

УДК 625.032

С. А. Соколовский, В. Б. Коханенко, А. М. Яковлев

## ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СГЛАЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ШИН

*Обобщены результаты анализа публикаций теоретических и экспериментальных исследований сглаживающей способности пневматических шин. Определено, что в оценивании сглаживающей способности шины исследователи больше всего используют модель постоянного сглаживания, которая строится на процедуре осреднения удельных упругодемпфирующих характеристик шины либо исходного микропрофиля дороги на постоянном интервале.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* пневматическая шина, деформация, сглаживающая способность, демпфирующие элементы, режимы нагружения колеса, колебательная система, микропрофиль дороги.

**Постановка проблемы.** Пневматические шины существенно влияют на основные эксплуатационные характеристики автомобиля: тяговые и тормозные свойства, управляемость, устойчивость, шум, топливная экономичность, а также плавность хода. При исследовании влияния свойств и параметров пневматических шин на характеристики автомобиля используют экспериментальные и теоретические методы анализа динамической системы “дорога–шина–автомобиль”.

Современные методы разработки и доводки автомобильной техники, ориентированные на широкое применение вычислительной техники и систем автоматизированного проектирования, позволяют уже на стадии проектного задания исследовать и совершенствовать системы поддрессоривания и виброзащиты, а также оценивать показатели и характеристики плавности хода и нагруженности несущей системы. Однако узким местом использования программных систем по-прежнему является отсутствие адекватных, теоретически и экспериментально обоснованных моделей, учитывающих преобразующие свойства пневматической шины и, особенно, ее сглаживающую способность.

Актуальной является перспективная задача, связанная с исследованием и конструированием шин, способных частично или даже полностью взять на себя функции подвески за счет значительного проявления сглаживающего эффекта и возможности воспринимать и рассеивать энергию от воздействия неровностей дороги. Актуальность проблемы также обусловлена потребностями форсированных испытаний автомобилей на специальных дорогах автополигонов.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Сглаживающая способность пневматических шин изложена в работах [1–8].

**Постановка задачи.** В исследованиях плавности хода и вибронгруженности автомобилей для повышения достоверности расчетов, особенно ускорений неподрессоренных масс и прогибов шины, следует учитывать сглаживающую способность шин. Разрабатывая новую модель сглаживающей способности пневматической шины, необходимо учитывать своеобразие взаимодействия эластичной шины с неровностями дороги. Также следует учитывать динамику изменения длины отпечатка шины при моделировании ее сглаживающей способности.

**Изложение основного материала.** Первоначально под сглаживающей способностью шины подразумевали процесс изменения траектории оси колеса и сил, действующих на неподрессоренные массы при обкатывании колесом с эластичной шиной отдельных неровностей дороги различной высоты и конфигурации. В дальнейшем исследования процессов взаимодействия колеса с пневматической шиной и неровностями дорожного полотна показали, что данное свойство колеса следует называть нивелирующей способностью [2], которая интегрирует в себе сглаживающую способность шины и обкатывающую (обтекающую) способность самого колеса.

Исследования обтекающей способности автомобильного колеса (как жесткого, так и эластичного) представляют интерес для определения загрузки и плавности хода транспортных машин и тракторов, эксплуатируемых по бездорожью, и в настоящее время практически завершены работами ученых (А. К. Бируля, А. К. Фрумкин, В. А. Щетина, В. М. Гольдштейн, Г. Д. Гродский, Р. Л. Гуслицер, К. Klorper, Н. Moppert, М. Julien, I. Paulsen и др.).

Проблема учета сглаживающей способности шины имеет короткую историю своего развития. Это связано, в первую очередь, со значительной сложностью рассматриваемой проблемы в теоретическом описании этого эффекта пневматической шины и в экспериментальной проверке выявленных закономерностей, а также в неизбежном изменении параметров колебательной системы, в состав которой шина входит как упругий и демпфирующий элемент.

Под сглаживающей способностью шины сегодня понимают свойство шины уменьшать подъем оси колеса по сравнению с высотой преодолеваемой неровности и увеличивать зону действия неровности на колесо [3]. При этом качение колеса по неровностям дороги сопровождается смещением границ начала и окончания взаимодействия элементов шины с неровностями относительно их действительных границ, смещением взаимодействующих элементов шины относительно их вертикали, проходящей через ось, и одновременно взаимодействием шины с несколькими последовательно расположенными неровностями в зоне контакта [1].

