

Исследование тепловой нагруженности пневмогидравлической рессоры гусеничной машины легкой весовой категории

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

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

Исследована внутренняя динамика пневмогидравлических устройств особое внимание уделено теплонагруженности, поскольку тепловая напряженность узлов системы подрессоривания определяет работоспособность всей конструкции. Рассмотрены вопросы применения имитационного математического моделирования в среде Simulink / Simscape при исследовании пневмогидравлической рессоры тепловой нагруженности. Показано обоснование методики оценки тепловой нагруженности с использованием метода конечных разностей Шмидта. Приведены результаты исследования динамики работы пневмогидравлической рессоры, представлены результаты имитационного моделирования. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с данными стендовых испытаний пневмогидравлической рессоры гусеничной машины легкой весовой категории. Предложены рекомендации по расчету системы охлаждения.

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

Введение. При разработке пневмогидравлических устройств (ПГУ), как правило, возникает вопрос наиболее точного и наименее трудоемкого способа их расчета. Одним из таких способов, хорошо сопоставимым с экспериментальными исследованиями, является математическое моделирование физических процессов [1–7].

Математическое моделирование подразумевает создание так называемой математической модели — формульного и численного аналога физической системы, т. е. описание поведения физической системы с помощью систем линейных и дифференциальных уравнений. Математическая модель при условии ее адекватности экспериментальным исследованиям позволяет прогнозировать поведение физической системы в реальных условиях, а также прорабатывать различные варианты конструктивного исполнения, оптимизировать конструкцию, определять преимущества и недостатки той или иной схемы исполнения, находить возможные проблемы, имеющие риск возникновения при реальной эксплуатации.

Наиболее распространен в кругу инженеров способ математического моделирования, заключающийся в имитационном моделировании в среде MATLAB/Simulink. Расширение Simulink — это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая с помо-

щью блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, в том числе дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы [8]. Удобство использования Simulink заключается в отсутствии необходимости выбирать самостоятельно алгоритмы решения задач. Вместо этого исследователь может формировать аналог математической модели в форме направленных графов из имеющихся блоков. Такой подход позволяет снизить требуемую квалификацию пользователя, поскольку исключается необходимость умения самостоятельно решать дифференциальные и линейные уравнения повышенной сложности.

Графическая среда Simulink включает в себя, однако, еще и расширение Simscape, позволяющее, в свою очередь, моделировать поведение физических систем «как есть», т. е. собирать математическую модель из готовых блоков, имитирующих реальные механические, электрические, гидравлические, пневматические, тепловые и иные узлы и механизмы. Подобный подход не только дает возможность визуализировать математическую модель, но и, снижая трудоемкость формирования имитационной модели, сравнительно легко исследовать физические системы практически любой сложности.

Описание имитационной математической модели. Исследование теплонагруженности. В качестве объекта исследования была выбрана опытная модернизированная пневмогидравлическая рессора (ПГР) гусеничной машины (ГМ) легкой весовой категории. При моделировании динамики ее работы приняты следующие допущения:

- газовые процессы в ПГР проходят адиабатически;
- в жидкости отсутствует нерастворенная газовая составляющая;
- смена режима течения с ламинарного на турбулентный происходит единовременно, по достижении критического числа Рейнольдса;
- падение давления жидкости в системе ниже абсолютного нуля приводит к остановке;
- нагрев жидкости — единовременный и равномерный по объему; тепловая инерция жидкости не учитывается;
- процессы сжатия — расширения газа за один цикл имеют нулевое изменение тепловой энергии;
- нагрев всех металлических деталей равномерен; корпус и цилиндры условно приведены к деталям одинаковой и равномерной по периметру толщине;
- физические свойства металлических деталей неизменны во времени;
- температура газа в газовой полости равна усредненной температуре наружной поверхности рессоры.

