

УДК 620.179.13

**А. Е. Мойсейчик<sup>1</sup>, Е. А. Мойсейчик<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, 220013, Минск,  
просп. Независимости, 65, +375 (17) 293 91 12<sup>2</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,  
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь  
+375 (17) 299 92 59, emoiseitchik@mail.ru

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПАРАМЕТРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ АГРЕГАТОВ И КОНСТРУКЦИЙ МАШИН

Рассмотрены физические основы использования температуры как диагностического параметра агрегатов и конструкций машин. Выделены особенности функционирования отдельных агрегатов и конструкций автосамосвалов БелАЗ и проанализирована практика их тепловой диагностики.

**Ключевые слова:** тепловой мониторинг; узлы и сооружения; техническое состояние.

Рис. 1. Библиогр.: 23 назв.

**A. E. Moyseychik<sup>1</sup>, E. A. Moyseychik<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, 220013, Minsk, Nezavisimosti Ave, 65, +375 (17) 293 91 12<sup>2</sup>Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str.,  
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (17) 299 92 59, emoiseitchik@mail.ru

## EFFICIENCY OF USING THE TEMPERATURE PARAMETER FOR THE DIAGNOSTICS OF MACHINES' UNITS AND CONSTRUCTIONS

The physical grounds for using temperature as a diagnostic parameter to investigate machines' units and constructions are considered. The peculiarities of functioning of separate units and constructions of dump trucks of the Belarusian automobile plant are singled out, and the practice of their thermal diagnostics is analyzed.

**Key words:** thermal monitoring; units and constructions; technical condition.

Fig. 1. Ref.: 11 titles.

**Введение.** В машиностроении и эксплуатации автотракторной техники методам тепловой диагностики в последние годы уделяется возрастающее внимание. При тяжелых режимах работы наличие бортовых систем диагностики существенно сказывается на эксплуатационной надежности и долговечности машин.

**Основная часть.** Особенно актуальна вышеуказанная проблема для эксплуатирующихся карьерных автосамосвалов [1—9]. Использование температуры в качестве диагностического параметра оценки работоспособности узлов и агрегатов машин предопределено физической природой процессов, протекающих при их кинематической работе, в результате которой до 95% механических и других форм энергии превращаются в тепловую и вызывают повышение температуры трущихся деталей, смазывающих и охлаждающих сред, пластически деформированных зон несущих элементов конструкций. В основных агрегатах автомобилей и тракторов, например, двигателях внутреннего сгорания, температуру охлаждающей среды контролируют постоянно и по ней судят о его работоспособности. В остальных агрегатах, содержащих смазывающие среды (гидромеханические передачи, коробки переключения передач, редукторы ведущих мостов, гидравлические системы), постоянного контроля их температуры не ведется. Но для большегрузных карьерных автосамосвалов нагрузки на трансмиссионные узлы намного выше, чем соответствующие нагрузки для автомобилей других типов. Так, эксперименты [8] показали, что между температурой масла редукторов мотор-колес (РМК) автосамосвалов

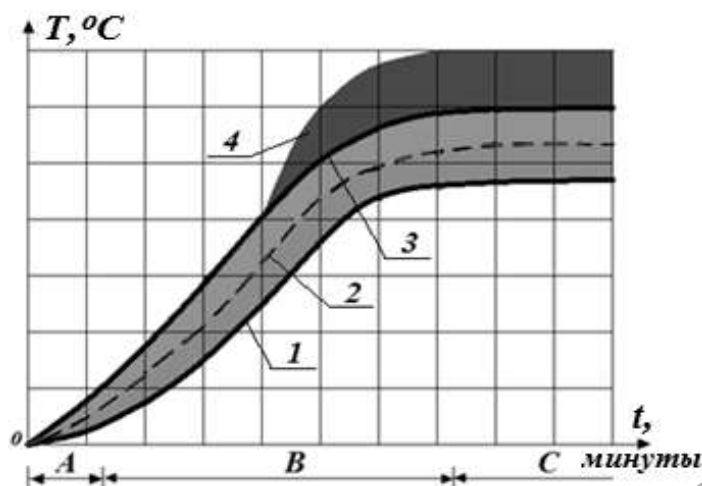
БелАЗ и коэффициентом использования их грузоподъемности существует тесная корреляционная зависимость. Нагрев масла в РМК часто превышает  $120^{\circ}\text{C}$ , а в легкое время при температуре окружающего воздуха  $30^{\circ}\text{C}$  зафиксировано максимальное значение температуры масла в РМК около  $161^{\circ}\text{C}$  [8]. Нагрев масла в основном происходит за счет теплообмена с нагретыми поверхностями трущихся деталей и разогретыми металлическими частицами, попадающими в масло с поверхностей трения. При повышенных температурах трансмиссионное масло теряет свои смазывающие свойства и это приводит к ускорению износа поверхностей трения агрегатов. В других трансмиссионных узлах нагрев происходит по тому же механизму, что и в РМК. Другая группа узлов и конструкций машин работает при воздействии переменных и динамических нагрузок (пневматические шины, несущие рамы, балки, детали агрегатов и т. п.). В зонах изменений формы сечений, конструктивно-технологических дефектов, трещин в металлических изделиях при работе возникают области пластических [10] или вязкопластических деформаций [6; 7], в которых протекают процессы внутреннего трения. Нагрев материала в таких зонах происходит по механизму деформационного теплообразования [10].