Э. И. Толстопятенко в работе [4] первым предпринял попытку оценить влияние сглаживающего эффекта пневматической шины на амплитудно-частотную характеристику одномассовой колебательной системы, эквивалентной передней части землеройно-транспортной машины. Автор предположил, что в пятне контакта шины отрыва протектора от неровностей дороги не происходит, скорость качения колеса постоянна, жесткость элементов шины по периметру колеса неизменна, а длина пятна контакта постоянна. В одномассовой колебательной системе шина представляется бесконечным множеством эквивалентных пружин, заменяющих ее опорную часть – протектор (рис. 1).

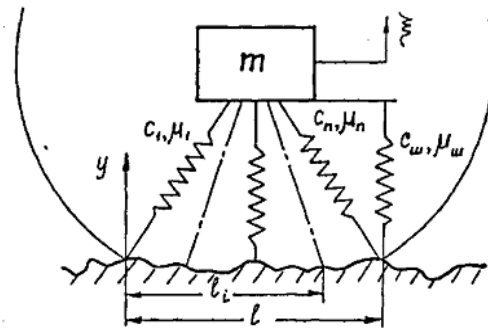


Рис. 1. Схема эквивалентной одномассовой колебательной системы:  
 $l_i$  – расстояние до  $i$ -го элемента;  $l$  – длина отпечатка шины [4]

Дифференциальное уравнение движения такой одномассовой системы имеет вид:

$$m \cdot \ddot{\xi}_{ш} - \sum_{i=1}^{\infty} (\dot{y}_i - \dot{\xi}_{ш}) \cdot \mu_i + \sum_{i=1}^{\infty} (y_i - \xi_{ш}) \cdot c_i = 0, \quad (1)$$

где  $m$  – часть массы шины, приведенная к центру колеса;  $\xi_{ш}, \dot{\xi}_{ш}, \ddot{\xi}_{ш}$  – вертикальные перемещение, скорость и ускорение центра колеса;  $y, \dot{y}$  – вертикальные смещение и скорость смещения профиля дороги;  $c$  – коэффициент нормальной жесткости эквивалентной пружины;  $\mu$  – коэффициент неупругого сопротивления эквивалентной пружины.

Учитывая, что  $\sum_{i=1}^{\infty} \mu_i = \mu_{ш}, \sum_{i=1}^{\infty} c_i = c_{ш}$ , где  $c_{ш}, \mu_{ш}$  – коэффициенты жесткости и неупругого сопротивления шины, а также принимая прямоугольный закон распределения упругих и демпфирующих элементов в зоне контакта и постоянство их характеристик по длине контакта, автор получил выражение амплитудно-частотной характеристики в виде:

$$\left| W(i, \omega) \right|_{\xi_{ш}/y} = \left| \left( \frac{2 \cdot V}{\omega \cdot l} \cdot \sin \frac{\omega \cdot l}{2 \cdot V} \right) \cdot \omega^2 \cdot \sqrt{\frac{c_{ш}^2 + \mu_{ш}^2 \cdot \omega^2}{(c_{ш} - m \cdot \omega^2)^2 + \mu_{ш} \cdot \omega^2}} \right|, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость продольного качения колеса;  $\omega$  – условная собственная частота колебаний системы.

Первую часть зависимости (2) можно записать как произведение двух составляющих:

$$|W(i \cdot \omega)|_{\xi_{uu}}^y = |K(V, \omega)| \cdot |R(i \cdot \omega)|, \quad (3)$$

где  $|R(i \cdot \omega)|$  – амплитудно-частотная характеристика колебательной системы без учета сглаживающего эффекта шины;  $|K(V, \omega)|$  – функция (оператор) сглаживания, равная

$$|K(V, \omega)| = \frac{2 \cdot V}{\omega \cdot l} \cdot \sin \frac{\omega \cdot l}{2 \cdot V}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлены графики функций  $|R(i \cdot \omega)|$  и  $|K(V, \omega)|$  для колебательной системы, эквивалентной передней части скрепера типа Hancock 12E2E при скорости качения колеса 2 м/с.