Вид математической модели ПГР представлен на рис. 1. Расчет теплонагруженности был проведен в соответствии с методом конечных

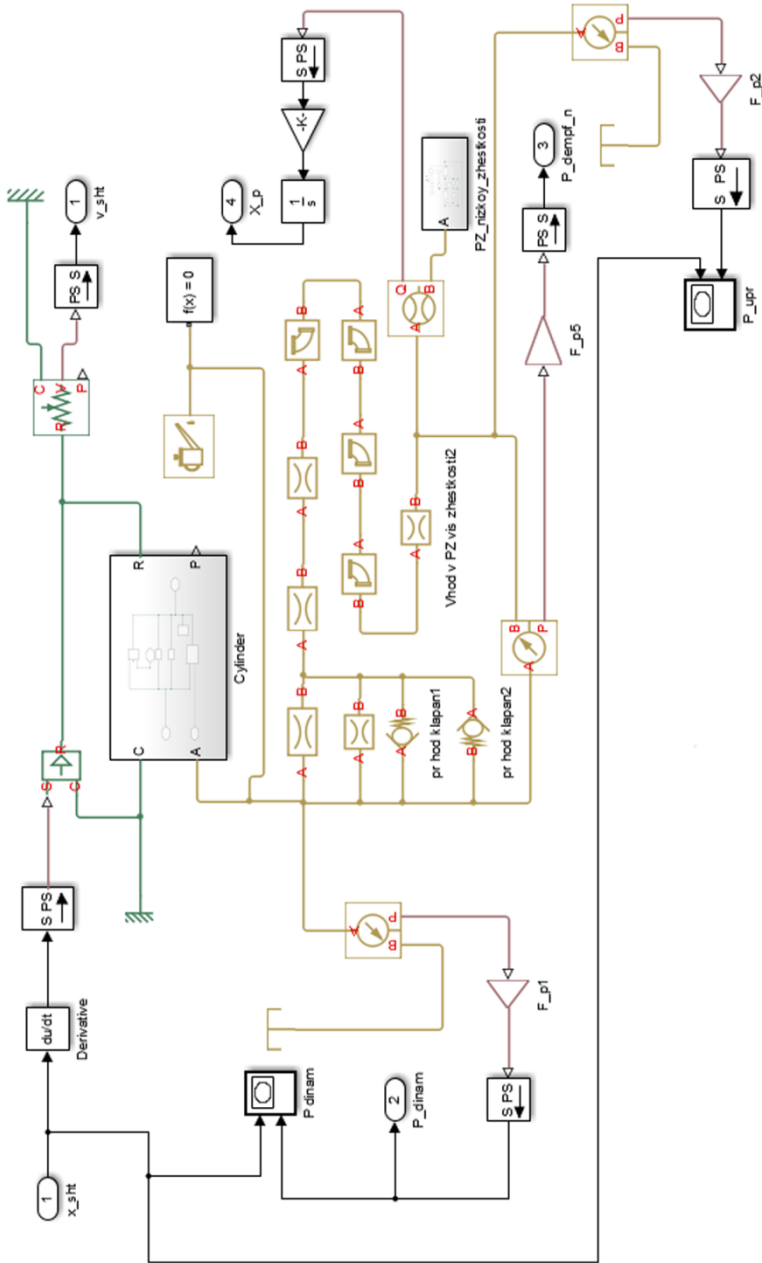


Рис. 1. Модель ПГР исследуемой машины

разностей Шмидта. Подробное описание метода в рамках работы математической модели учета теплонагруженности изложено в работе [9].

На рис. 2 представлена статическая упругая характеристика ПГР, полученная по результатам моделирования, на рис. 3 — совмещенные демпфирующие характеристики, полученные путем имитационного математического моделирования и стендовых испытаний, на рис. 4 — совмещенная с экспериментальными данными динамическая характеристика нагружения ПГР возмущением с амплитудой колебаний 50 мм и частотой 1 Гц.

