прочностного анализа любой конструкции, которому уделяется большое внимание во многих областях техники. Например, для самолетов, судов, железнодорожных вагонов и вагонов метро установлены основные нагрузочные режимы и разработаны методики расчета нагрузок, утвержденные соответствующими нормативными документами. В автомобильной промышленности таких нормативов пока нет, что объясняется как многообразием нагрузочных режимов, так и сложностью расчета действующих нагрузок.

Пионерской в этом направлении считается работа [1], в которой автор, исходя из геометрических соотношений, вывел формулы для расчета высоты неровности при наезде на нее разными колесами. Полагая упругие свойства шин и рессор линейными, он предложил линейную зависимость крутящего момента, действующего на автомобиль при наезде на неровность, от ее высоты. Аналогичные зависимости приведены в работе [2], с некоторыми дополнениями формулы [1] вошли в монографии [3] и [4]. В последние десятилетия в связи с появлением класса новых автомобилей возникала необходимость обобщить накопленный опыт и на его основе разработать общий подход к расчету вертикальных нагрузок.

**Аналитический метод расчета нагрузок.** Традиционно расчет нагрузок начинают с определения реакций на оси автомобиля. Все нагрузки от поддресоренных масс приводят к центру масс автомобиля и из уравнений равновесия находят реакции на оси. При движении автомобиля по ровной дороге нагрузки равномерно распределяются

на колеса каждой оси. При наезде на неровность нагрузки перераспределяются, что вызывает кручение несущей системы автомобиля. В частности, при наезде на неровность предельной высоты одно из передних колес теряет контакт с поверхностью дороги. При этом вся нагрузка на переднюю ось передается на другое колесо и крутящий момент достигает максимального значения:

$$M_{\max} = \frac{R_1}{2} r_1, \quad (1)$$

где  $R_1$  — реакции на переднюю ось;  $r_1$  — колея передних колес автомобиля.

Если высота неровности меньше предельной, то определить крутящий момент и нагрузки из уравнений равновесия не представляется возможным. В этом случае для оценки крутящего момента используют линейную гипотезу К. Эрца:

$$M = M_{\max} \frac{h}{H}, \quad (2)$$

где  $H, h$  — высоты предельной и преодолеваемой неровностей.

Как правило, высоту предельной неровности определяют на основе опыта эксплуатации различных транспортных средств [3]. Определим высоту предельной неровности аналитически. Для этого рассмотрим кручение автомобиля при наезде на неровность передним колесом (рисунок).

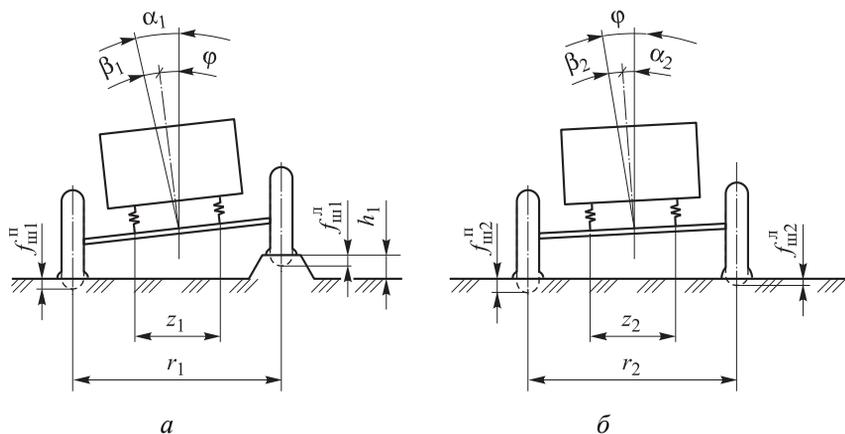


Схема кручения автомобиля при наезде на неровность:  
 а, б — сечения по передней и задней осям соответственно

На рисунке  $h_1$  — высота неровности под передним левым колесом;  $f_{ш}$  — прогиб шин;  $z_1, z_2$  — рессорная колея передней и задней осей (верхние индексы «л» и «п» соответствуют левой и правой сторонам автомобиля).

