

## О СПОСОБАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОПРОФИЛЯ ДОРОГИ НА ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО

*М.И. Абрамов*

На ранних этапах проектирования в процессе оценки нагрузочных характеристик, действующих на транспортное средство, необходимо определить уровень внешнего воздействия со стороны дороги в заданных условиях эксплуатации. Для этого требуется количественная оценка неровностей поверхности дороги и математическое описание микропрофиля дороги.

Ключевые слова: микропрофиль дороги; внешнее воздействие; спектральная плотность; корреляционная функция; транспортное средство.

Для обеспечения необходимых свойств конструкции автомобильного транспортного средства (АТС) при проектировании инженеры всегда опираются на требования, определяемые нормативными документами. Одним из основных свойств является прочность. Требования к обеспечению прочности конструкции изложены в ГОСТ 27609-88 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Основные положения и требования к проведению и нормативно-техническому обеспечению». Данный стандарт определяет основным нормативно-техническим документом «Нормы прочности изделий отрасли». К сожалению, единых норм прочности в автомобилестроении не существует, за исключением автобусов [1].

Важным разделом норм прочности является «Нагрузки и режимы функционирования», где устанавливаются конкретные виды и характеристики внешних воздействий и нагрузок, связанные с внешними условиями среды. Для АТС основными внешними условиями являются дорожно-скоростные режимы: характеристики дорожных неровностей и максимально допустимая скорость движения. Именно эти параметры определяют уровень и частотный состав эксплуатационных нагрузок, которые приводят к отказам по прочности – статической или усталостной.

К настоящему времени невозможно перечислить всех работ, посвященных исследованиям и предложениям по обеспечению прочности автомобильных конструкций. Однако, не смотря на многочисленность упомянутых работ – расчетных или экспериментальных – основная сущность их сводится к тому, чтобы напрямую получить количественные характеристики прочности (деформации и напряжения), минуя предшествующее им важное звено – предельные количественные характеристики внешних экс-

плуатационных факторов (дорожных неровностей) и действующих эксплуатационных нагрузок. Как правило, внешние эксплуатационные факторы описываются качественно: цементобетонные, булыжные, щебеночные, грунтовые дороги и т.д. Действующие при этом нагрузки вообще остаются в стороне. В виде исключения можно привести полигонные испытания, где дороги заранее профилированы. Однако, во-первых, до настоящего времени не решен вопрос о соответствии полигонных условий нагружения условиям реальной эксплуатации, во-вторых, при движении по дорогам полигона действующие нагрузки, как правило, не определяются, за исключением вопросов плавности хода, где действующие виброускорения непосредственно являются критериальными величинами. Идеологическим обоснованием такого подхода является утверждение Н.Н. Яценко: «Установить связь напряжений в отдельных сечениях рамы с прикладываемыми усилиями или наблюдаемыми деформациями ... весьма сложно. Сложность взаимодействия элементов конструкции рамы, конфигурации их, наличие многочисленных концентраторов напряжений, неопределенность предварительных напряжений в сочленениях делают практически невозможным теоретическое построение достаточно надежных формул для расчета напряжений и определения опасных сечений. Поэтому действительные напряжения находят экспериментальными методами с помощью тензометрирования» [2]. Не смотря на правомерность данного тезиса основной недостаток вышеизложенного подхода заключается в том, что (несмотря на значительный объем экспериментальных данных для конкретного образца АТС) их практически невозможно использовать даже для его модификаций, не говоря уже об обобщении и распространении на аналогичные типы. Это объясняется тем, что деформации или напряжения являются весьма неоднородной функцией и, кроме того, обладают «тонкой» структурой, т.е. при небольшом изменении нагрузок могут значительно менять свои числовые характеристики. Тем самым резко сужается возможность накопления, обобщения и использования результатов ранее проведенных работ на этапе проектирования будущих образцов АТС. Но практика создания сложных машиностроительных конструкций показывает, что наиболее целесообразна и экономически выгодна такая схема работ, где прочность и долговечность конструкции закладывается при проектировании, подтверждается и доводится до требуемого уровня на стадии экспериментальной отработки и поддерживается на достаточном уровне при серийном производстве. Не противопоставляя указанные выше стадии и этапы, необходимо отметить, что проектирование является важнейшим звеном общего процесса, поскольку никакими, сколь угодно длительными и сложными доводочными испытаниями невозможно исправить грубых конструкторских просчетов, если такие имеют место при проектировании.

