

## Оценка тепловой нагруженности элементов системы подрессоривания гусеничной машины

Е.Б. Сарач, А.А. Ципилев, О.А. Наказной

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

*Исследованы вопросы тепловой нагруженности систем подрессоривания транспортных средств в рамках динамики движения машины и плавности ее хода, поскольку высокая теплонагруженность пневмогидравлических устройств влечет за собой риск выхода из строя системы подрессоривания вследствие разрушения или быстрого износа уплотнений. Дано обоснование использованию имитационного математического моделирования в целях возможно более точной оценки тепловой напряженности. Приведены результаты натурных испытаний гусеничной машины промежуточной весовой категории и имитационного моделирования движения машины по аналогичным гармоническим неровностям. Показана высокая адекватность математической модели. Представлены рекомендации по снижению тепловой нагруженности системы подрессоривания исследуемой гусеничной машины.*

**Ключевые слова:** транспортные машины, пневмогидравлические рессоры, система подрессоривания, эксперимент, плавность хода, теплонагруженность, метод конечных разностей Шмидта, Simulink, Simscape, SimHydraulics.

**Введение.** При исследовании систем подрессоривания путем имитационного математического моделирования, как правило, возникает необходимость сравнения результатов натурных испытаний и вычислительного эксперимента при работе пневмогидравлической системы подрессоривания (ПГСП) в составе машины [1–6]. Необходимость такой оценки вызвана в первую очередь различиями в условиях нагружения пневмогидравлических рессор (ПГР) при испытаниях на стенде и при движении транспортного средства по случайному или гармоническому профилю дороги. Сравнительные исследования подобного рода являются не только существенно более трудоемкими по сравнению со стендовыми испытаниями, но и предъявляют более высокие требования к системам регистрации и сбора значений измеряемых параметров. Тем не менее именно натурные эксперименты позволяют в полной мере оценить адекватность математической модели и установить точные величины погрешностей имитационного моделирования.

**Описание математической модели и экспериментального исследования машины с ПГСП.** В качестве имитационной математической модели движения гусеничной машины (ГМ) была использована математическая модель, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана [7, 8]. Для описания поведения ПГСП на базе описанной в работах [9, 10] математической модели разработали имитационную мате-

математическую модель системы поддрессоривания, подходящую для работы в составе имитационной математической модели гусеничной машины.

В качестве экспериментальных данных были приняты результаты исследований движения ГМ, которые проведены в рамках научно-исследовательских работ 21-го Научно-исследовательского испытательного института МО РФ (г. Бронницы).

Объект исследований — ГМ промежуточной весовой категории с гидропневматической подвеской, в конструкции которой применяются одноуровневая и двухуровневая ПГР (рис. 1, а, б; 2).

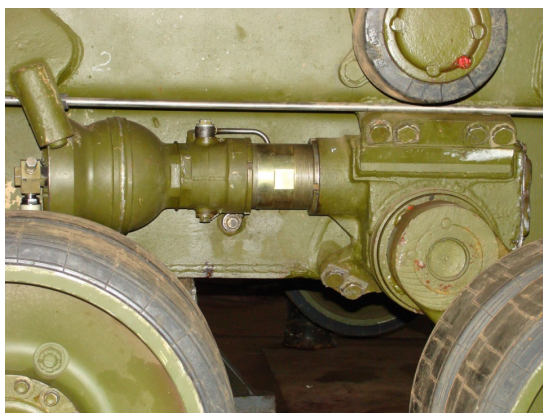


а



б

**Рис. 1.** Внешний вид исследуемой машины с ПГСП:  
а — вид машины спереди; б — вид машины сбоку



**Рис. 2.** Место установки ПГСП с встроенной ПГР  
в ходовой части гусеничной машины

Технические и конструктивные параметры гусеничной машины представлены ниже:

Полная масса машины $M_{п}$ , кг .....	35 660
Поддрессоренная масса машины $M_{под}$ , кг .....	33 850
Неподдрессоренная масса машины $m_{п}$ , кг.....	1 800

