

УДК 629.365

Д.А. Дубин<sup>1</sup>, О.А. Наказной<sup>1</sup>, В.А. Неверов<sup>2</sup>

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТКАЗОВ ПОДВЕСОК ИНДИВИДУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДРЕССОРИВАНИЯ НА СРЕДНЮЮ СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)<sup>1</sup>  
Московский политехнический университет<sup>2</sup>

Представлены результаты расчетно-теоретического исследования по оценке влияния выхода из строя упругих элементов подвесок на среднюю скорость движения гусеничной машины полной массой 45 тонн. Получены скоростные характеристики машины, определены функции быстроходности, а также средние технические скорости по системе подрессоривания при отказе каждой подвески. Определена степень влияния отказа каждой подвески на среднюю скорость движения гусеничной машины.

*Ключевые слова:* гусеничная машина, система подрессоривания, отказ подвески, средняя скорость.

Современные быстроходные гусеничные машины (БГМ), обладая высокими показателями проходимости и автономности, используются для решения широкого спектра транспортных задач в регионах с труднодоступными участками местности и в условиях бездорожья. Скорость движения гусеничной машины (ГМ) по неровностям местности в основном ограничивается системой подрессоривания [1-3] и зависит от ее технических характеристик, а также от исправного состояния деталей и узлов подвесок. Наиболее характерным видом отказа торсионной системы подрессоривания, не приводящего при этом к полной потере подвижности, является разрушение упругого элемента подвески – торсионного вала. Для ГМ тяжелой весовой категории подобный вид отказа, как правило, не устраняется на месте поломки. Машина продолжит выполнение поставленной задачи с неисправной подвеской, что, в свою очередь, приведет к ухудшению показателей плавности хода, а, следовательно, к вынужденному снижению механиком-водителем скорости движения. Целью данного исследования является количественная оценка влияния отказа каждой подвески на среднюю скорость движения ГМ, что может быть использовано при оценке показателя подвижности машины с учетом подобного вида неисправности.

Исследование проводилось для БГМ полной массой 45 тонн (рис. 1) с задним расположением моторно-трансмиссионного отделения. Система подрессоривания корпуса БГМ – индивидуальная торсионная. Амортизаторы рычажно-лопастного типа расположены на первых, вторых и шестых подвесках. Упругая и демпфирующая характеристики подвесок приведены на рис. 2.

