

## ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ЛЕГКОГО КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПЛАВНОСТИ ХОДА

**Е.В. Степанов**

ORCID: 0000-0003-4894-3473 e-mail: [evgeniystepanov1991@nntu.ru](mailto:evgeniystepanov1991@nntu.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.А. Васильев**

ORCID: 0000-0002-4139-9631 e-mail: [aleksey.vasilyev@nntu.ru](mailto:aleksey.vasilyev@nntu.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**Д.А. Бутин**

ORCID: 0000-0002-3303-6312 e-mail: [danila.butin@nntu.ru](mailto:danila.butin@nntu.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.С. Вашурин**

ORCID: 0000-0001-8843-9488 e-mail: [vashurin@nntu.ru](mailto:vashurin@nntu.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**Е.И. Торопов**

ORCID: 0000-0002-7795-5505 e-mail: [evgeny.toropov@nntu.ru](mailto:evgeny.toropov@nntu.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Дана оценка адекватности виртуальной модели системы поддресоривания в составе легкого коммерческого автомобиля ГАЗель NEXT. Проведено сравнение результатов натуральных испытаний и расчетных исследований плавности хода при переезде через единичную неровность. Модель создана в программной среде моделирования динамики автомобиля MSC ADAMS/Car. В ней учитываются массовые и инерционные характеристики кузова, рамы, кабины, двигателя, деталей и узлов, включающие части поддресоренной и неподдресоренной массы. Также принимаются в расчет кинематика подвески и рулевого управления, характеристики упругих и демпфирующих элементов. Модель шины учитывает вертикальную жесткость и демпфирование, значения которых получены экспериментальным путем. Испытание на плавность хода заключалось в многократных проездах автомобиля через единичную неровность при различных скоростях движения. Для оценки адекватности имитационной модели использовалось среднеквадратическое отклонение значений вертикальных ускорений на раме автомобиля и оси колеса. Расхождение результатов испытаний и моделирования не превышает 14,1 %. Данное значение позволяет судить об адекватности разработанной модели и возможности ее использования для моделирования движения легких коммерческих автомобилей по стохастическим профилям дороги при оценке плавности хода.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, математическая модель, плавность хода, верификация, легкий коммерческий автомобиль, адекватность, испытания.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Степанов, Е.В. Оценка адекватности модели легкого коммерческого автомобиля при исследовании плавности хода / Е.В. Степанов, А.А. Васильев, Д.А. Бутин, А.С. Вашурин, Е.И. Торопов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2021. № 4. С. 110-118. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_4\_110

## ASSESSMENT OF THE ADEQUACY OF THE LIGHT COMMERCIAL VEHICLE MODEL IN THE STUDY OF SMOOTH RUNNING

**E.V. Stepanov**

ORCID: **0000-0003-4894-3473** e-mail: **evgeniystepanov1991@nntu.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.A. Vasilyev**

ORCID: **0000-0002-4139-9631** e-mail: **aleksey.vasilyev@nntu.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.A. Butin**

ORCID: **0000-0002-3303-6312** e-mail: **danila.butin@nntu.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.S. Vashurin**

ORCID: **0000-0001-8843-9488** e-mail: **vashurin@nntu.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

*Nizhny Novgorod, Russia*

**E.I. Toropov**

ORCID: **0000-0002-7795-5505** e-mail: **evgeny.toropov@nntu.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The adequacy of the virtual model of the springing system as part of the Gazelle NEXT light commercial vehicle is assessed. A comparison of the results of field tests and calculated studies of the smoothness of the course when moving through a single unevenness is carried out. The model was created in the MSC ADAMS/Car dynamics simulation software environment. It takes into account the mass and inertia characteristics of the body, frame, cab, engine, parts and assemblies, including parts of the sprung and unsprung mass. The kinematics of the suspension and steering, the characteristics of elastic and damping elements are also taken into account. The tire model takes into account vertical stiffness and damping, the values of which are obtained experimentally. The test for smoothness of the course consisted in multiple passes of the car through a single unevenness at different speeds. To assess the adequacy of the simulation model, the standard deviation of the values of vertical accelerations on the car frame and wheel axis was used. The discrepancy between the test and simulation results does not exceed 14.1%. This value allows us to judge the adequacy of the developed model and the possibility of its use for modeling the movement of light commercial vehicles on stochastic road profiles when assessing the smoothness of the course.