С широким внедрением компьютерных технологий появились новые, ранее неосуществимые, проектные возможности оценки нагруженности, прочности и долговечности конструкций АТС в замкнутой форме (абсолютном виде), т.е. с получением оценок по величинам коэффициентам запаса. Наиболее узким местом при проведении таких оценок является выбор и принятие решения по числовым характеристикам внешних воздействий, т.е. по характеристикам неровностей дорог предполагаемой схемы эксплуатации. Поэтому в данной работе проведено обобщение известных накопленных данных по неровностям различных дорог, и разработаны предложения по нормированию внешнего воздействия на АТС для анализа динамики, нагруженности и прочности его конструкции на этапе проектирования.

Для оценки внешнего воздействия как нагрузки, действующей на АТС, необходимо иметь представление о микропрофиле дороги. Под дорогой понимаются инженерные сооружения, обеспечивающие пропускную способность транспортного потока. Под микропрофилем дороги понимаются такие неровности, которые вызывают колебания поддресоренных и неподдресоренных частей АТС на элементах подвески. Неровности дороги, не вызывающие колебаний подвески и гасящиеся в шине, при оценке микропрофиля дороги не принимаются во внимание. Для грузовых АТС, колебания вызываются дорожными неровностями, длина волн которых находится в диапазоне 0,2–30 м.

Характеристики микропрофиля могут быть определены только экспериментально. Бурное развитие и накопление экспериментальных данных по характеристикам микропрофилей дорог происходило в 60–80-х годах прошлого столетия, что, по-видимому, связано с широким внедрением методов статистической динамики применительно к исследованию сложных механических систем.

Микропрофиль неровностей  $q$  определяют как функцию пути (расстояния)  $l$ , т.е.  $q(l)$ . При этом внешнее воздействие определяется выражением:

$$q(l/v) = q(t), \quad (1)$$

где  $t$  – время, сек;  $v$  – скорость движения АТС, м/сек.

В подавляющем большинстве работ микропрофиль представляется как стационарная случайная функция с нормальным законом распределения. При постоянной скорости движения АТС, по какой либо дороге. Внешнее возмущение также будет представлять реализацию стационарного случайного процесса с нормальным законом распределения. При этих предположениях необходимыми и достаточными характеристиками неровностей микропрофиля является либо спектральная плотность мощности (СПМ)  $G_q(f)$ ,  $G_q(n)$ , либо корреляционная функция  $R_q(\tau)$ ,  $R_q(\delta)$ . Эти СПМ и соответствующие им корреляционные функции связаны зависимостями:

$$G_q(f) = \frac{1}{v} G_q(n), \quad (2)$$

$$R_q(\tau) = R_q(\delta) \text{ при } \delta = v \cdot \tau, \quad (3)$$

где  $f$  – частота внешнего возмущения, Гц;  $n$  – дорожная частота или волновое число, цикл/м;  $\tau$  – время корреляции, с;  $\delta$  – интервал корреляции, м.

Непосредственно СПМ и корреляционная функция связаны между собой преобразованием Фурье:

$$G_q(n) \Leftrightarrow R_q(\delta), \quad (4)$$

где символом  $\Leftrightarrow$  обозначена пара преобразований Фурье.

Переход от расстояния  $l$  и времени  $t$  в частотную область осуществляется с использованием очевидных преобразований:

$$n = l/\lambda; \quad (5)$$

$$f = n \cdot v, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – длина волны неровностей, м.

С математической точки зрения удобнее использовать круговые частоты, которые определяются как:

$$\Omega = 2\pi \cdot n; \quad (7)$$

$$\omega = 2\pi \cdot f, \quad (8)$$

где  $\Omega$  – круговая дорожная частота, рад/м;  $\omega$  – круговая частота внешнего возмущения, рад/сек.

До появления в 70-х годах алгоритмов быстрого преобразования Фурье основная характеристика дорожного возмущения – спектральная плотность мощности  $G_q(f)$  – оценивалась путем преобразования Фурье корреляционной функции  $R_q(\tau)$ , которая аппроксимировалась различными аналитическими функциями. Для микропрофиля в большинстве случаев использовалась зависимость вида:

$$R_q(\delta) = S_q^2 \sum_{i=1}^m A_i e^{-\alpha_i |\delta|} \cdot \cos \beta_i \delta, \quad (9)$$

где  $S_q$  – среднее квадратическое значение ординат микропрофиля;  $A_i$  – весовые множители ( $\sum_{i=1}^m A_i = 1$ );  $\alpha_i$  – коэффициенты, характеризующие затухание корреляционной функции;  $\beta_i$  – коэффициенты, характеризующие периодическую составляющую микропрофиля.