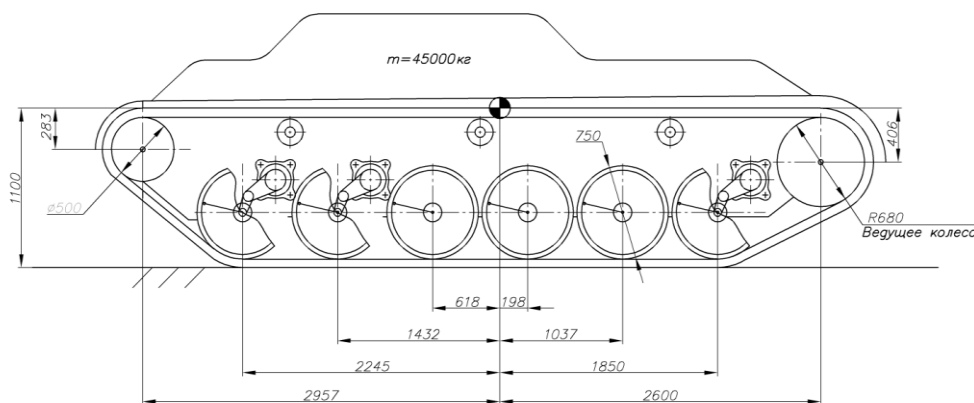
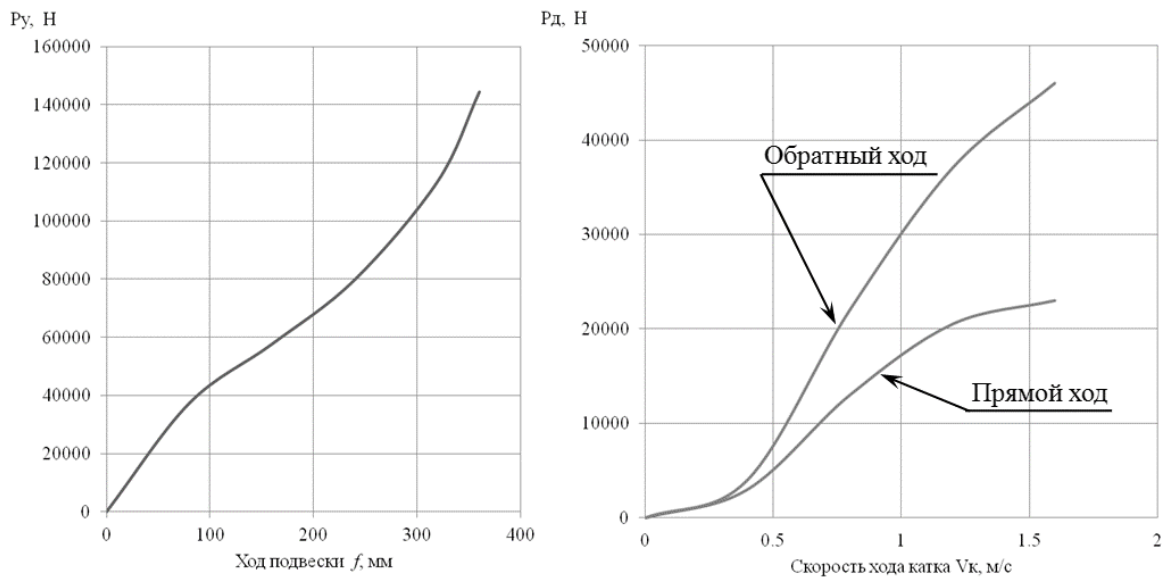


Рис. 1. Схема ходовой части исследуемого гусеничного шасси



**Рис. 2. Упругая и демпфирующая характеристики подвесок исследуемой БГМ**

### Методика проведения исследования

Анализ влияния отказов узлов подвесок на подвижность БГМ проводился на основе сравнительной оценки средних скоростей движения машины, которые могут быть реализованы по системе поддрессоривания при отказе упругого элемента одной из подвесок. Исследование проводилось с использованием методов и средств численного моделирования движения ГМ по неровностям местности [1, 4] и состояло из трех этапов.

*I этап. Построение скоростных характеристик.* Этап заключается в моделировании процесса движения ГМ с заданной скоростью по периодическому профилю. Результатом моделирования является реализация ускорений в функции времени, действующих на месте механика-водителя в процессе движения ГМ. На основании полученных результатов проводится построение скоростных характеристик для каждого случая отказа, отражающих зависимость высот проходных неровностей по предельно допускаемым ускорениям от скорости движения ГМ.

*II этап. Построение функций быстроходности.* По имеющимся скоростным характеристикам проводится построение функций быстроходности [4], которые позволяют оценить среднюю техническую скорость по системе поддрессоривания при отказе  $i$ -ой подвески.

*III этап. Определение коэффициентов влияния отказа подвесок на среднюю скорость движения.* На основании полученных данных о средней технической скорости для каждого расчетного случая формируются выводы о степени влияния отказа на эксплуатационные характеристики БГМ.

Имитационная модель движения ГМ по неровностям местности реализована в программном комплексе Matlab/Simulink, который широко применяется в задачах моделирования динамики движения и рабочих процессов гусеничных и колесных машин [5-7]. Расчетная схема представлена на рис. 3. В расчетах принималось, что профиль трассы недеформируемый, система симметрична относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести корпуса машины, корпус ГМ абсолютно жесткий, а трение в шарнирах и подшипниках пренебрежимо мало. Величина проекции скорости центра масс машины на горизонтальную ось постоянна. Гусеничный движитель представлен упругой невесомой нитью, натяжение которой на всех участках одинаково.