Момент инерции машины относительно поперечной оси $I_{п}$ , кг·м <sup>2</sup> .....	98 000
Количество опорных катков на борт $n$ , шт. ....	6
Радиус балансира $R_6$ , м .....	0,36
Радиус опорного катка $r_{к}$ , м .....	0,315
Ширина шины опорного катка $B_{ш}$ , м .....	$0,17 \cdot 2 = 0,34$
Статический прогиб шины опорного катка $f_{ш.ст}$ , м .....	0,045
Коэффициент Пуассона шины опорного катка $\mu$ .....	0,49
Статический ход опорного катка $f_{ст}$ , м .....	0,13
Динамический ход опорного катка $f_{д}$ , м .....	0,27
Расстояние по горизонтали от $i$ -го опорного катка до центра масс машины (начиная с первого), м:	
$l_1$ .....	2,43
$l_2$ .....	1,48
$l_3$ .....	0,52
$l_4$ .....	-0,40
$l_5$ .....	-1,34
$l_6$ .....	-2,25
Расстояние по горизонтали от направляющего колеса до центра масс машины $l_{н.к}$ , м .....	3,25
Расстояние по горизонтали от ведущего колеса до центра масс машины $l_{в.к}$ , м .....	2,88
Дорожный просвет $h_{д}$ , м .....	0,46
Масса опорного катка вместе с отнесенными к ней массами элементов ходовой части $m_{к}$ , кг .....	150
Начальный объем рабочей жидкости в ПГР в статике $V_{о.ж}$ , м <sup>3</sup> .....	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Площадь двойного поршня ПГР $F_{п}$ , м <sup>2</sup> :	
малый поршень .....	$4,4 \cdot 10^{-3}$
большой поршень .....	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Ход поршня в статическом положении ПГР $S_{ст}$ , м .....	0,05
Передаточное число ПГР $i$ .....	от 2,8 до 3,0
Передаточное силовое число ПГР $i_c$ .....	0,39
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К):	
масла МГЕ-10 .....	49,868
стали .....	55,337
деталей ПГР .....	32,263
Статический объем газа в пневмобаллоне $V_{ст.г}$ , м <sup>3</sup> .....	$1,422 \cdot 10^{-3}$
Масса ПГР, рабочей жидкости, кг:	
$m_{ПГР}$ .....	20
$m_{ж}$ .....	1,9
Удельная теплоемкость деталей и жидкост-ти в ПГР, Дж/(кг К):	
$c_{д}$ .....	539
$c_{ж}$ .....	761
Площадь поверхности охлаждения ПГР $F$ , м <sup>2</sup> .....	0,21
Площадь гидроцилиндра $F_{гц}$ , м <sup>2</sup> .....	$6,4 \cdot 10^{-3}$

Для проведения экспериментальных исследований разработана блок-схема измерительной системы (рис. 3), позволяющая определить параметры плавности хода ГМ при движении: максимальные вертикальные ускорения в крайних точках корпуса и на месте механика-водителя при гармоничном возмущении, максимальные скорости и угловые колебания корпуса в продольной и поперечной плоскостях.