**Key words:** simulation modeling, mathematical model, smooth running, verification, light commercial vehicle, adequacy, testing.

**FOR CITATION:** E.V. Stepanov, A.A. Vasilyev, D.A. Butin, A.S. Vashurin, E.I. Toropov. Assessment of the adequacy of the light commercial vehicle model in the study of smooth running. Transactions of NNTSU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 4. Pp. 110-118. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_4\_110

### 1. Введение

Автомобиль представляет собой сложную колебательную систему, находящуюся в контакте с поверхностью дороги. Данные колебания оказывают влияние не только на людей и перевозимые грузы, но и на ресурс узлов и деталей его конструкции [1]. Подвеска способствует уменьшению негативных воздействий колебаний и необходима для повышения плав-

ности и безопасности движения автомобиля. При разработке конструкции подвесок жизненно важным является контроль работоспособности и правильного функционала. «Классический» путь – проведение натурных испытаний, но при данном подходе существует ряд ограничений, в частности, необходимы опытный образец (прототип), значительная производственная и испытательная базы, а, следовательно, существенные финансовые и временные издержки. Общепринятой мировой практикой является замена экспериментального исследования прототипа на ранних стадиях разработки математическим моделированием соответствующего цифрового двойника [2-4]. Необходимо отметить, что современный уровень развития вычислительных мощностей позволяет добиться высокой виртуальной воспроизводимости реального процесса, происходящего с объектом исследования, таким образом ускоряется процесс проектирования и разработки [2]. Несмотря на все преимущества моделирования, натурные испытания сохраняют важнейшую роль – это большинство верификационных и сертификационных тестов, финальных калибровочных и отладочных работ.

В настоящей работе объектом исследования и моделирования является легкий коммерческий автомобиль ГАЗель NEXТ полной массой 3 500 кг; передняя подвеска – независимая на двойных поперечных рычагах со стабилизатором поперечной устойчивости. Задняя подвеска – зависимая на полуэллиптических рессорах с подрессорниками и стабилизатором поперечной устойчивости, оборудована телескопическими жидкостными амортизаторами.

Цель данной статьи – сравнение результатов виртуальных и дорожных испытаний автомобиля для оценки адекватности разработанной модели при переезде через единичную неровность.

## 2. Методы исследования

### 2.1. Имитационная модель автомобиля.

Моделирование автомобиля осуществлялось в объектно-ориентированном программном пакете MSC ADAMS/Car. Имитационная модель имеет подвижность по всем шести степеням свободы. В ней учитываются массовые и инерционные характеристики подрессоренной и неподрессоренной массы, кинематика и эластокинематика подвески и рулевого управления, а также упругие и демпфирующие элементы. Модель шины создавалась на основании работ Расејса Н.В. [5]. В ней учитывается вертикальная жесткость и демпфирование, увод, продольный коэффициент скольжения и поперечный угол наклона шины относительно опорной поверхности. Характеристики шины исследовались при помощи дорожной лаборатории Skid-trailer. На данный момент такая методика исследования шин позволяет получить наиболее адекватные результаты, за счет того, что контакт шины осуществляется с реальным полотном дороги. Осевые моменты инерции автомобиля относительно центра тяжести определить расчетно-аналитически, представив конструкцию транспортного средства как совокупность отдельных элементов: колеса, оси, кабина, рама, кузов и др. Момент инерции отдельных элементов конструкции рассчитывался с помощью подробной САД-модели.