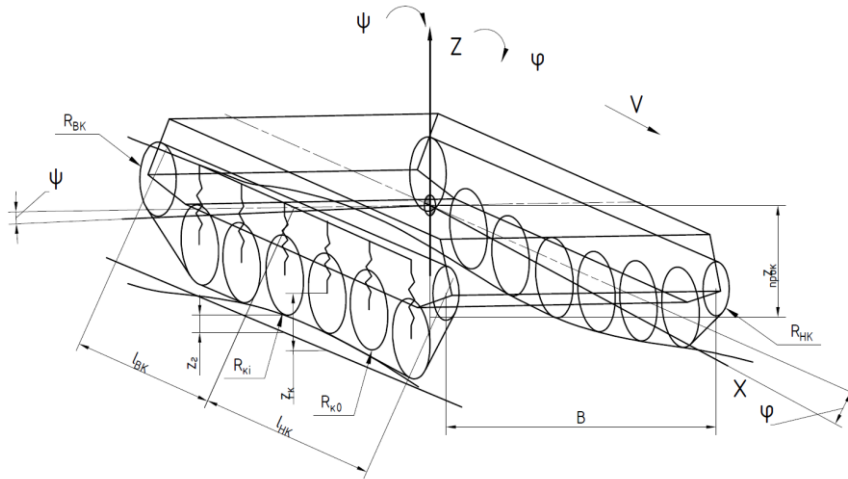


Рис. 3. Расчетная схема ГМ

Согласно расчетной схеме уравнения динамики корпуса ГМ как колебательной системы могут быть записаны в следующем виде:

$$m_{ГМ}\ddot{z}_{корп} + m_{ГМ}g = 2 \left( \sum_{i=1}^n P_{подвi} + P_{шBK} + P_{шHK} - P_T(\sin \alpha_{BK} + \sin \alpha_{HK}) \right); \quad (1)$$

$$\ddot{\varphi} I_{ГМ прод} = 2 \left( \sum_{i=1}^n P_{подвi} l_{ki} + (P_{шBK} - P_T \sin(\alpha_{BK} - \varphi)) l_{BK} + (P_{шHK} - P_T \sin(\alpha_{HK} - \varphi)) l_{HK} \right); \quad (2)$$

$$\ddot{\psi} I_{ГМ попер} = \frac{B}{2} \left( \sum_{i=1}^n P_{подвPi} + P_{шBKП} - P_{TP} \sin(\alpha_{BKП} - \varphi) + P_{шHKП} - P_{TP} \sin(\alpha_{HKП} - \varphi) \right) - \frac{B}{2} \left( \sum_{i=1}^n P_{подвLi} + P_{шBKЛ} - P_T \sin(\alpha_{BKЛ} - \varphi) + P_{шHKЛ} - P_{TL} \sin(\alpha_{HKЛ} - \varphi) \right); \quad (3)$$

где  $m_{ГМ}$  – масса гусеничной машины;  $\ddot{z}_{корп}$  – вертикальные ускорения центра масс корпуса;  $P_{подвi}$  – усилие в подвеске  $i$ -го катка;  $n$  – число катков по борту;  $P_{шBK}$ ,  $P_{шHK}$  – реакции в шинах ведущего и направляющего колес (BK и HK), соответственно;  $P_T$  – сила натяжения гусеницы;  $\alpha_{BK}$ ,  $\alpha_{HK}$  – углы наклона задней и передней ветвей гусеницы, соответственно;  $l_{ki}$  – расстояние по горизонтали от центра масс до оси  $i$ -го опорного катка;  $l_{BK}$ ,  $l_{HK}$  – расстояние по горизонтали от центра масс до оси ведущего и направляющего колес соответственно;  $\varphi$ ,  $\ddot{\varphi}$  – угол поворота корпуса относительно оси, проходящей через центр масс, и его вторая производная (угловое ускорение) соответственно;  $\ddot{\psi}$  – угловое ускорение корпуса ГМ в поперечной плоскости;  $I_{ГМ прод}$ ,  $I_{ГМ попер}$  – момент инерции корпуса относительно продольной и поперечной осей соответственно, проходящих через центр масс.