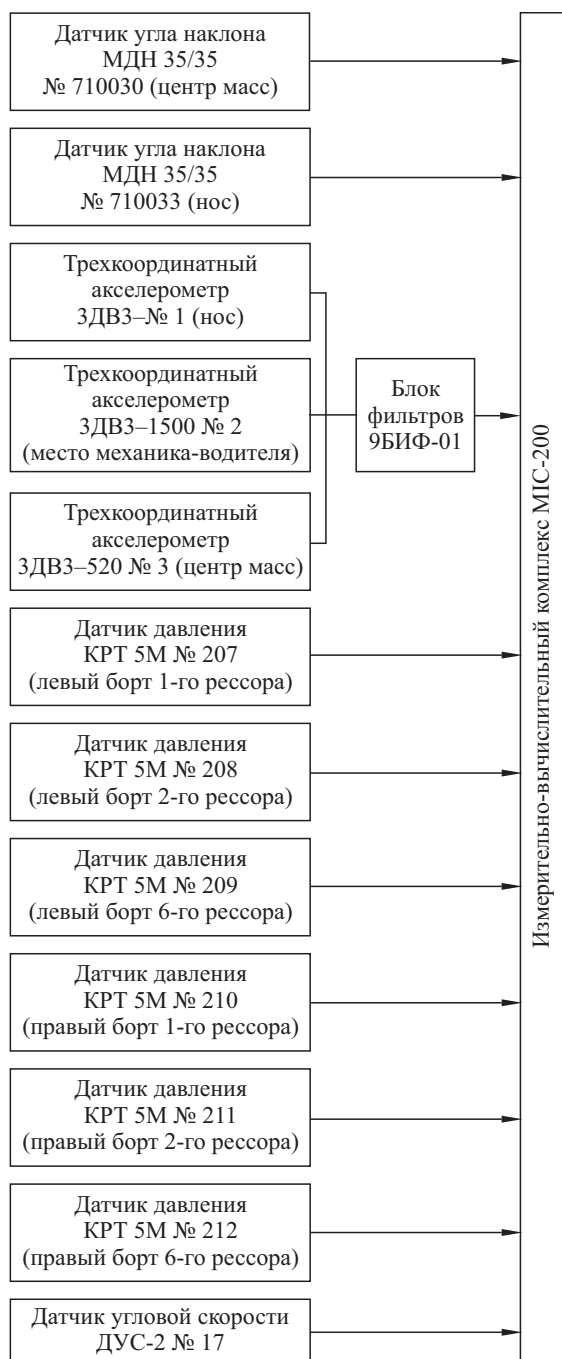


Рис. 3. Блок-схема измерительной системы

При проведении экспериментальных исследований использованы измерительная аппаратура и средства измерений (табл. 1).

## Измерительная аппаратура и средства измерений

Параметр	Тип средства измерения	Предел (диапазон) измерения	Погрешность
Максимальные значения вертикальных ускорений корпуса ГМ: носовая крайняя точка место механика-водителя задняя крайняя точка	Девятиканальный блок измерительных фильтров 9БИФ-01	$\pm 5$ В	$\pm 1$ %
	Трехкоординатный акселерометр (ЗДВ3-520 ЗДВ3-1500) для измерения виброускорений	$\pm 10$ g	$\pm 4,5$ %
Угловые продольные и поперечные колебания корпуса ГМ	Магнитные датчики наклона МДН 35/35	$\pm 35^\circ$	$\pm 2\%$
	Датчик крена типа РФ 711	$0 \dots 360^\circ$	$0^\circ 20'$
Значения угловых скоростей в продольной и поперечной плоскостях корпуса ГМ	Датчик угловой скорости типа ДУС-2М	$0 \dots 50$ град/с	$\pm 2$ %
Температура корпуса ПГР	Датчик температуры электронный типа РТ-50+300	$-70 \dots +500$ °С	$\pm 1$ %
	Инфракрасный термометр (пирометр) OPTRIS LS	$-35 \dots +900$ °С	$\pm 0,75$ %
Высота дорожного просвета, мм	Лазерный дальномер Leica DISTO A5	$0,05 \dots 200$ м	$\pm 2$ мм
Давление газа в ПГР	Датчик КРТ-5М. Резьба М20 · 1,5	$0 \dots 600$ кг/см <sup>2</sup>	$\pm 1$ %
Приспособление для заправки ПГР азотом	352-1613650-5	$0 \dots 200$ кг/см <sup>2</sup>	$\pm 0,5$ кг/см <sup>2</sup>

Для записи и обработки исследуемых параметров плавности хода ГМ использовался измерительно-вычислительный комплекс МИС-200, который предназначен для сбора, преобразования, регистрации, обработки, передачи и представления информации датчиков и измерительных преобразователей в качестве элемента автоматических и автоматизированных многоканальных измерительных систем. Структурная схема комплекса представлена на рис. 4.

В комплекс МИС-200 установлено два измерительных модуля МС-114, предназначенных для измерения напряжения, а также модуль МС-114С для измерения силы тока и модуль МС-451 для измерения частоты сигнала. Основные параметры измерительных модулей представлены в табл. 2.