Высокая частота отказов шин карьерных автосамосвалов является причиной значительных затрат на поддержание работоспособности колес карьерных автосамосвалов (25...30% и более от суммы расходов на транспортирование массы [6]). Так, отказы шин карьерных автосамосвалов БелАЗ-75131 происходят, в основном, из-за износа протектора и порезов (около 96%). Появлению таких дефектов в шинах способствуют вздутия в материале шин, отслоения каркаса, расслоения и другие факторы, за появление которых ответственны процессы генерации теплоты при вязкопластических деформациях и термоактивация разрушения. В шинах модели 33.00R51 температура материала растет со средней скоростью  $10^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  в первые 10 часов работы автосамосвалов БелАЗ-75131, а в дальнейшем увеличивается не более, чем на  $1...3^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ , достигая за время работы примерно  $110^{\circ}\text{C}$  [6]. Проведенные авторами работы [6] исследования зависимости температуры шин от средней температуры окружающего воздуха ( $t_{\text{ср}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), средней эксплуатационной массы, приходящейся на шины колес передней ( $Q_{\text{п.о}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) и задней оси ( $Q_{\text{з.о}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), средней эксплуатационной скорости автосамосвала БелАЗ-75131 ( $V_{\text{ср.э}}$ , км/ч) позволили получить [6] регрессионные модели для ( $t_{\text{ш.п.о}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) и ( $t_{\text{ш.з.о}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ):

$$t_{\text{ш.з.о}} = 31,7 + 0,6 t_{\text{ср}} + 0,148 Q_{\text{з.о}} V_{\text{ср.э}};$$

$$t_{\text{ш.п.о}} = 26,5 + 0,6 t_{\text{ср}} + 0,172 Q_{\text{п.о}} V_{\text{ср.э}}.$$

Тепловое состояние движущихся шин зависит от многих факторов (размеров шины, геометрии рисунка протектора, механических и теплофизических характеристик материала шины, внутреннего давления в шине, нагрузки на колесо, скорости и продолжительности движения, температуры окружающего воздуха, температуры дорожного покрытия, его шероховатости и влажности) [11]. От температуры шины зависит сопротивление механическим воздействиям резины и корда шин, их сцепление, сопротивление качению колеса и долговечность шины [11]. Так, при повышении температуры от 0 до  $100^{\circ}\text{C}$  прочность капронового корда снижается до 20%, а резины и ее адгезии к корду — примерно в 2 раза [11]. При температуре выше критической для данного материала это снижение значительно. При металлокордном каркасе шин максимальные температуры в шинах на  $10...20^{\circ}\text{C}$  ниже, чем в шинах с неметаллическим каркасом. Такое явление объясняется большой теплопроводностью металлокорда, приводящей к распределению тепла на область шины, смежную с деформируемой. Нагрев произвольного агрегата (изделия) карьерного автосамосвала при различных режимах его работы можно схематически представить в пространстве «температура агрегата ( $T$ ) — продолжительность работы автосамосвала ( $t$ )» (рисунок 1). На отрезке  $A$  происходит нагрев в начальной стадии работы агрегата, на временном отрезке  $B$  развивается регулярный нагрев, а отрезок  $C$  соответствует работе агрегата в стационарном режиме. Схему рисунка 1 иллюстрируют данные исследований О. М. Ларина [11], проявившие



1 — нормативная температура агрегата; 2 — допустимая температура агрегата; 3 — критическая температура агрегата; 4 — потенциально опасная температура агрегата

**Рисунок 1. — Схема температурных режимов работы агрегата, изделия**

различные температурные режимы работы материала шин. Оптимальной для долговечности и работоспособности шины является температура  $70...75^{\circ}\text{C}$  (при температуре окружающего воздуха  $20^{\circ}\text{C}$ ). Температуру нагрева до  $100^{\circ}\text{C}$  автор работы [11] считает допустимой, интервал температур  $100...121^{\circ}\text{C}$  — критическим, а температуры выше  $121^{\circ}\text{C}$  — потенциально опасными для работоспособности шины. Для карьерных автосамосвалов БелАЗ критические температуры материала шин совпадают с данными исследования [11].