Равновесие узла подвески (рис. 4) записывается в следующем виде:

$$m_{ki}\ddot{z}_{ki} + m_{ki}g = -P_{подвi} + P_{ши} + P_T(\sin \alpha_{1i} + \sin \alpha_{2i}), \quad (4)$$

где  $m_{ki}$  – масса  $i$ -го катка;  $\ddot{z}_{ki}$  – вертикальное ускорение  $i$ -го катка;  $P_{ши}$  – реакция в шине катка;  $\alpha_{1i}$ ,  $\alpha_{2i}$  – углы наклона ветвей гусеницы справа и слева от катка.

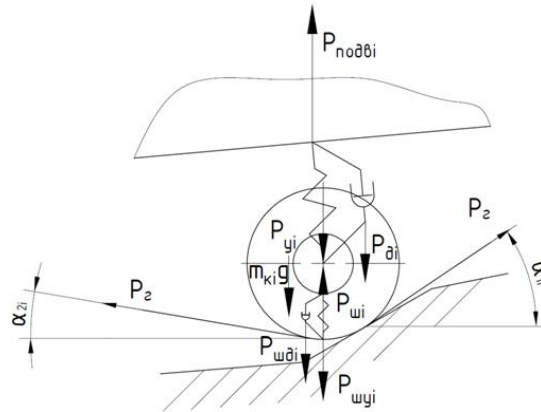


Рис. 4. Расчетная схема узла подвески

Усилие в подвесках определяется как реакция упругого и демпфирующего элементов на возмущающее воздействие со стороны профиля дороги:

$$\begin{aligned} P_{\text{подви}} &= P_{yi} + P_{di}; \\ P_{yi} &= P_y(f_{ki}); \\ P_{di} &= P_d(\dot{f}_{ki}). \end{aligned} \tag{5}$$

Ход катка и его скорость зависят не только от перемещения оси катка, но и от вертикального и углового перемещения (и их производных) корпуса ГМ:

$$f_{ki} = -z_{\text{корп}} - \varphi l_{ki} + z_{ki} - h_{ki}; \tag{6}$$

$$\dot{f}_{ki} = -\dot{z}_{\text{корп}} - \dot{\varphi} l_{ki} + \dot{z}_{ki}, \tag{7}$$

где  $h_{ki}$  – расстояние от центра масс до оси катка при нулевом ходе подвески.

После получения каждой характеристики проводится построение функции быстроходности [5] по системе поддрессоривания  $F_{сп}(v)$  (рис. 5).

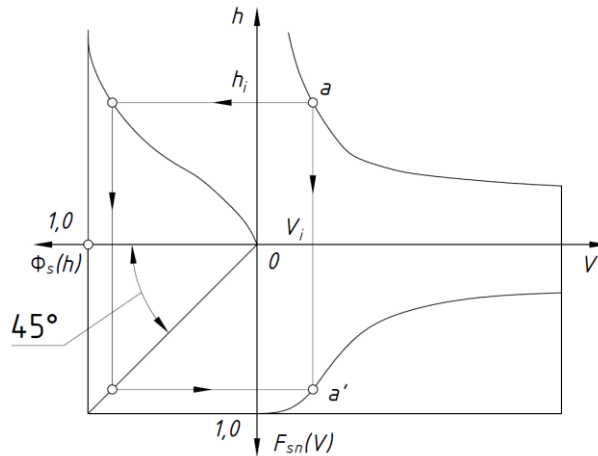


Рис. 5. Определение функции быстроходности  $F_{сп}(v)$  по системе поддрессоривания

При построении функции быстроходности использовалась функция распределения по пути случайных высот неровностей  $\Phi_s(h)$  (рис. 6):

$$\Phi_s(h) = 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_h^2}\right), \tag{8}$$

где  $h$ , м – высота неровности профиля пути,  $\sigma_h = 0,115$ , м – среднеквадратическое отклонение случайных высот неровностей.