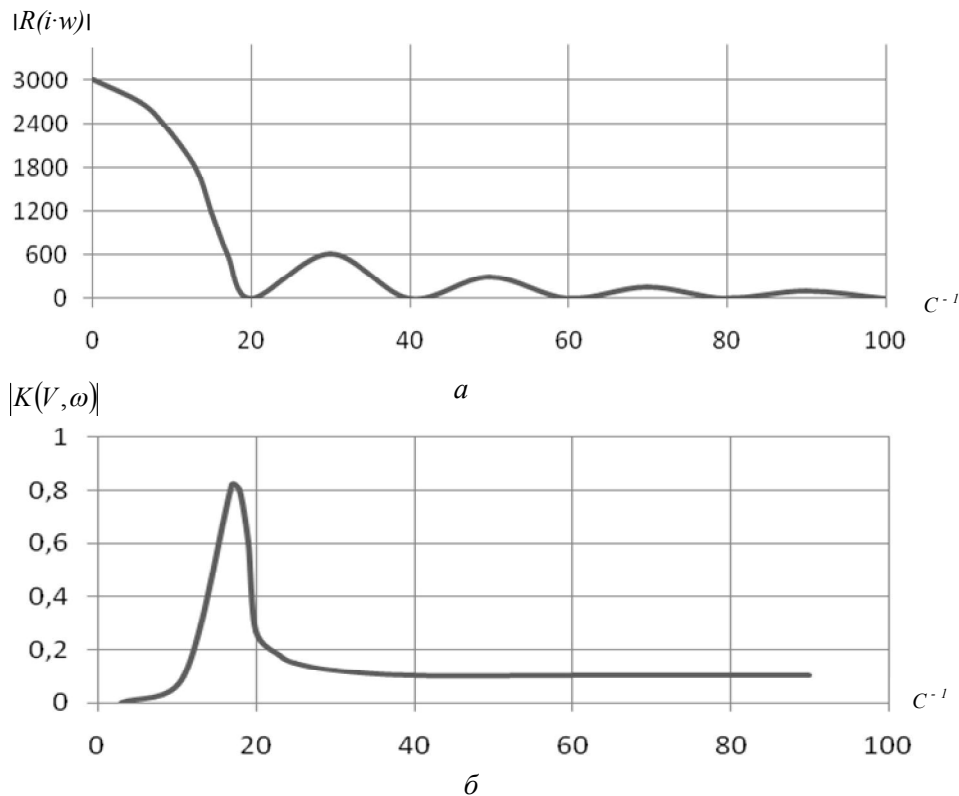


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики колебательной системы, эквивалентной передней части самоходного скрепера типа Hancock 12E2E:

*a* – без учета сглаживания; *б* – функция сглаживания [4]

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- представленная на рис. 1 модель шины позволяет вывести уравнение колебаний системы, эквивалентной передней (задней) части землеройно-транспортной машины, с учетом сглаживающей способности шины;
- амплитудно-частотная характеристика такой колебательной системы зависит от скорости движения вследствие учета сглаживающего эффекта шины;
- сглаживающая способность шины оказывает существенное влияние на колебания машины при движении на малых скоростях (до 20 км/ч).

Несколько иной подход к оцениванию сглаживающей способности пневматической шины при взаимодействии с неровной дорогой случайного микропрофиля предложен в работах Н. Н. Яценко [1; 5]. При тех же допущениях о безотрывном качении колеса с постоянной скоростью и неизменной длине пятна контакта шины с дорогой шина моделируется как тонкая, идеально эластичная оболочка,

плотно облегающая каждую неровность в зоне контакта, с характеристиками упругости и демпфирования сосредоточенного элемента (рис. 3).