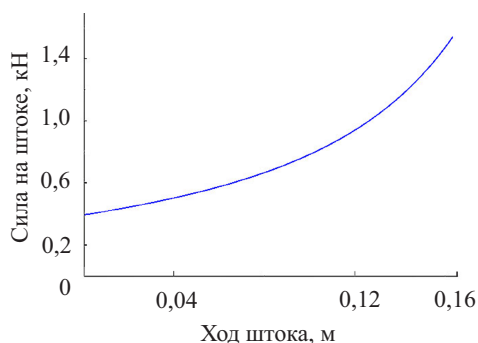


Рис. 2. Статическая упругая характеристика ПГР

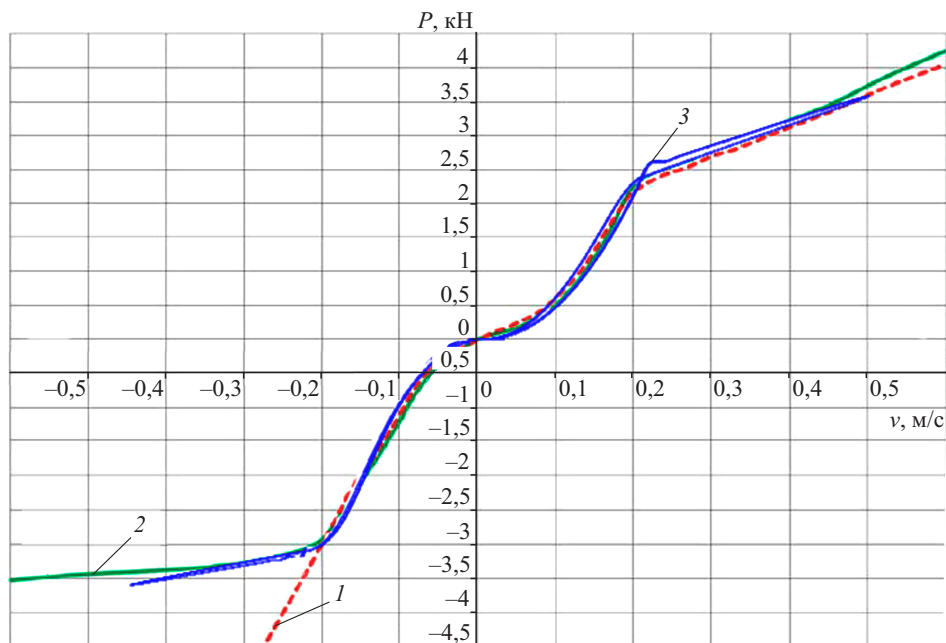


Рис. 3. Демпфирующие характеристики ПГР:

1 — серийная рессора (эксперимент); 2 — опытная рессора (эксперимент); 3 — опытная рессора (результаты моделирования); по оси абсцисс — скорость перемещения штока v , м/с; по оси ординат — сила неупругого сопротивления на штоке P , кН

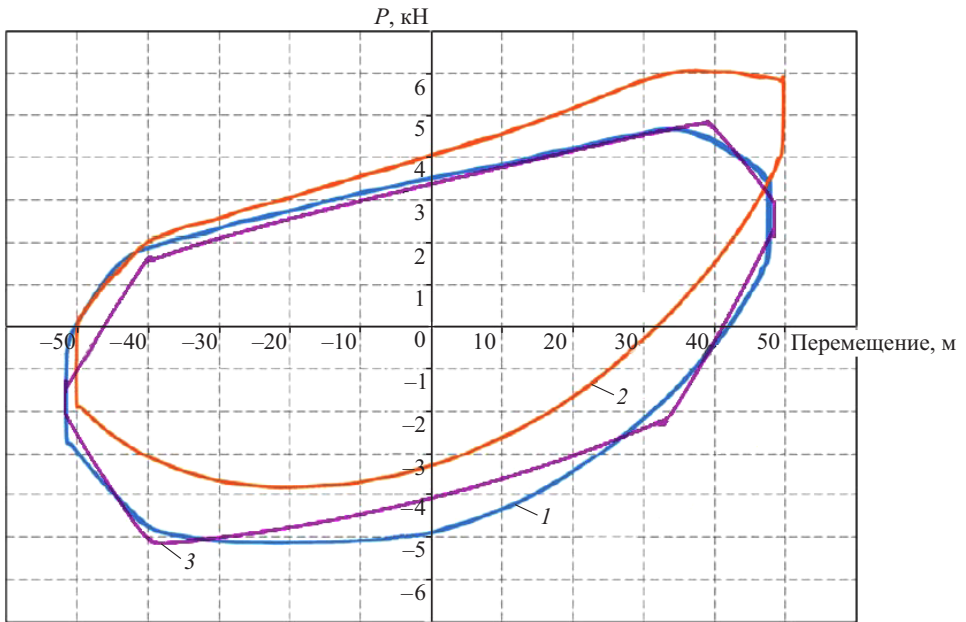


Рис. 4. Динамическая характеристика ПГР:

1 — при температуре 21,3 °С (эксперимент); 2 — при температуре 92,9 °С (эксперимент); 3 — при температуре 21,3 °С (результаты моделирования); по оси абсцисс — перемещение штока от среднего положения, м; по оси ординат — реакция на штоке, кН

При исследовании на теплонагруженность рессору возмущали указанным выше нагружением, мощность тепловыделения по результатам моделирования составляла 520 Вт, а по результатам эксперимента — 550 Вт. Погрешность определения мощности тепловыделения составляет 5,5 %.