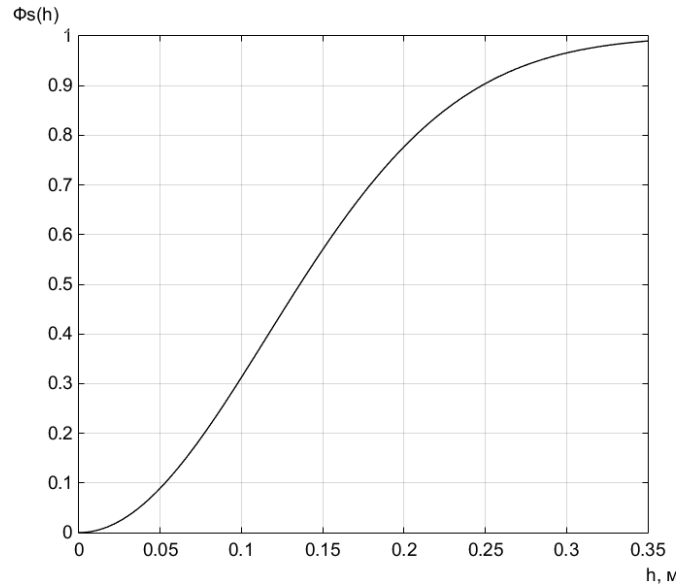


Рис. 6. Расчетная функция распределения по пути случайных высот неровностей

Используя данные о максимальной мощности силовой установки ГМ и ее массе, функция быстроходности  $F_{сп}(v)$  перестраивается в функцию распределения вероятности случайной скорости движения гусеничной машины по пути  $\Phi_{ст}(f_{yc})$  (рис. 7).

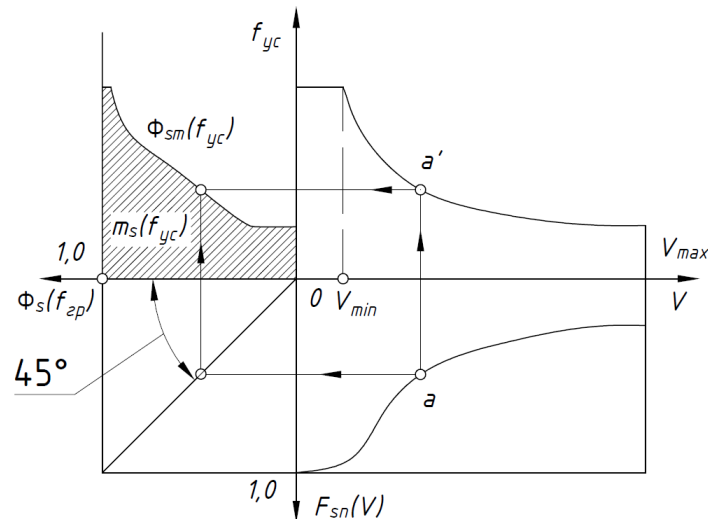


Рис. 7. Распределение вероятности случайной скорости движения гусеничной машины по пути  $\Phi_{ст}(f_{yc})$

Вычисляя площадь под построенной кривой, определяется средняя техническая скорость ГМ по системе подрессоривания.

$$v_{cp} = \frac{N_{уд.гр.}}{\int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{N_{уд.гр.}}{v} \varphi_{so}(v) dv}, \tag{9}$$

где  $N_{уд.гр.}$  – удельная мощность двигателя, реализуемая на грунте,  $\varphi_{so}(v)$  – плотность распределения функции быстроходности.

Зависимость  $N_{уд.гр.}/v$  определяет условную силу тяги  $f_{yc}$  идеальной гусеничной машины, в силовой цепи которой отсутствуют потери мощности. Тогда зависимость (9) представляется в следующем виде:

$$v_{cp} = \frac{N_{уд.гр.}}{m_s(f_{yc})}, \tag{10}$$

где  $m_s(f_y)$  – площадь, заключенная между кривой  $\Phi_{ст}(f_{yc})$  и осью  $0-\Phi_s$  (на рис. 7 показана как заштрихованная область).