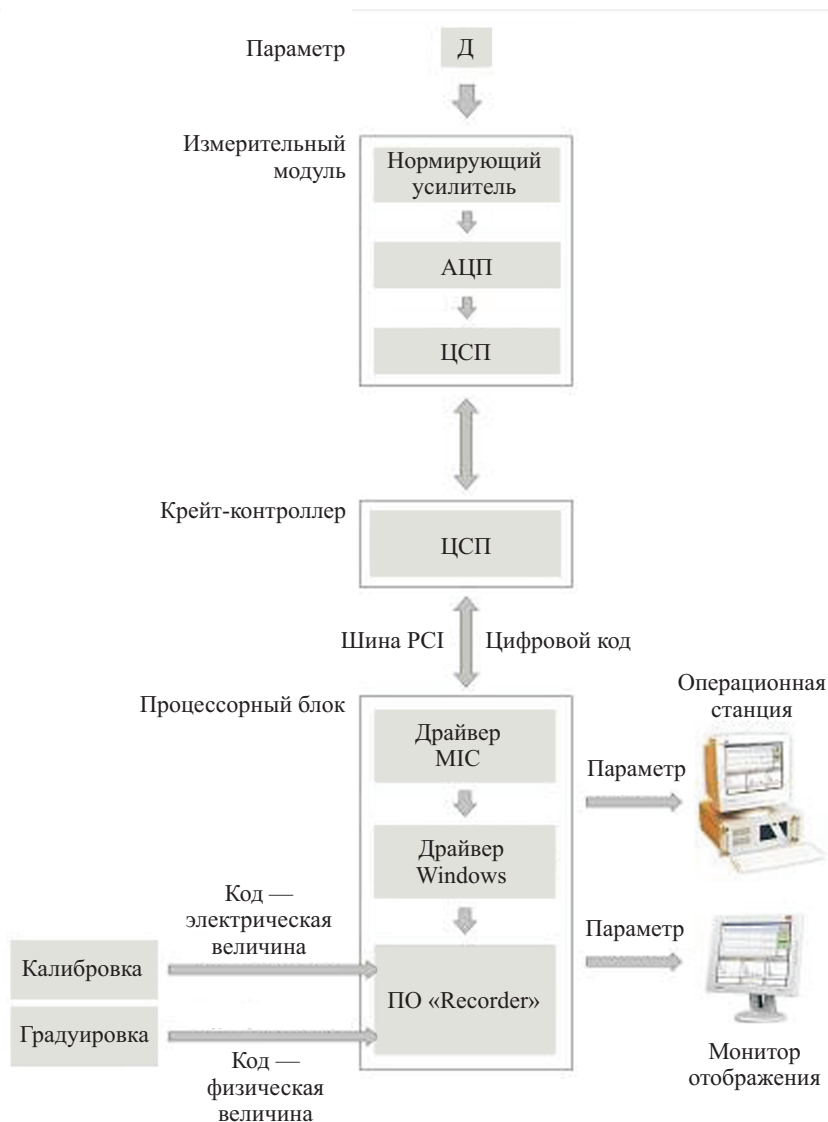


Рис. 4. Структурная схема комплекса МІС-200

Таблица 2

**Основные параметры измерительных модулей**

Измерительный модуль	Диапазон измерения	Число каналов	Частота опроса на канал, Гц	Основная приведенная погрешность, %	Частота опроса по каналу модуля, Гц	Максимальное напряжение перегрузки по входам, В
МС-114	$\pm 0,00125 \dots \pm 10$ В	16 дифференциальных	До 4 800	0,025	—	± 40
МС-114С	0...5 мА, 0...20 мА	16 дифференциальных	До 4 800	0,05	—	
МС-451	До 400 Гц	8	—	0,001	До 200	

В качестве программного обеспечения в комплексе МИС-200 используется программа WinПОС, предназначенная для обработки измерительной информации с помощью стандартных математических и статистических алгоритмов, графического представления данных и документирования.