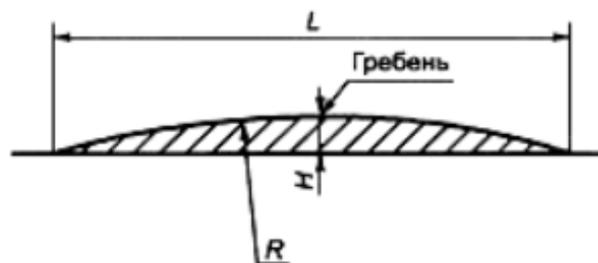


Рис. 1. Поперечный профиль искусственной неровности

Fig. 1. Transverse profile of artificial irregularity

Для исследования адекватности имитационной модели автомобиля и, в частности, работы передней подвески использовалось испытание переезд через волнообразную единичную неровность в соответствии с ГОСТ Р 52605-2006. Профиль неровности представлен на рис. 1. Высота и длина неровности составляют  $H = 0,057$  м и  $L = 0,5$  м соответственно. Имитационная модель автомобиля преодолевала единичную искусственную неровность на постоянных скоростях: 10, 20 и 30 км/ч. При этом оценивались величины вертикальных ускорений на раме автомобиля над передним левым колесом и на оси этого же колеса.

Виртуальная модель дорожного полотна с искусственной неровностью задавалась путем определения координат точек микропрофиля дороги под каждым бортом автомобиля в зависимости от продольных координат. Общий вид имитационной модели автомобиля представлен на рис. 2.

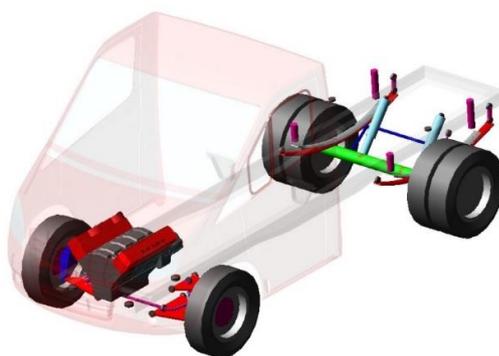


Рис. 2. Модель легкого коммерческого автомобиля

Fig. 2. Light commercial vehicle model

При моделировании элементов передней подвески было принято допущение о том, что рычаги и поворотные кулаки являются абсолютно твердыми телами и соединены между собой идеальными сферическими шарнирами, имитирующими шаровые шарниры подвески. Все резинометаллические шарниры подвески имеют по три продольные жесткости вдоль осей и по три жесткости на скручивание в соответствии с данными, полученными в результате лабораторных испытаний сайлентблоков. Упругие характеристики металлических пружин и полимерных буферов сжатия подвески, а также демпфирующая характеристика амортизаторов заданы в соответствии с конструкторской документацией. Стабилизатор поперечной устойчивости имитирован как упругое тело в виде набора «балочных» элементов с соответствующими характеристиками материала. Общий вид подсистемы передней подвески автомобиля представлен на рис. 3.

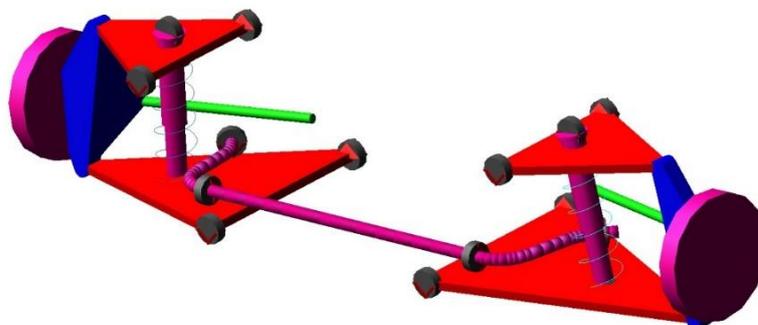


Рис. 3. Модель передней подвески легкого коммерческого автомобиля в MSC.ADAMS/Car

Fig. 3. Front suspension model of a light commercial vehicle in MSC.ADAMS/Car

Особенность программного комплекса MSC.ADAMS/Car состоит в том, что результаты моделирования, помимо числовых значений параметров кинематики и динамики движения автомобиля, можно также визуализировать. Таким образом, кроме аналитического сравнения, мы дополнительно получаем возможность сопоставления характера поведения объекта исследования.

### 2.2. Натурные испытания легкого коммерческого автомобиля.

Адекватность и полнота разработанной модели была оценена по результатам дорожных испытаний. Верификация модели производилась по следующим параметрам:

- скорость движения автомобиля;
- вертикальное ускорение на подрессоренной массе (участок рамы над передним левым колесом);
- вертикальное ускорение на неподрессоренной массе (нижний левый рычаг, точка, максимально близкая к поворотному кулаку).