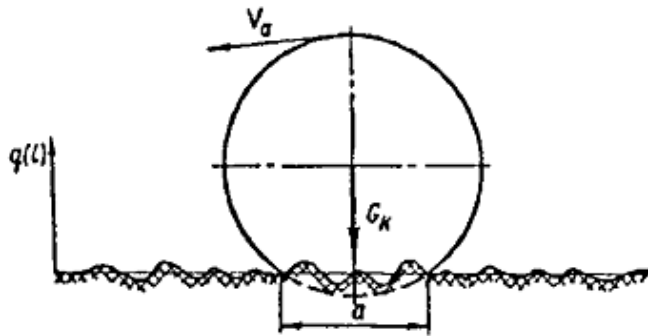


Рис. 3. Схема взаимодействия колеса с пневматической шиной и дороги с короткими неровностями [5]

Для плоского сечения такой модели шины вертикальное воздействие дороги на колесо выражается средним значением функции исходного микропрофиля  $q(l)$  на длине отпечатка шины  $a$ :

$$q_{сз}(l) = \frac{1}{a} \cdot \int_{l-a/2}^{l+a/2} q(l) dl, \quad (5)$$

где  $q_{сз}(l)$  – функция сглаженного шиной микропрофиля.

Принимая соотношение (5) за математическую модель сглаживающей способности шины, были определены статические характеристики микропрофиля дороги (корреляционная функция и спектральная плотность) с учетом эффекта сглаживания. Выполненные преобразования позволили вывести следующее соотношение:

$$S_{q_{сз}}(\lambda, a) = \frac{2}{\lambda^2 \cdot a^2} \cdot (1 - \cos \lambda a) \cdot S_q(\lambda), \quad (6)$$

где  $S_q(\lambda)$  – спектральная плотность исходного микропрофиля;  $S_{q_{сз}}(\lambda, a)$  – спектральная плотность сглаженного микропрофиля;  $\lambda$  – волновая частота.

Как пример на рис. 4 изображен эффект сглаживания при расчете спектральной плотности микропрофиля специальной дороги автополигона для двух шин разной размерности.

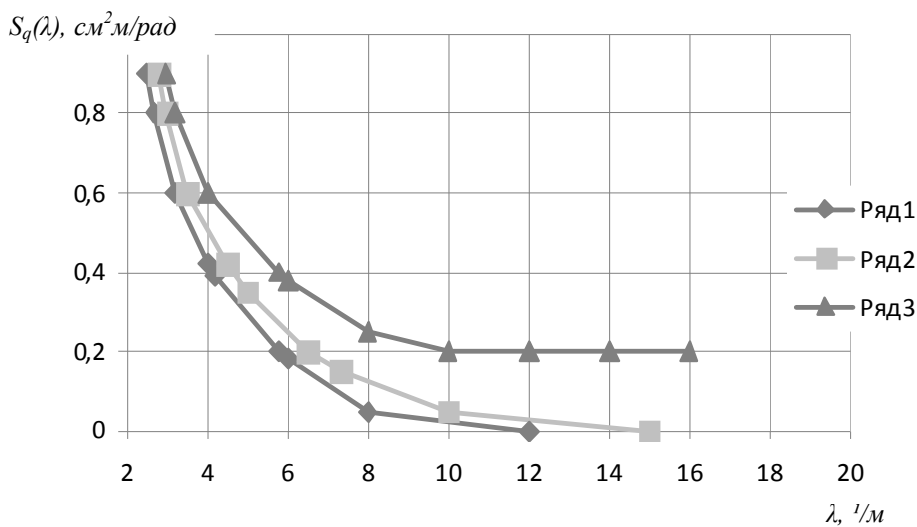


Рис. 4. Спектральные плотности микропрофиля специальной дороги из крупного булыжника:  
Ряд 1 – сглаженного шиной 15.00 – 20; Ряд 2 – сглаженного шиной 12.00 – 18;  
Ряд 3 – без учета сглаживающей способности шины [6]

Таким образом, в данном исследовании эффект постоянного сглаживания пневматической шины реализуется путем коррекции характеристик исходного микропрофиля дороги, а не амплитудно-частотных характеристик колебательных систем автомобиля, в состав которых входит шина. Учет постоянного сглаживания путем коррекции амплитудно-частотных характеристик равносильен введению в колебательную систему нового звена, что не менее целесообразно в силу устоявшихся представлений об эквивалентных колебательных системах автомобиля и его подвески.

Основным недостатком рассмотренных моделей постоянного сглаживания пневматической шины, построенных на осреднении микропрофиля и его воздействия [5] либо характеристик упругости и демпфирования [4] по длине отпечатка, является то, что введение этих моделей в расчет приводит к появлению нолей на графиках спектральных плотностей реакций эквивалентных колебательных систем, не подтверждаемых экспериментально. Поэтому в ряде исследований сделана попытка учесть динамику изменения пятна контакта шины, в частности, его длины при движении автомобиля по неровным дорогам.