Пусть жесткость на кручение несущей системы автомобиля велика. Тогда угол крена  $\varphi$  несущей системы можно представить в виде суммы двух угловых перемещений: угла  $\alpha$  — за счет прогибов шин, и угла  $\beta$  — за счет прогибов упругих элементов подвески. Считая все углы малыми, записываем выражения для угла крена  $\varphi$  несущей системы: для передней (см. рис. поз. *а*) и задней (см. рис. поз. *б*) подвесок:

$$\varphi = \alpha_1 - \beta_1; \quad (3)$$

$$\varphi = \alpha_2 + \beta_2. \quad (4)$$

Исключая угол крена  $\varphi$  из уравнений (3) и (4) и выражая угловые перемещения через прогибы шин и рессор подвески, найдем высоту неровности, преодолеваемой передним колесом,

$$h_1 = \Delta_{ш1} + \frac{r_1}{z_1} \Delta_{p1} + \frac{r_1}{r_2} \Delta_{ш2} + \frac{r_1}{z_2} \Delta_{p2}, \quad (5)$$

где  $\Delta_{ш} = |f_{ш}^I - f_{ш}^{II}|$  — относительный прогиб шин;  $\Delta_p = |f_p^I - f_p^{II}|$  — относительный прогиб упругих элементов подвески.

С учетом податливости несущей системы автомобиля на кручение формула (5) примет вид

$$h_1 = \Delta_{ш1} + \frac{r_1}{z_1} \Delta_{p1} + \frac{r_1}{r_2} \Delta_{ш2} + \frac{r_1}{z_2} \Delta_{p2} + r_1 \theta, \quad (6)$$

где  $\theta$  — угол закручивания несущей системы.

Полагая равным нулю прогиб одной из передних шин, из уравнения (6) вычисляем высоту предельной неровности:

$$H = f_{ш1}^{II} + \frac{r_1}{z_1} \Delta_{p1} + \frac{r_1}{r_2} \Delta_{ш2} + \frac{r_1}{z_2} \Delta_{p2} + r_1 \theta. \quad (7)$$

Отметим, что определение высоты предельной неровности связано с предварительным расчетом прогибов всех упругих элементов (рессор, шин и несущей системы). Значения прогибов могут быть получены на основании расчета нагрузок в каждом из них (из уравнений равновесия) и упругих характеристик этих элементов. Исследуем кручение автомобиля при наезде на неровности задним колесом и двумя диагонально расположенными колесами. Используя ту же методику, что при выводе формулы (5), получим формулы для расчета высоты неровности в двух приведенных ниже случаях:

$$h_2 = \frac{r_2}{r_1} \Delta_{ш1} + \frac{r_2}{z_1} \Delta_{p1} + \Delta_{ш2} + \frac{r_2}{z_2} \Delta_{p2} + r_2 \theta; \quad (8)$$

$$h_3 = \frac{r_2}{r_1 + r_2} \Delta_{ш1} + \frac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2) z_1} \Delta_{p1} + \frac{r_1}{r_1 + r_2} \Delta_{ш2} + \frac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2) z_2} \Delta_{p2} + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \theta, \quad (9)$$

где  $h_2$  — высота неровности под задним колесом;  $h_3$  — высота неровности под каждым из диагонально расположенных колес.

Сравнительный анализ формул (5), (8) и (9) показал следующее. Если прогибы упругих элементов подвески и шин, а также угол закручивания несущей системы во всех трех случаях одинаковые, то высоты неровностей связаны между собой следующими соотношениями:

$$h_2 = \frac{r_2}{r_1} h_1; \quad h_3 = \frac{r_2}{r_1 + r_2} h_1. \quad (10)$$

Отсюда получаем

$$h_3 = \frac{r_1}{r_1 + r_2} h_2. \quad (11)$$

Поскольку одинаковые прогибы вызваны действием одинаковых нагрузок, то при наезде на неровности, высоты которых связаны уравнениями (10), на автомобиль действуют равные нагрузки. Полученные соотношения справедливы и для предельных высот, так как нагрузки (крутящий момент) во всех трех случаях равны и достигают максимального значения.

Таким образом, используя уравнения (10), можно определить высоты неровностей, наезд на которые разными колесами вызывает равноценные нагрузки. Кроме того, на основе уравнений (10) можно выполнить сравнительный анализ действующих нагрузок. Например, если колеи передних и задних колес равны ( $r_1 = r_2$ ), то при наезде любым колесом на неровность высотой  $h$  нагрузки будут одинаковыми. Такие же нагрузки будут при наезде на две диагонально расположенные неровности, суммарная высота которых равна  $h$ . Если же колея передних колес больше колеи задних ( $r_1 > r_2$ ), то нагрузки на автомобиль будут меньше при наезде на неровность высотой  $h$  передним колесом, и наоборот.

Поскольку при выводе уравнений (10) использованы только геометрические соотношения, то полученные уравнения справедливы для автомобилей с любыми характеристиками подвесок и шин, в том числе нелинейными.