WinПОС позволяет создавать свои собственные алгоритмы обработки сигналов и автоматизировать процесс обработки: входного сигнала — от выбора входного файла до документирования результатов, анализ нестационарных, динамических процессов, в том числе и вибрационных.

Комплекс МИС-200 (рис. 5) оснащен регистратором Recorder, который выполняет функции цифрового магнитофона, осуществляет специализированную обработку данных и формирует управляющие воздействия.

Испытания ГМ и оценка результатов на соответствие требованиям стандартов выполнены в соответствии с указаниями, представленными в документе, утвержденном заместителем начальника ФГУП 21-й НИИИ МО РФ: «Методика испытаний унифицированного базового гусеничного шасси ГМ на плавность хода» (далее — «Методика испытаний»).

Исследования проведены в сухую погоду при положительной температуре окружающего воздуха. Перед началом проведения исследовательских работ трансмиссия, ПГР и измерительная аппаратура были прогреты до рабочих температур с заездом на участок с синусоидальными неровностями контрольным пробегом не менее 2 км.

При испытаниях приняты два вида дорог, имеющих гармонический и случайный микропрофиль с соответствующими методике скоростями движения:

- участки контрольно-измерительной трассы (КИТ) с прямыми волнами синусоидального профиля и длиной волн 4, 5, 8 м при скоростях движения — 25, 30, 35, 40, 45, 50 км/ч;
- изношенный участок динамометрической дороги длиной 500 м при скорости движения 50 км/ч.

При всех исследованиях на КИТ определяли температуру ПГР с фиксацией времени движения машины и давления газа в рессорах. Датчики давления устанавливали вместо зарядных клапанов на пер-



Рис. 5. Измерительно-вычислительный комплекс МИС-200

вых, вторых и шестых рессорах. Значения тепловой нагруженности ПГСП определяли после каждого заезда по синусоидальным неровностям КИТ и динамометрическому участку с установленными скоростями движения (табл. 3).

Таблица 3

**Результаты экспериментального исследования**

v, км/ч	Время начала заезда	Температура ПГР, °С (правый борт)						Температура ПГР, °С (левый борт)					
		ПГР1 (пр)	ПГР2 (пр)	ПГР3 (пр)	ПГР4 (пр)	ПГР5 (пр)	ПГР6 (пр)	ПГР6 (лев)	ПГР5 (лев)	ПГР4 (лев)	ПГР3 (лев)	ПГР2 (лев)	ПГР1 (лев)
0*	—	4	1	1	3	1	5	8	2	2	1	1	4
25	10.58	21	10	4	10	9	15	27	13	17	10	10	25
30	11.10	30	16	12	18	19	26	36	21	25	17	20	34
35	11.25	45	29	22	23	29	27	44	27	33	27	32	45
40	11.41	47	44	38	30	45	35	49	31	44	38	41	50
45	11.55	58	50	43	52	50	42	59	46	46	48	52	63
50	12.10	64	52	52	57	57	54	63	56	57	59	64	64

\* Номинальный клиренс.

В соответствии с техническими и конструктивными параметрами ГМ, а также данными, представленными в табл. 3 и в программе — «Методика испытаний», было смоделировано движение ГМ по неровностям, аналогичным эксперименту. Начальными условиями распределения температур ПГР перед началом каждого нового заезда служило среднее значение температур поверхностей всех ПГР по окончании предыдущего заезда (табл. 4, рис. 6).