На основании данной модели накоплено достаточно большое количество экспериментальных данных по различным типам дорожного покрытия (цементобетон, асфальтобетон, грунт, булыжник).

В последующие годы алгоритм определения СПМ микропрофиля дороги основывался на быстром преобразовании Фурье (БПФ) с использованием метода Уэлча. При этом аппроксимация СПМ описывается степенным уравнением вида [3].

$$\begin{aligned} G_q(n) &= G(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w_1} \quad \text{при } n \leq n_0; \\ G_q(n) &= G(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w_2} \quad \text{при } n \geq n_0, \end{aligned} \quad (10)$$

или в более простом виде:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w}, \quad (11)$$

где  $G(n_0)$  – «коэффициент неровностей», представляющий собой значение СПМ на дорожной частоте  $n_0$ .

В настоящее время степенная аппроксимация является основной как в отечественной и зарубежной литературе, так и в нормативной документации. К сожалению, в технической литературе для дорог РФ экспериментальные данные по данной модели микропрофиля освещены очень скудно.

Таким образом, существует две модели, описывающие микропрофиль дороги через СПМ. Одна модель позволяет получить СПМ микропрофиля через корреляционную функцию при помощи преобразования Фурье (модель 1). Другая модель позволяет получить СПМ напрямую с использованием БПФ (модель 2). Учитывая тот факт, что корреляционная функция является явно нелинейной характеристикой из-за своей периодической составляющей, то очевидно, что при переходе в частотную область будет иметь место определенная погрешность в значении СПМ. При этом основной массив экспериментальных данных по микропрофилям дорог РФ накоплен для модели 1. Допустимо ли объединять массивы данных по двум моделям микропрофилей в целях дальнейшей их систематизации и использования в расчетных оценках?

Для анализа представленных моделей была проведена обработка имеющихся измерений микропрофиля дорог с различным типом покрытия (асфальтовое шоссе; булыжная дорога; грунтовая дорога, укрепленная булыжником и песком). Измеренные процессы центрировались, а затем фильтровались фильтром низких частот (ФНЧ). Частота среза фильтра определялась максимальной длиной дорожной волны  $\lambda_{\max} = 30$  м. Для построения СПМ минимальная длина волны на основании теоремы Котельникова определялась по двум точкам, т.е. по двум дискретным отрезкам измеренных процессов. Результаты обработки для каждого типа покрытия представлены на рисунках 1–3.