Полученные по результатам моделирования и стендовых испытаний кривые теплонагруженности представлены на рис. 5.

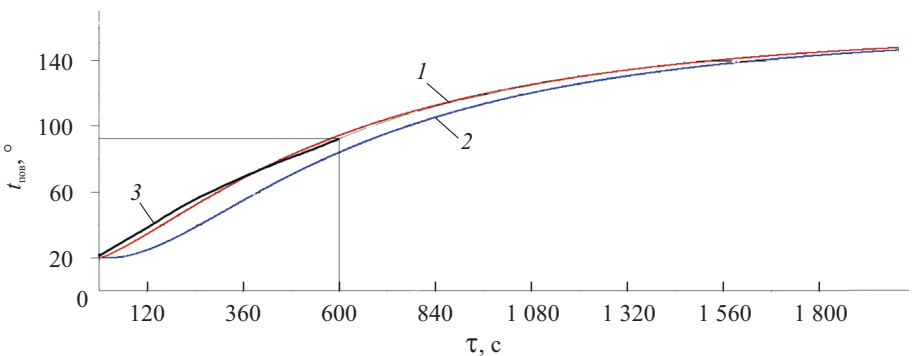


Рис. 5. Кривые нагрева ПГР:

1 — средняя температура жидкости (моделирование); 2 — средняя температура наружной поверхности ПГР (моделирование); 3 — пиковая температура наружной поверхности ПГР (эксперимент); $t_{\text{пов}}$ — температура наружной поверхности; τ — время нагружения

Проанализировав зависимость, представленную на рис. 5, можно отметить высокую корреляцию кривых нагрева жидкости при моделировании и изменение температуры корпуса при проведении эксперимента. Отсюда резюмируем, что с высокой вероятностью температура жидкости, полученная при моделировании, соответствует пиковой температуре корпуса для реального процесса нагружения. Погрешность определения температуры через 10 мин после начала эксперимента составляет для этих параметров 2,3 %, а погрешность определения прогнозируемой температуры установившегося теплового режима — не более 7,14 % при тренде выхода на 140 °С.

В табл. 1 представлены варианты исполнения системы принудительного охлаждения, для которых было проведено исследование изменения теплонагруженности ПГР рассматриваемой ГМ по сравнению с вариантом без принудительного охлаждения. Режим нагружения соответствует режиму, для которого получена динамическая характеристика (см. рис. 4).

Таблица 1

Варианты исполнения систем охлаждения

№ п/п	Удельная площадь теплообменника, приходящаяся на одну ПГР, м ²	Температура воздуха, °С	Скорость потока воздуха, проходящего через теплообменник, м/с
1	0,33 (2)	20	0
2	0,33 (2)	40	0
3	0,33 (2)	40	5,5
4	0,66 (4)	20	0
5	0,66 (4)	40	0
6	0,66 (4)	40	5,5

Примечание. В скобках — отношение приведенной к ПГР площади теплообмена к площади поверхности ПГР.

При моделировании принято допущение об отсутствии тепловой инерции жидкости и тепловой инерции радиатора теплообменника системы охлаждения, поэтому темпы нагрева будут близки темпу нагрева рессоры без системы принудительного охлаждения.

Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 6, 7. Числовые значения снижения теплонагруженности приведены в табл. 2.