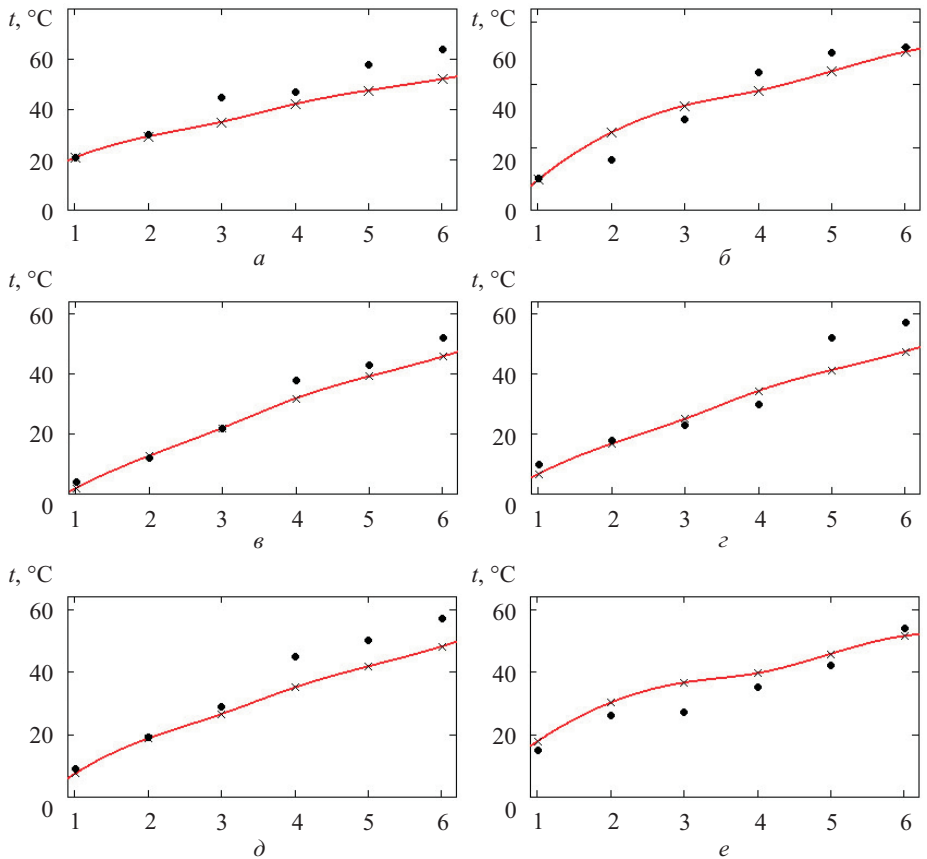
Таблица 4

**Результаты моделирования движения гусеничной машины по КИТ**

Скорость заезда, км/ч	Номер подвески											
	1		2		3		4		5		6	
	$t_{пов},$ °С	$N,$ кВт	$t_{пов},$ °С	$N,$ кВт	$t_{пов},$ °С	$N,$ кВт	$t_{пов},$ °С	$N,$ кВт	$t_{пов},$ °С	$N,$ кВт	$t_{пов},$ °С	$N,$ кВт
25	20,8	5,47	9,6	2,06	2,0	0,46	6,7	1,48	7,5	1,75	17,8	4,55
30	29,2	8,0	24,7	3,75	12,7	0,89	16,7	2,6	18,7	2,8	30,2	8,2
35	35	11,6	33,2	6,7	22	1,32	25	3,25	26,5	3,74	36,5	12,2
40	42,1	14,0	37,9	9,7	31,8	2,05	34,3	4,17	35	4,89	39,5	10,8
45	47,5	16,6	44,1	12,8	39,1	3,1	41,2	5,45	41,7	6,4	45,7	13,7
50	52	21,8	50,3	15,8	45,7	4,43	47,4	7,0	48,1	8,0	51,4	22,0

*Примечание.*  $t_{пов}$  — температура поверхности,  $N$  — мощность тепловыделения





**Рис. 6.** Результаты моделирования заезда по КИТ:

*a* — первая подвеска; *б* — вторая подвеска; *в* — первая подвеска; *г* — вторая подвеска; *д* — первая подвеска; *е* — вторая подвеска; по оси абсцисс: 1–6 — номера экспериментов; точки на графиках — результаты экспериментов; крестики — результаты моделирования; кривыми показана аппроксимация моделирования

Максимальная погрешность определения температур ПГР при имитационном моделировании (табл. 5) не превышает 21 %.