Коэффициент влияния отказа  $i$ -ой подвески на среднюю скорость движения ГМ, как условный показатель эффективности будет определяться следующим образом:

$$C_i = \frac{W_0 - W_1}{W_0} = \frac{v_{ср0} - v_{ср1}}{v_{ср0}}, \quad (11)$$

где  $W_0$  – эффективность системы (изделия) до отказа,  $W_1$  – эффективность системы (изделия) после отказа.

### Результаты исследования

С использованием разработанной имитационной модели движения ГМ проведено моделирование ситуации отказа упругого элемента последовательно для каждой подвески вдоль одного борта. В результате были получены скоростные характеристики исправной машины (рис. 8) и с учетом отказа каждой из подвесок (рис. 9) для трех длин волн гармонического профиля пути.

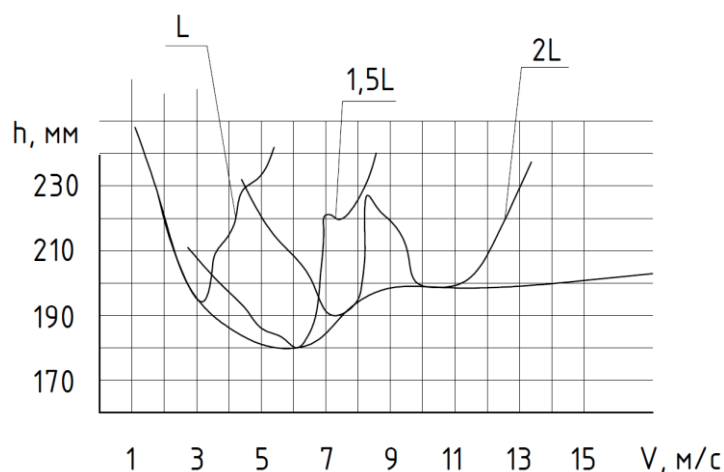


Рис. 8. Частные скоростные характеристики машины с исправными подвесками, где  $L$ -база машины

Анализ полученных данных показал, что отказ упругих элементов в независимых подвесках существенно влияет на скорость движения, которую может реализовать механик-водитель при движении ГМ по неровностям местности без достижения предельно допустимых ускорений или «пробоев» – ударов балансиров в ограничители хода (табл. 2). При отказе первой подвески средняя скорость движения, реализованная по системе поддрессоривания, снизится на 26,4 % (удар направляющего колеса о грунт), тогда как снижение скорости из-за отказа задней подвески составляет 38,4 % (удар ведущим колесом). Разрушение упругого элемента одной из средних подвесок увеличивает вероятность «пробоя», при этом отказ второй подвески оказывает наименьшее влияние (3,2 %) на среднюю скорость движения. Одинаковое влияние на среднюю скорость оказывают выходы из строя четвертой и пятой подвесок. Снижение скорости в таком случае составляет 19,4 % и 19,8 % соответственно. В случае отказа третьей подвески средняя скорость уменьшится на 11,4 %.

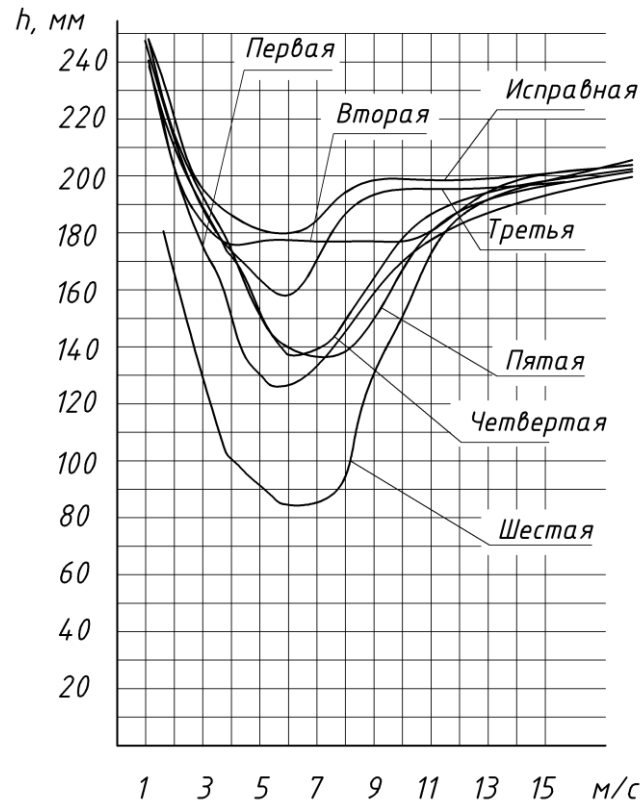


Рис. 9. Скоростные характеристики машины с учетом отказа упругого элемента  $i$ -ой подвески