В работе В. С. Васильева [7] и других подход к учету эффекта сглаживания шиной неровностей дороги основан на осреднении упругих характеристик шины по длине отпечатка, принимаемого постоянным при движении машины.

Частотная характеристика сглаживающего преобразования имеет вид:

$$H_{ш}(\lambda \cdot l_0) = \left| \frac{\sin \lambda l_0}{\lambda \cdot l_0} \right|, \quad (7)$$

где  $\lambda = \frac{2\pi}{l_n}$  – дорожная (волновая) частота;  $l_n$  – длина волны неровности;  $2l_0$  – длина отпечатка шины с дорогой ( $2l_0 = \text{const}$ ).

Чтобы учесть динамику изменения длины пятна контакта шины, авторы предложили сгладить амплитудно-частотную характеристику эффекта (7) уравнением огибающей вида:

$$H_{ш}(j \cdot \lambda_0) = \frac{\lambda_n}{j \cdot \lambda + \lambda_g}, \quad (8)$$

где  $\lambda_g = 1/l_0$  – волновая частота, соответствующая длине волны  $l_0$ .

Для проверки модели сглаживающего эффекта шины вида (8) были проведены исследования колебаний автомобиля ЗИЛ-130 на специальных дорогах автополигона НИЦИАМТа [8]. Исследования показали, что целесообразность учета сглаживающей способности шин зависит от передаточной функции динамической системы, эквивалентной реальному автомобилю. Было установлено, что при малых скоростях движения  $V_a$  сглаживающая способность шины влияет на параметры колебаний: ускорения масс, деформации шин и др.; при больших скоростях сглаживающая способность шины практически не отражается на колебаниях автомобиля, т. к. он реагирует на неровности, длина которых больше  $l_n = 2 \cdot \pi / \lambda_0$ .

Скорость автомобиля, до которой следует учитывать сглаживающую способность шины, равна:

$$V_a = 0,9 \cdot \omega_m \cdot l_0, \quad (9)$$

где  $\omega_m$  – максимальная частота в спектре возмущения, на которую реагирует система.

На **рис. 5** показано влияние сглаживающего эффекта шины на вертикальные ускорения точки кузова над задней осью порожнего автомобиля ЗИЛ-130. Как видно, учет сглаживающей способности шины при  $V_a \leq 35$  км/ч уменьшает среднее квадратическое вертикальных ускорений. При этом сходимость результатов расчета и эксперимента при малых скоростях улучшается.

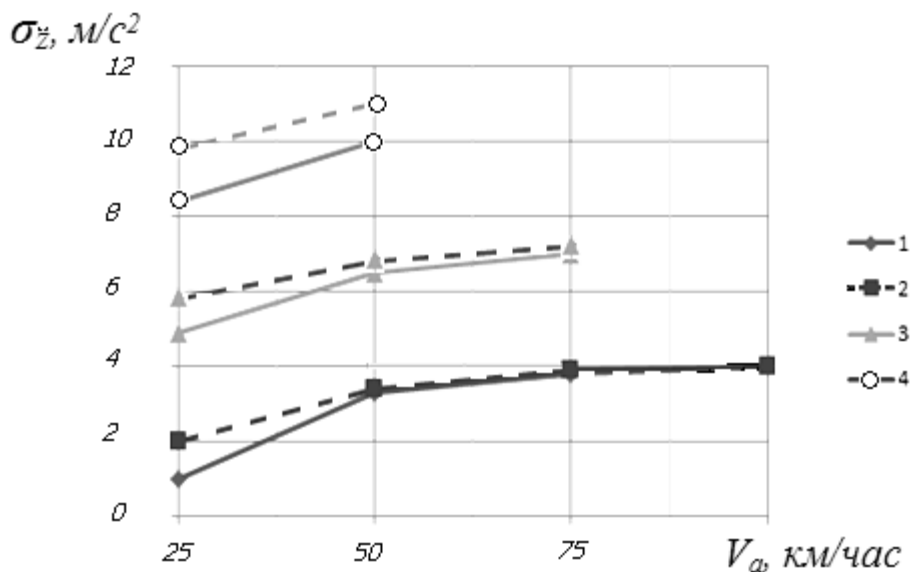


Рис. 5. Влияние сглаживающей способности шины на ускорения передних подрессорных масс автомобиля ЗИЛ-130: 1 – асфальтированное шоссе с учетом сглаживания; 2 – покрытие дороги без учета сглаживания; 3 – разбитая бульжная дорога с учетом сглаживания; 4 – бульжная дорога в удовлетворительном состоянии с учетом сглаживания [8]