Особый интерес представляет также сравнительная оценка нагрузок (крутящего момента) при наезде различными колесами автомо-

бия на неровности одинаковой высоты  $h$ . Для этого воспользуемся линейной гипотезой К. Эрца и запишем уравнение (2) для каждого расчетного случая:

$$M_1 = M_{\max} \frac{h}{H_1}; \quad M_2 = M_{\max} \frac{h}{H_2}; \quad M_3 = M_{\max} \frac{h}{H_3}, \quad (12)$$

где  $M_1, M_2, M_3$  — крутящие моменты при наезде на неровность передним, задним и двумя диагонально расположенными колесами соответственно.

Преобразуем два последних уравнения (12) с учетом первого и подставим в них уравнения (9) в форме предельных высот. Получим уравнения связи крутящих моментов, возникающих в различных расчетных случаях:

$$M_2 = \frac{r_1}{r_2} M_1; \quad M_3 = \frac{r_1 + r_2}{r_2} M_1. \quad (13)$$

Из уравнений (13) следует

$$M_3 = \frac{r_1 + r_2}{r_1} M_2. \quad (14)$$

Практическое значение уравнений (13) состоит в возможности определения нагрузок на автомобиль в различных случаях на основании результатов одного испытания. Однако эти уравнения справедливы только для автомобилей с линейными упругими характеристиками подвесок и шин, поскольку получены на основе линейной гипотезы (2).

**Заключение.** Предложен инженерный подход к расчету вертикальных нагрузок, действующих на автомобиль при наезде на неровности дороги. Получены уравнения, позволяющие определять нагрузки при наезде автомобиля на неровности разными колесами на основании результатов одного испытания. Предложенный метод является эффективным инструментом для экспресс-анализа нагрузок, что позволяет уже на ранней стадии проектирования автомобиля проводить многовариантные расчеты несущей системы в целях выбора оптимального конструктивного решения. При таком подходе существенно сокращаются сроки доводки автомобилей и затраты на проведение дорогостоящих испытаний.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Erz K. Über die durch Unebenheiten der Fahrbahn hervorgerufene Verdrehung von Strassenfahrzeugen. *Automobiltechnik Z.*, 1957, vol. 59, no. 4, pp. 89–96.

- [2] Гельфгат Д.Б., Ошноков В.А. *Рама грузовых автомобилей*. Москва, Машгиз, 1959, 232 с.
- [3] Павловский Я. *Автомобильные кузова*. Москва, Машиностроение, 1977, 544 с.
- [4] Тесер Е. *Кузова большегрузных автомобилей*. Москва, Машиностроение, 1979, 232 с.

Статья поступила в редакцию

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Барышников Ю.Н. Инженерный подход к расчету нагрузок при наезде автомобиля на неровность. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 12.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1339.html>

**Барышников Юрий Николаевич** родился в 1954 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1977 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: математическое моделирование автомобильных конструкций. e-mail: [mhts@list.ru](mailto:mhts@list.ru)

## **An engineering approach to load calculations when vehicle runs on the roughness**

© Yu.N. Baryshnikov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article describes an engineering calculation method of vertical loads acting on the vehicle when it runs on the road roughness. We obtained ratios between the heights of the irregularities that cause equivalent loads when different wheels run on them. The interrelation between loads that occur when different wheels are hitting on the same road roughness is established on the base of a linear model. Practical importance of the obtained equations consists in a possibility to determine loads on a vehicle in various cases based of the results of one test. Computational results can be used at the early vehicle design stage in strength and durability calculations of bearing systems.*

**Keywords:** *vehicle, loads, bearing system, mathematical models, analytical calculation.*

### REFERENCES

- [1] Erz K. Über die durch Unebenheiten der Fahrbahn hervorgerufene Verdrehung von Strassenfahrzeugen. *Automobiltechnik Z.*, 1957, vol. 59, no. 4, pp. 89–96.
- [2] Gelfgat D.B., Oshnokov V.A. *Ramy gruzovykh avtomobiley* [Truck Frames]. Moscow, Mashgiz Publ., 1959, 232 p.
- [3] Pavlovsky Ya. *Avtomobilnye kuzova* [Automotive Bodies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 544 p. [in Russian].
- [4] Teser E. *Kuzova bolshegruznykh avtomobiley* [Heavy Hauler Bodies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 232 p. [in Russian].

**Baryshnikov Yu.N.** (b. 1954) graduated from Baumann Moscow Higher Technical School in 1977. Ph.D., assoc. professor of the Theoretical Mechanics Department named after Professor N.E. Zhukovsky at Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of mathematical modeling of car design. e-mail: mhnts@list.ru