Таблица 2

#### Критичность отказа

Номер отказанной подвески	Значение площади $m_s(f_y)$	Значение средней скорости $v_{ср}$ , м/с	$C_i$
Исправное состояние	0,195	8,38	-
1	0,245	6,17	0,264
2	0,201	8,12	0,031
3	0,220	7,42	0,114
4	0,242	6,75	0,194
5	0,243	6,72	0,198
6	0,364	5,15	0,384

#### Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что наиболее критичными с точки зрения влияния на среднюю скорость движения гусеничных машин являются отказы крайних подвесок. Разрушение упругого элемента первой подвески приведет к снижению скорости по системе поддрессоривания на 26,4 %, а при отказе шестой подвески потеря в скорости составит 38,4 %. Отказ средних подвесок приводит к снижению средней скорости на 3,2-19,8 %.

## Библиографический список

1. **Дмитриев, А.А.** Теория и расчет нелинейных систем поддрессирования гусеничных машин / А.А. Дмитриев, В.А. Чобиток, А.В. Тельминов. – М.: Машиностроение, 1976. – 207 с.
2. **Котиев, Г.О.** Комплексное поддрессирование высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 184 с.
3. **Котиев, Г.О.** Пути повышения быстроходности гусеничных машин транспортного назначения / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач, И.А. Смирнов, С.А. Бекетов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. № 2. – С. 114-119.
4. **Дядченко, М.Г.** Основы расчета систем поддрессирования гусеничных машин на ЭВМ / М.Г. Дядченко, Г.О. Котиев, В.Н. Наумов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 30 с.
5. **Савочкин, А.В.** Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин / А.В. Савочкин, А.А. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1993. – 320 с.
6. **Горелов, В.А.** Математическая модель прямолинейного движения по деформируемой опорной поверхности двухзвенного седельного автопоезда с активным полуприцепным звеном / В.А. Горелов, Б.В. Падалкин, О.И. Чудаков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2017. – № 2. – С. 121-138.
7. **Горелов, В.А.** Математическая модель прямолинейной динамики по недеформируемому опорному основанию седельного автопоезда с активным полуприцепом / В.А. Горелов, Г.Г. Анкинович, О.И. Чудаков // Вестник Машиностроения. – 2017. – № 3. – С. 37-42.
8. **Сарач, Е.Б.** Исследование тепловой нагруженности пневмогидравлической рессоры гусеничной машины легкой весовой категории / Е.Б. Сарач, О.А. Наказной, А.А. Ципилев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. – № 11.

*Дата поступления  
в редакцию: 06.02.2019*

**D.A. Dubin<sup>1</sup>, O.A. Nakaznoi<sup>1</sup>, V.A. Neverov<sup>2</sup>**

**ANALYSIS OF THE SUSPENSION FAILURE IMPACT  
ON THE TRACKED VEHICLE SPEED**

Bauman Moscow state technical university<sup>1</sup>  
Moscow polytechnic university<sup>2</sup>

**Purpose:** Demonstration of the suspension failure impact on the speed of a tracked vehicle weighing 45 tons.

**Design/methodology/approach:** The research was carried out by the method of simulation of the vehicle movement.

**Results:** The speed characteristics of the machine are constructed, speed functions are determined, as well as the average technical speeds for the suspension system in case of failure of one of the suspensions. As a result, the price of failure is determined by the effect on the average speed of the tracked vehicle for each failed suspension along one side.

*Key words:* tracked vehicles, suspension system, suspension failure, average speed, failure price.