Для сбора перечисленных параметров была разработана установка, осуществляющая синхронную запись всех необходимых сигналов, в которой использовалось высокоточное измерительное оборудование. Измерение вертикальных ускорений на ключевых точках транспортного средства производилось при помощи акселерометров TML ARJ-A-T 50 и ARJ-A-T 100, а скорость движения автомобиля запрашивалась из бортовой информационной CAN-шины. Способ установки датчиков ускорений представлен на рис. 4 и 5. В выделенной области располагаются указанные акселерометры.



Рис. 4. Способ установки датчика ускорений на неподрессоренной массе автомобиля

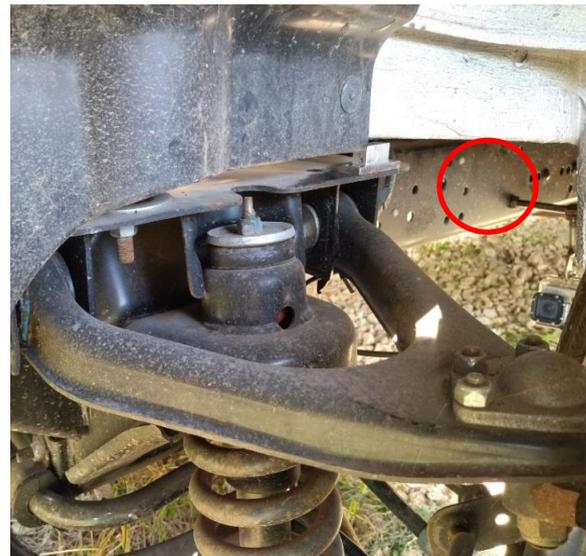


Рис. 5. Способ установки датчика ускорений на подрессоренной массе автомобиля

Fig. 4. Method of installation of the acceleration sensor on the unsprung mass of the car

Fig. 5. Method of installation of the acceleration sensor on the sprung mass of the car

Серии тестовых заездов на участке ровной дороги с асфальтобетонным покрытием и единичным препятствием проводились с такими же скоростями, как и при виртуальном моделировании. Перед испытаниями автомобиль проходил соответствующую подготовку, в том числе, проверку развесовки по осям и предварительный пробег для прогрева шин и амортизаторов и резинометаллических шарниров подвески. На рис. 6 представлен снимок в движении, сделанный камерой, установленной на раме автомобиля при проезде единичной неровности на скорости 30 км/ч.

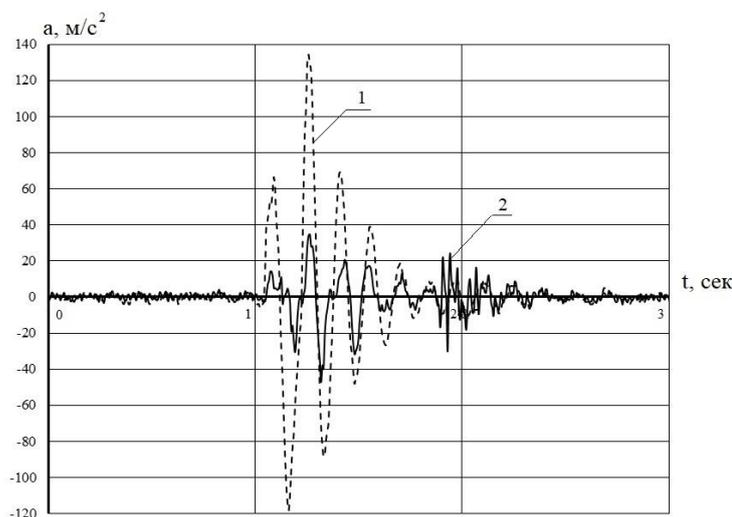


**Рис. 6. Работа подвески при преодолении единичной неровности**

**Fig. 6. Suspension operation when overcoming a single unevenness**

### 2.3. *Обработка результатов эксперимента и моделирования.*

Для осуществления сравнительного анализа результатов натурных испытаний и моделирования были принято решение осуществить сравнение величин максимальных ускорений и среднеквадратических величин (СКВ) ускорений на поддрессоренных и неподдрессоренных частях автомобиля при проезде неровности на соответствующих скоростях. При первичной оценке установлено, что распределения случайных величин вертикальных ускорений при движении автомобиля через единичную неровность удовлетворительно описываются нормальным законом. Соответственно, средние арифметические значения величин максимальных ускорений и СКВ ускорений могут рассматриваться как наиболее вероятные для таких испытаний. Пример записи ускорений в ключевых точках при проведении натурных испытаний представлен на рис. 7.