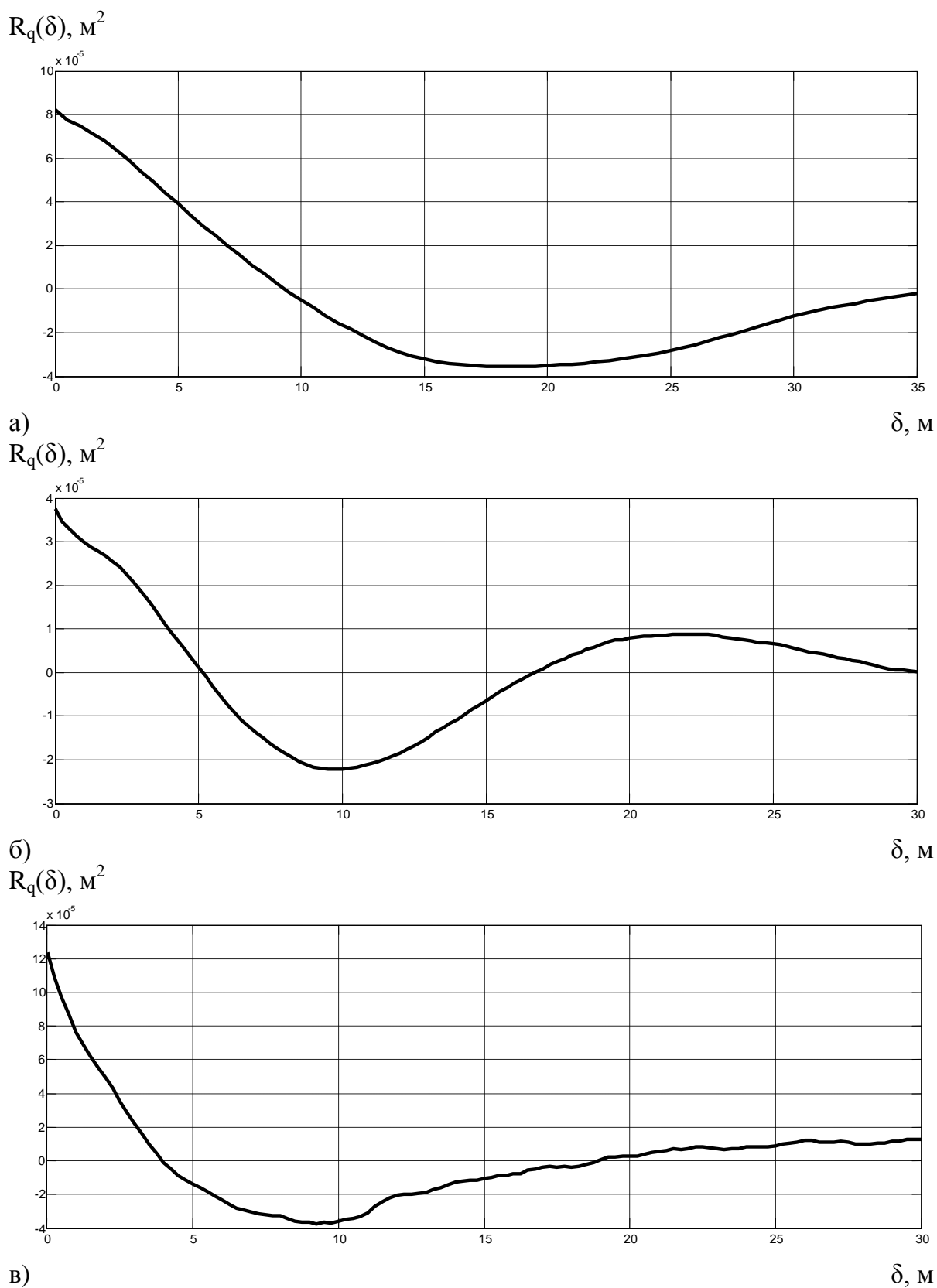
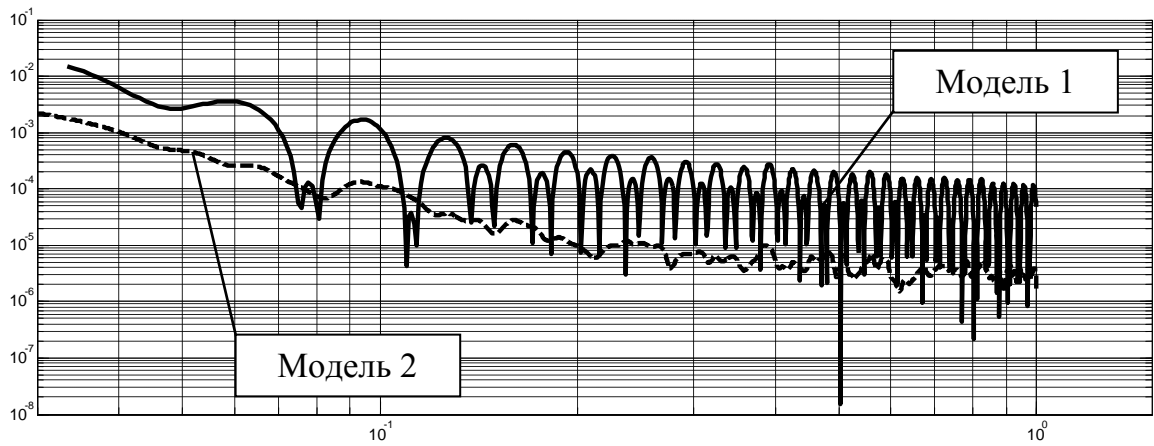


Рис. 1. Корреляционная функция микропрофиля:  
а) асфальт; б) булыжник; в) щебень