Таблица 5

**Сравнение контрольных параметров экспериментального исследования и имитационного моделирования при заезде по КИТ со скоростью 50 км/ч**

Характеристика исследования	Средние температуры ПГР обоих бортов, °С					
	ПГР1	ПГР2	ПГР3	ПГР4	ПГР5	ПГР6
Экспериментальные исследования	64	58	55,5	57	56,5	58,5
Имитационное моделирование	52	50,3	45,7	47,4	48,1	51,4
Погрешность, %	18,8	13,3	17,7	16,8	17,5	12,1

При сравнении результатов имитационного моделирования и экспериментальных исследований видно, что значения температур ПГР левого и правого бортов реальной машины различаются, в то время как имитационное моделирование демонстрирует совпадение значений. Расхождение температур рессор по бортам можно объяснить временными задержками при измерении температуры, а также погрешностями при заправке ПГР газом и рабочей жидкостью. Кроме того, различия в температуре могут быть обусловлены развесовой машины, отличающейся от расчетного распределения масс по объему.

**Выводы.** Имитационное математическое моделирование движения машины по периодическому профилю и сравнение его результатов с экспериментальными данными позволяют сделать заключение об адекватности разработанной модели ПГР, используемой в составе модели движения транспортной машины, объектам исследования. Можно сделать вывод о практической пригодности математической модели для оценки теплонагруженности ПГР и исследования внутренней динамики ее работы как отдельно, так и в составе машины. В целях снижения теплонагруженности ПГР целесообразно применять систему принудительного охлаждения рабочей жидкости либо управление демпфированием.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Смирнов А.А. *Математическое моделирование пневмогидравлических устройств систем поддрессоривания транспортных средств*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1999, 179 с.
- [2] Жилейкин М.М., Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Экспериментальное исследование нагрузочных характеристик двухкамерной пневмогидравлической рессоры подвески автомобильных платформ нового поколения средней и большой грузоподъемности. *Наука и образование*, 2011, № 12. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/346642.html>
- [3] Котиев Г.О., Смирнов А.А., Шилкин В.П. *Исследование рабочих процессов в пневмогидравлических системах поддрессоривания гусеничных машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 80 с.
- [4] Сухоруков А.В. *Управление демпфирующими элементами в системе поддрессоривания быстроходной гусеничной машины*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2003, 149 с.
- [5] Фурунжиев Р.И., Останин А.Н. *Управление колебаниями многоопорных машин*. Москва, Машиностроение, 1984, 206 с.
- [6] Поздеев А.В., Новиков В.В., Дьяков А.С., Похлебин А.В., Рябов И.М., Чернышов К.В. *Регулируемые пневматические и пневмогидравлические рессоры подвесок автотранспортных средств*. Волгоград, ВолгГТУ, 2013, 244 с.
- [7] Котиев Г.О. *Прогнозирование эксплуатационных свойств систем поддрессоривания военных гусеничных машин*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2000. 265 с.
- [8] Котиев Г.О., Сарач Е.Б. *Комплексное поддрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 184 с.

- [9] Ципилев А.А. Исследование теплонагруженности пневмогидравлических устройств систем подрессоривания быстроходных транспортных машин. *Труды НАМИ*, 2015, вып. № 261, с. 152–172.
- [10] Современные тенденции развития науки и технологий. *Сб. докл. XV Международной науч.-практ. конф.* (г. Белгород, 30.06.2016), 2016, 151 с.

Статья поступила в редакцию 05. 10. 2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сарач Е.Б., Ципилев А.А., Наказной О.А. Оценка тепловой нагруженности элементов системы подрессоривания гусеничной машины. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1563>

**Сарач Евгений Борисович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области транспортного машиностроения.

**Ципилев Александр Анатольевич** — ассистент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: системы подрессоривания транспортных машин; математическое моделирование пневмогидравлических систем подрессоривания.

**Наказной Олег Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных публикаций в области теории движения многоцелевых гусеничных машин.