**Рис. 7. Экспериментальные величины ускорений при проезде через единичную неровность:**  
*1 – ускорение неподдрессоренной массы, 2 – ускорение поддрессоренной массы*

**Fig. 7. Experimental values of accelerations when passing through a single unevenness:**  
*1 – acceleration of unsprung mass, 2 – acceleration of sprung mass*

После проверки полученных данных величин ускорений на соответствие закону нормального распределения необходимо применить параметрический критерий сравнения экспериментальной и моделированной выборок ускорений, в данном случае наиболее подходя-

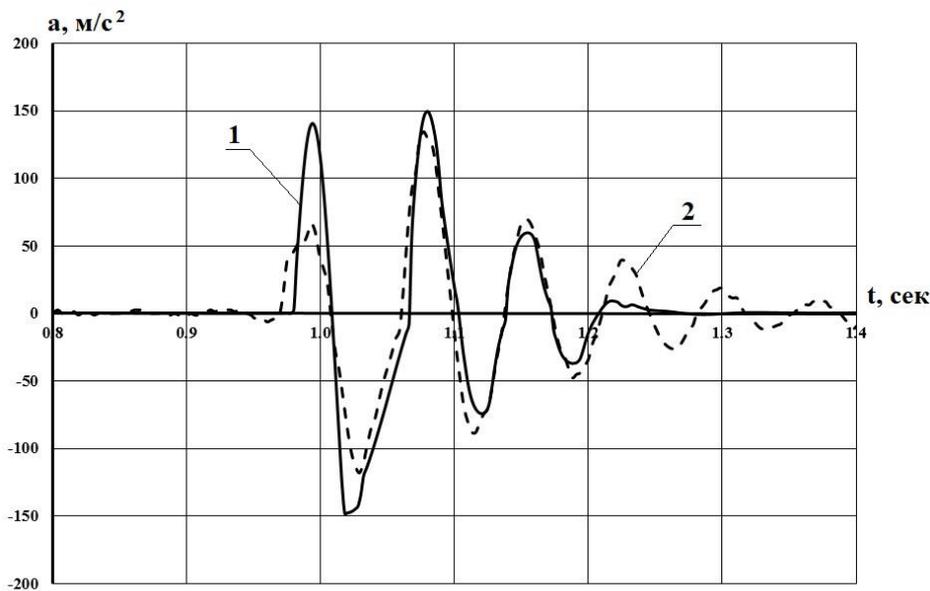
щим является критерий Фишера  $F$  [6]. На рис. 8 представлен график для визуального сравнения изменения величин ускорения при проезде через единичную неровность, полученных экспериментально и в результате моделирования.

Критерий  $F$  позволяет сравнивать величины дисперсий двух независимых выборок. Критерий Фишера  $F$  можно определить по формуле (1):

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} (\sigma_1^2 \geq \sigma_2^2), \quad (1)$$

где  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$  – дисперсии выборок.

Для рассматриваемых в данном исследовании выборок критерий  $F$  меньше  $F_{\text{КРИТ}} = 1,390$ , следовательно, гипотезу о равенстве дисперсий экспериментальной выборки и выборки, полученной в результате моделирования автомобиля при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , можно принять.



**Рис. 8. Сравнение экспериментальных величин ускорений и полученных в результате моделирования на неподрессоренной массе при проезде единичной неровности на скорости 30 км/ч**

*1 – моделирование, 2 – эксперимент*

**Fig. 8. Comparison of experimental values of accelerations and those obtained as a result of modeling on an unsprung mass when passing a single irregularity at a speed of 30 km/h**

*1 – simulation, 2 – experiment*

Для осуществления сравнения величин максимальных ускорений и СКВ ускорений на поддрессоренных и неподрессоренных частях автомобиля при проезде неровности на различных скоростях, полученных по результатам моделирования и эксперимента, необходимо рассчитать относительную погрешность данных величин по формуле (2):

$$\delta = \frac{\sigma_{\text{мод}} - \sigma_{\text{эксп}}}{\sigma_{\text{мод}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

### 3. Результаты

В табл. 1 представлены расчетные и экспериментальные значения максимальных и СКВ ускорений на нижнем рычаге передней подвески при проезде единичной неровности на различных скоростях. Разработанная имитационная модель показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными. Экспериментальные и теоретические результаты различаются не более, чем на 14,1 %.