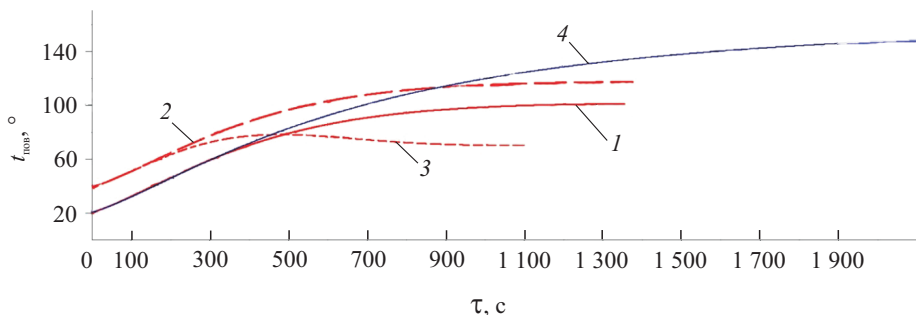


Рис. 6. Тренды выхода на стационарный тепловой режим:

1 — вариант 1 (см. табл. 1); 2 — вариант 2 (см. табл. 1); 3 — вариант 3 (см. табл. 1); 4 — без принудительного охлаждения; $t_{пов}$ — температура наружной поверхности; τ — время нагружения

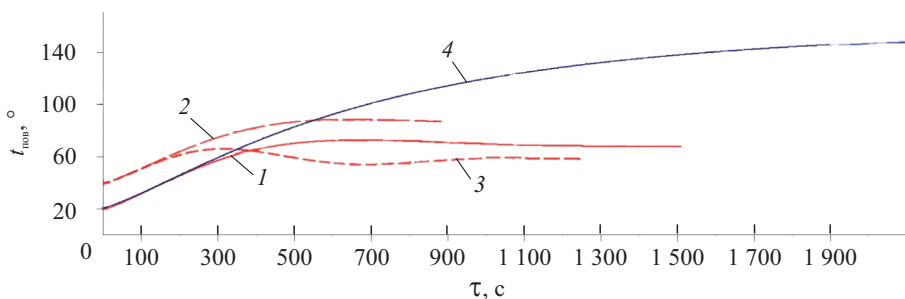


Рис. 7. Тренды выхода на стационарный тепловой режим:

1 — вариант 4 (см. табл. 1); 2 — вариант 5 (см. табл. 1); 3 — вариант 6 (см. табл. 1); 4 — без принудительного охлаждения; $t_{пов}$ — температура наружной поверхности; τ — время нагружения

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента

№ п/п	Температура установившегося режима, °C	Снижение температуры по сравнению с вариантом без принудительного охлаждения, %
1	100	33,33
2	117	22,22
3	71	52,67
4	68	54,67
5	98	34,67
6	59	60,67

Результаты моделирования стендовых испытаний, как правило, дают более высокие значения теплонагруженности, чем результаты работы ПГР в составе машины. Это можно объяснить отсутствием набегающего потока воздуха, который возникает при движении ма-

шины по трассе, а также более низкими значениями теплоотдачи в корпус машины. Тем не менее именно стендовые испытания позволяют оценить наиболее опасные и наименее благоприятные режимы нагружения узлов системы подрессоривания, при которых теплонагруженность будет максимальной.

Из результатов моделирования видно, что даже незначительное увеличение площади поверхности теплообмена позволяет существенно снизить теплонагруженность рессоры, если дополнительно обдувать теплообменник воздухом. При температуре воздуха 40 °С и площади поверхности радиатора теплообменника, равной удвоенной суммарной площади поверхностей рессор, температура установившегося теплового режима составляет 71 °С. Изменение упругой силы ПГР в этом случае по сравнению со случаем при заправочной температуре составляет 17 %. Такой рост незначителен и является допустимым.

Интенсификация мощности теплоотдачи при наличии принудительного обдува теплообменника воздухом пропорциональна изменению числа Нуссельта, которое, в свою очередь, пропорционально числу Рейнольдса, взятому в степени 0,65 [10]. Так как мощность теплоотдачи пропорциональна первой степени площади теплообмена [10], можно оценить интенсификацию теплоотдачи путем введения принудительного обдува через эквивалентное увеличение площади теплообмена:

$$\frac{F'}{F} \approx v^{0,65},$$

где F' — эквивалентная площадь теплообмена, м²; F — исходная площадь теплообмена, м²; v — скорость набегающего потока воздуха, м/с.

Так, для получения эффекта, эквивалентного четырехкратному увеличению площади, необходимо обеспечить течение воздуха через радиатор системы охлаждения со скоростью порядка 8 м/с.