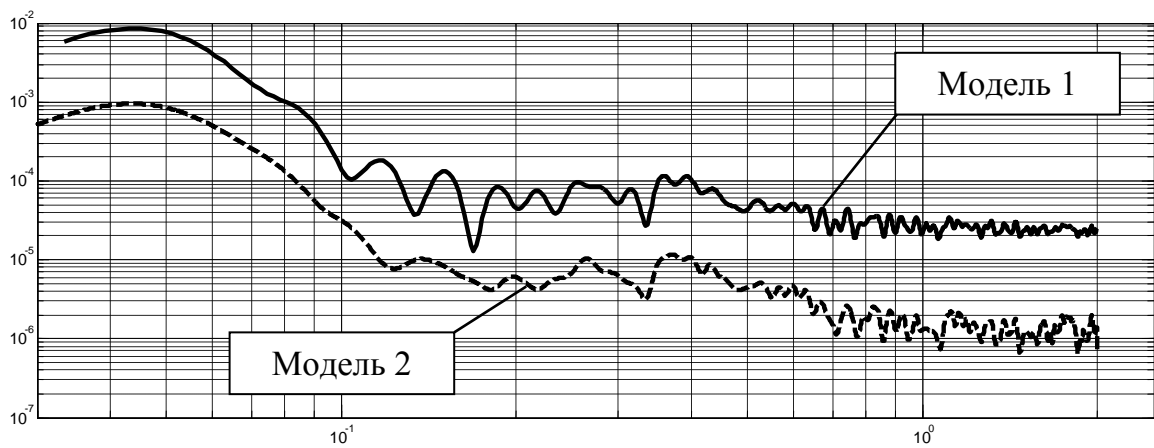
$G_q(n)$ , м<sup>3</sup>/цикл



а)

$n$ , цикл/м

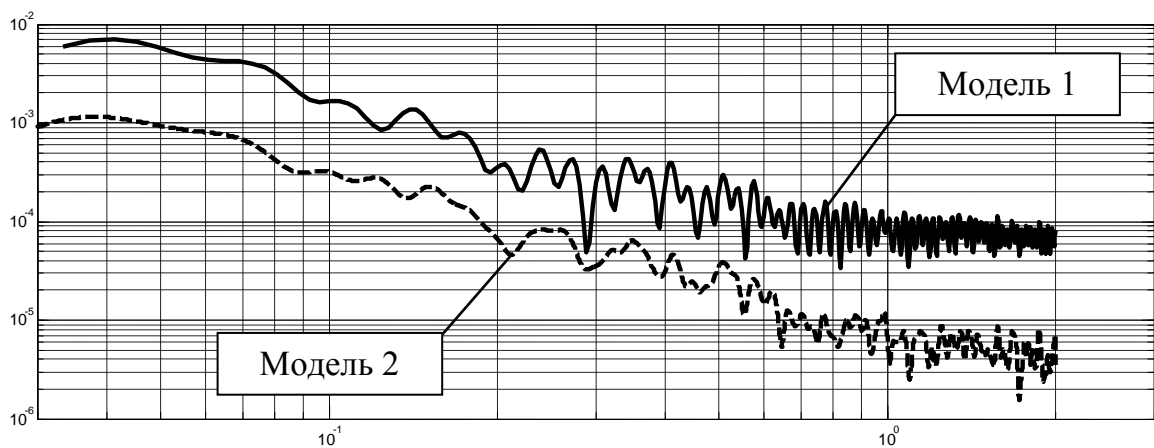
$G_q(n)$ , м<sup>3</sup>/цикл



б)

$n$ , цикл/м

$G_q(n)$ , м<sup>3</sup>/цикл



в)

$n$ , цикл/м

Рис. 2. Спектральная плотность мощности микропрофиля, полученная по двум моделям: а) асфальт; б) булыжник; в) щебень

Как видно из графиков имеется расхождение между характеристиками СПМ, полученными по модели 1 и 2. Данное расхождение, как уже говорилось выше, вызвано нелинейностью модели 1.

В целом это говорит о невозможности обобщения экспериментальных данных по двум моделям. При этом остается актуальным вопрос: как оценить диапазон изменения СПМ для различных типов микропрофилей?

В связи с вышеизложенным, каждое предприятие, специализирующееся на выпуске определенного класса АТС, вынуждено разрабатывать собственные методики и руководства по расчету и экспериментальной доводке конструкции. При этом комплексный подход и нормирование в данной области могли бы существенно облегчить решаемые задачи отечественных производителей АТС.

#### Библиографический список

1. Григалюк, Э.И. Нормирование прочности несущих систем автобусов / Э.И. Григалюк, Е.А. Коган, Н.А. Кулаков. – М.: МГААТМ, 1994. – 132 с.
2. Яценко, Н.Н. Колебания, прочность и форсированные испытания грузовых автомобилей / Н.Н. Яценко. – М.: Машиностроение, 1972. – 372 с.
- 3 Вибрация. Профили дорожных покрытий. Представление результатов измерений: Международный стандарт ISO 8608. – Женева: Международная организация по стандартизации, 1995. – 30 с.

[К содержанию](#)