### Выводы

Обобщая результаты критического анализа публикаций теоретических и экспериментальных исследований сглаживающей способности пневматических шин, в том числе и касающихся моделирования эффекта сглаживания шиной неровностей дороги, можно сделать следующие выводы.

1. В большинстве случаев при исследовании плавности хода и вибронагруженности автомобилей сглаживающую способность не учитывают, что существенно снижает достоверность расчетов (особенно ускорений неподдресоренных масс и прогибов шины).

2. Для оценивания сглаживающей способности шины исследователи больше всего используют модель постоянного сглаживания, которая строится на процедуре осреднения удельных упругодемпфирующих характеристик шины либо исходного микропрофиля дороги на постоянном интервале, равном длине отпечатка шины при номинальной нагрузке на колесо.

3. Модель постоянного сглаживания позволяет улучшить сходимость расчетных данных с экспериментальными в исследовании колебаний автомобиля. Однако реальное поведение шины при качении колеса по неровностям дороги характеризуется интенсивным изменением ее радиальной деформации и отличается от усредненного статического представления, реализованного в модели.

4. Попытки учета динамики изменения длины отпечатка в моделировании сглаживающей способности шины реализованы только для частных случаев описания исходного микропрофиля, что существенно сужает область применения подобных моделей.

5. При разработке новой модели сглаживающей способности пневматической шины необходимо учитывать своеобразие взаимодействия эластичной шины с неровностями дороги, т. е. способность шины усреднять кинематическое воздействие дороги в зоне контакта шины и значительное изменение длины пятна контакта в процессе колебаний колеса.

### Список использованных источников

1. Яценко, Н. Н. Поглощающая и сглаживающая способность шин [Текст] / Н. Н. Яценко. – М. : Машиностроение, 1978. – 132 с.

2. Степанов, Ю. В. Оценка нивелирующей способности эластичных колес [Текст] / Ю. В. Степанов, В. С. Соловьев, К. В. Фролов // Автомобильная промышленность. – 1975. – № 9. – С. 18 – 21.
3. Работа автомобильной шины [Текст] / В. И. Кнороз, Е. В. Кленников, И. П. Петров и др.; под ред. В. И. Кнороза. – М. : Транспорт, 1976. – 238 с.
4. Толстопятенко, Э. И. Исследование нивелирующей способности шин самоходных землеройно-транспортных машин [Текст] / Э. И. Толстопятенко // Строительные и дорожные машины: информ. научно-техн. сб. – М. : ЦНИИТЭИСтроймаш, 1970. – Вып. 1. – С. 13 – 16.
5. Дмитриев, А. А. Особенности взаимодействия пневматической шины с микропрофилем дороги [Текст] / А. А. Дмитриев, В. С. Шупляков, Н. Н. Яценко // Автомобильная промышленность. – 1973. – № 5. – С. 27 – 30.
6. Рыков, С. П. Моделирование вибронагруженности автобуса ЗИЛ с учетом преобразующих свойств пневматических шин [Текст] / С. П. Рыков, С. К. Карцов // Проблемы механики современных шин: материалы Второй междунар. конф, Улан-Удэ. 2003. –Т. 3. – С. 192–195.
7. Васильев, В. С. Расчет параметров колебаний бесподвесочной машины при случайных возмущениях [Текст] / В. С. Васильев, В. П. Жигарев, А. А. Хачатуров // Устойчивость управляемого движения автомобиля : Труды МАДИ. – М. : МАДИ, 1971. – Вып. 41. – С. 88 – 97.
8. Динамика системы “дорога – шина – автомобиль – водитель” [Текст] / А. А. Хачатуров, В. Л. Афанасьев, В. С. Васильев и др.; под ред. А. А. Хачатурова. – М. : Машиностроение, 1976. – 535 с.

*Стаття надійшла до редакції 20.10.2012 р.*