Таблица 1.

## Ускорения неподрессоренной массы

Table 1.

## Acceleration of unsprung mass

Скорость, км/ч	Максимальное значение ускорений			СКВ ускорений		
	Эксперимент	Модель	Относит. отклонение	Эксперимент	Модель	Относит. отклонение
10	30,192	34,35	12,1%	7,2	8,118	11,3%
20	66,674	73,325	9,1%	15,633	17,562	11,0%
30	134,61	149,37	9,9%	26,38	30,7	14,1%

В табл. 2 представлены расчетные и экспериментальные значения максимальных и СКВ ускорений на раме автомобиля над передним левым колесом при проезде единичной неровности на различных скоростях. Разработанная имитационная модель показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными. Экспериментальные и теоретические результаты различаются не более, чем на 11,3 %. Анализируя величины относительных отклонений эксперимента и моделирования, можно говорить об адекватности модели и возможности ее дальнейшего использования для исследования движения автомобиля по стохастическим профилям.

Таблица 2.

## Ускорения поддрессоренной массы

Table 2.

## Acceleration of sprung mass

Скорость, км/ч	Максимальное значение ускорений			СКВ ускорений		
	Эксперимент	Модель	Относит. отклонение	Эксперимент	Модель	Относит. отклонение
10	11,322	11,799	4,0%	3,211	3,482	7,8%
20	16,236	18,01	9,9%	4,954	5,527	10,4%
30	34,65	38,371	9,7%	9,959	11,224	11,3%

## Выводы

В результате проведенного анализа и расчетов выполнена проверка адекватности имитационной математической модели путем сравнения результатов натурального эксперимента и моделирования. Адекватность поведения модели и точность воспроизводимости кинематики и динамики оценивалась по результатам тестового проезда через единичную неровность на различных скоростях движения автомобиля. Критериями оценки являлись величины максимальных и СКВ величин ускорений, возникающих на поддрессоренных и неподрессоренных частях передней подвески легкого коммерческого автомобиля. Сравнение величин относительных отклонений рассматриваемых критериев по результатам эксперимента и имитационного моделирования позволяет говорить об адекватности разработанной модели. Величины данных отклонений не превышают 14,1 % при оценке величин вертикальных ускорений для неподрессоренных частей транспортного средства и не превышают 11,3 % для поддрессоренной массы передней подвески. Небольшие значения отклонений свидетельствует об адекватности имитационной модели и возможности ее использования для исследования сложных процессов движения легких коммерческих автомобилей по случайному микропрофилю и оценки свойств плавности хода.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218) с использованием измерительной аппаратуры Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».*

### **Библиографический список**

1. **Ротенберг, Р.В.** Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода / Р.В. Ротенберг. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
2. **Blundell, M.** The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics / M. Blundell, D. Harty. – Boston, MA: Elsevier, 2014. – 768 p.
3. **Васильев, А.А.** Моделирование условий криволинейного движения автопоезда в программном комплексе ADAMS/CAR / А.А. Васильев, С.Ю. Костин, С.А. Сергиевский [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5(102). С. 239-245.
4. **Кушвид, Р.П.** Развитие теории управляемости и устойчивости автомобиля на базе пространственных компьютерных моделей / Р.П. Кушвид, А.С. Горобцов, С.К. Карцов. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2004 (РИЦ МГИУ). – 136 с.
5. **Расејка, Н.В.** Tyre and Vehicle Dynamics / Н.В. Расејка. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006. – 642 p.
6. **Шведов, А.С.** Теория вероятностей и математическая статистика / А.С. Шведов – М.: ВШЭ, 2005. – 252 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 25.08.2021*