Выводы. Результаты проведенного математического моделирования свидетельствуют о том, что применение системы принудительного охлаждения позволяет значительно снизить теплонагруженность ПГР, при этом увеличение площади поверхности теплообмена хотя и является более эффективным, чем увеличение скорости прохождения воздуха через теплообменник, но не представляется обязательным требованием. Возможна установка радиатора теплообменника с площадью поверхности, сопоставимой с суммарной площадью поверхности ПГР, но с принудительным обдувом со скоростью порядка 6...8 м/с для получения температуры установившегося теплового режима рессор 60...80 °С.

Кроме этого, принудительная система охлаждения выравнивает теплонагруженность рессор, частично разгружая наиболее напряженные узлы подвески за счет увеличения температуры менее нагруженных ПГР.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Смирнов А.А. *Математическое моделирование пневмогидравлических устройств систем подрессоривания 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 подрессоривания гусеничных машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 80 с.
- [4] Котиев Г.О. *Прогнозирование эксплуатационных свойств систем подрессоривания военных гусеничных машин*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2000, 265 с.
- [5] Сухоруков А.В. *Управление демпфирующими элементами в системе подрессоривания быстроходной гусеничной машины*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2003, 149 с.
- [6] Фурунжиев Р.И., Останин А.Н. *Управление колебаниями многоопорных машин*. Москва, Машиностроение, 1984, 206 с.
- [7] 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.
- [8] *Simulink*. URL: <http://matlab.ru/products/simulink> (дата обращения 20.09.2016).
- [9] Ципилев А.А. Исследование теплонагруженности пневмогидравлических устройств систем подрессоривания быстроходных транспортных машин, *Труды НАМИ*, 2015, вып. № 261, с. 152–172.
- [10] Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. Москва, Энергия, 1977.

Статья поступила в редакцию 05.10.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сарач Е.Б., Наказной О.А., Ципилев А.А. Исследование тепловой нагруженности пневмогидравлической рессоры гусеничной машины легкой весовой категории. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1565>

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.

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.

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.

The research of thermal load of light weight tracked vehicle pneumatic/hydraulic spring

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

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The research of the pneumatic/hydraulic unit (PHU) internal dynamics is very urgent task. The research of heat load is of particular importance since it is thermal stress of cushioning system components that determines the performance of the structure. The article describes the research of PHU thermal load using mathematical simulation in Simulink / Simscape environment. Methods of thermal load estimation are based on the Schmidt method of finite differences. The results of the PHU operation dynamics research are presented. The results of simulation are shown and compared with the results of bench tests of a light weight tracked vehicle PHU. The recommendations for the calculation of the cooling system are given.

Keywords: *vehicles, pneumatic/hydraulic springs, cushioning system, experiment, running smoothness, heat-load, Schmidt method of finite difference, Simulink, Simscape, SimHydraulics.*

REFERENCES

- [1] Smirnov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie pnevmogidravlicheskih ustroystv system 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 rabochikh protsessov v pnevmogidravlicheskih sistemakh podressorivaniya gusenichnykh mashin* [Research of working processes in pneumatic/hydraulic cushioning systems of tracked vehicles]. Moscow, BMSTU Publ., 2001, 80 p.
- [4] Kotiev G.O. *Prognozirovanie ekspluatatsionnykh svoystv system 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.
- [5] Sukhorukov A.V. *Upravlenie dempfiruyushchimi 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.
- [6] Furunzhiev R.I., Ostanin A.N. *Upravlenie kolebaniyami mnogoopornykh mashin* [Vibration control in multiple-seated machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 206 p.
- [7] Pozdeev A.V., Novikov V.V., Dyakov A.S., Pokhlebkina 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.
- [8] *Simulink*. Available at: <http://matlab.ru/products/simulink> (accessed September 20, 2016).

- [9] Tsipilev A.A. Issledovanie teplonagruzhennosti pnevmogidravlicheskiikh 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] Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1977.

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

Nakaznoy O.A. (b. 1964), Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 70 research publications in the field of theory of multipurpose tracked vehicle motion.

Tsipilev A.A. (b. 1987) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2009. Assistant, Department of Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: vehicle cushion systems, mathematical modeling pneumatic/hydraulic cushion systems.