## Thermal load evaluation of the tracked vehicle suspension system

© E.B. Sarach, A.A. Tsipilev, O.A. Nakaznoy

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*Thermal load problems of vehicle suspension systems are of particular importance in studying the machine movement dynamics and its smooth running. High thermal load of pneumatic-hydraulic devices results in the suspension system failure risk due to destruction or a quick seal wear. For a more accurate thermal stress assessment it is necessary to use mathematical modeling simulation. The article presents the field trials results of intermediate weight category tracked vehicle and engine traffic simulation for the same harmonic irregularities. The article shows the mathematical model high value, gives recommendations to reduce the suspension system thermal load of the tracked vehicle under study.*

**Keywords:** *transport machines, pneumatic-suspension, suspension system, experiment, smooth, heat load, finite difference method of Schmidt, Simulink, Simscape, SimHydraulics.*

### REFERENCES

- [1] Smirnov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie pnevmogidravlicheskikh ustroystv sistem podressorivaniya transportnykh sredstv*. Diss. cand. tekhn. nauk [Mathematical modeling pneumatic/hydraulic devices of vehicle cushioning systems. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Moscow, 1999, 179 p.
- [2] Zhileykin M.M., Kotiev G.O., Sarach E.B. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2011, no. 12. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/346642.html>
- [3] Kotiev G.O., Smirnov A.A., Shilkin V.P. *Issledovanie rabochnik protsessov v pnevmogidravlicheskikh sistemakh podressorivaniya gusenichnykh mashin* [Research of working processes in pneumatic/hydraulic cushioning systems of tracked vehicles]. Moscow, BMSTU Publ., 2001, 80 p.
- [4] Sukhorukov A.V. *Upravlenie dempfirmuyushchimi elementami v sisteme podressorivaniya bystrokhodnoy gusenichnoy mashiny*. Diss. cand. tekhn. nauk [Damping element control in the cushioning system of high-speed tracked vehicle. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Moscow, 2003, 149 p.
- [5] Furunzhiev R.I., Ostanin A.N. *Upravlenie kolebaniyami mnogoopornykh mashin* [Vibration control in multiple-seated machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 206 p.
- [6] Pozdeev A.V., Novikov V.V., Dyakov A.S., Pokhlebin A.V., Ryabov I.M., Chernyshov K.V. *Reguliruemye pnevmaticheskie i pnevmogidravlicheskie resory podvesok avtotransportnykh sredstv* [Adjustable pneumatic and hydro-pneumatic springs of vehicle suspensions]. Volgograd, Volgograd State technical University Publ., 2013, 244 p.
- [7] Kotiev G.O. *Prognozirovanie ekspluatatsionnykh svoystv sistem podressorivaniya voennykh gusenichnykh mashin*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Prediction of operational properties of military tracked vehicle cushioning systems. Dr. Eng. Sci. Diss.]. Moscow, BMSTU Publ., 2000, 265 p.
- [8] Kotiev G.O., Sarach E.B. *Kompleksnoe podressorivanie vysokopodvizhnykh dvukhzhvennykh gusenichnykh mashin* [Integrated cushioning of highly mobile articulated tracked vehicle]. Moscow, BMSTU Publ., 2010, 184 p.

- [9] Tsipilev A.A. *Issledovanie teponagruzhennosti pnevmogidravlicheskikh ustroystv system podressorivaniya bystrokhodnykh transportnykh mashin* [The research of heat load of cushioning system pneumatic/hydraulic devices of high-speed vehicles]. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI]. Moscow, 2015, no. 261, pp. 151–172.
- [10] *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii* [Modern trends in the development of science and technology]. *Sbornik dokladov XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Coll. rep. of the XV International Scientific and Practical Conference]. Belgorod, June 30, 2016, 151 p.

**Sarach E.B.** (b. 1975) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1999. Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Multi-Purpose Tracked Vehicles and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 50 publications in the field of transport mechanical engineering.

**Tsipilev A.A.** (b. 1961) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2009. Assistant of the Department of Multi-Purpose Tracked Vehicles and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include transport machine suspension system; pneumatic hydraulic suspension systems mathematical modeling.

**Nakaznoy O.A.** (b. 1964), Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Multi-Purpose Tracked Vehicles and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 70 publications in the field of theory of multi-purpose tracked vehicles motion.