Авторы работы [12] основной физической причиной теплообразования в шине при ее движении считают способность резины «нагреваться при адиабатическом расширении». Это утверждение подкреплено ссылкой на [13]. В статье [14] экспериментально исследовано явление охлаждения—нагрева (эластокалорический эффект (ЭКЭ)) латексной резины при периодическом воздействии на нее растягивающей силы. В эксперименте на ленточных образцах из латексной резины шириной 5 мм, толщиной 0,6 мм и длиной от 7,3 до 44 мм варьировали относительной деформацией (от 200 до 700%) и частотой циклов нагружения (от 0,1 до 4 Гц). Латексная резина рассматривалась авторами [14] как высокоэластичный полимер, структура которого представляет собой звенья, соединенные в единую цепь. Такой материал обладает аномально низкой энтропией и отрицательным коэффициентом теплового расширения резины [14]. При растяжении резины цепи образца удлиняются с соответствующим снижением энтропии деформируемых объемов материала (при сжатии — обратный эффект). Указанные суждения позволили авторам [14] заключить, что причиной нагрева образца при растяжении и охлаждения его при обратном сжатии является энтропийная упругость. В эксперименте выявлено три диапазона частот циклов (низкие — от 0,1 до 0,3 Гц, средние — от 0,4 до 0,8 Гц, высокие — от 1 до 4 Гц), при которых проявляются различные ЭКЭ в резине (охлаждение, саморазогрев, уменьшение ЭКЭ). В первом диапазоне частот образец охлаждается ниже комнатной температуры, что является результатом следующих процессов при деформировании [14]. Быстрое (адиабатическое) растяжение приводит к нагреву резины. При дальнейшем теплообмене с окружающим воздухом растянутый образец охлаждается. Затем развивается быстрое (адиабатическое) сжатие и температура образца падает ниже начальной. Последующий разогрев при сжатии происходит медленнее, чем охлаждение развивалось при растяжении. Вследствие этого после ряда циклов устанавливается температура в образце ниже начальной (комнатной температуры).

В среднечастотном диапазоне в образце проявляется эффект саморазогрева из-за внутреннего трения.

При частотах растяжения—сжатия резины более 1 Гц величина ЭКЭ значительно падает. Причиной этого является деформирование полимерных цепей, сшитых между собой перекрестными связями. При растяжении такие цепи вытягиваются, перекрестные связи при обратном сжатии приходят в исходное состояние. При больших частотах сеть полимерных цепей и перекрестных связей изменяется при растяжении, а при сжатии образца времени на полное восстановление структуры недостаточно. Это и приводит к уменьшению ЭКЭ. Максимальная измеренная величина ЭКЭ в латексной резине достигает 14 К при относительной деформации образца, равной 700%, и частотах от 0,1 до 0,3 Гц [14].

В работах [15—20] исследовано изменение температуры различных участков шин от внутреннего давления в них, величины и частоты нагрузки на колесо и других факторов. В этих работах, выполненных независимо, в различные годы убедительно доказывается, что теплообразование в конструктивных элементах шин связано с гистерезисными потерями при деформировании различных участков шин. Деформирование элементов шин вызывает в материале большие внутренние напряжения, которые приводят к разрыву макромолекул резины, образованию макрорадикалов, способных инициировать различные механохимические реакции в резинах [21]. Разрыв изолированных макромолекул при механическом воздействии (механокрекинг) происходит при превышении внешними напряжениями прочности химической связи между атомами основной цепи макромолекулы, величина которой колеблется в пределах 4-6 Н-связь [21]. Механохимические реакции протекают в соответствии с законами химической термодинамики и сопровождаются тепловыми и другими эффектами. Эти реакции приводят к разрушению (механодеструкции) резин (полимеров), которая сопровождается эмиссией электронов, люминесценцией, а при наличии условий для торможения электронов, и рентгеновским излучением [21]. Это позволяет визуализировать процесс деформирования и разрушения резин с помощью тепловизионных приборов [9; 10; 18; 19]. Эмиссия электронов вызывает появление в макромолекулах резины стабильных активных центров. Следствием этого является существенное повышение активности резины в последующих реакциях окисления и структурирования [21]. Механодеструкция резин зависит от их физического состояния в момент деструкции; структуры макромолекул, условий протекания химического процесса (температура, скорость воздействия, среда, наличие примесей и т. д.) [21]. Механохимические реакции приводят к старению полимеров [21; 22], в результате чего следует ожидать различий в теплообразовании в новых и состаренных шинах. В работе [20] экспериментально показано, что «чем старше шина, тем выше ее температура» при деформировании.

В статье [19] приведены экспериментальные данные по тепловой нагруженности шины, работающей без избыточного давления в режиме качения колеса. Полученные результаты показали, что деформации шины в зоне контакта с опорной поверхностью вызывают меньший нагрев шины, чем изгибные деформации в элементах боковины. Поэтому шины при движении без избыточного давления нагреваются значительно интенсивнее в области боковины, чем в зоне протектора. Приращение температуры в боковине шины на 100...120% выше, чем по протектору [19]. В подобных условиях работают шины многих сельскохозяйственных машин [23]. Для обеспечения минимального давления на почву шины часто работают в режиме низкого и сверхнизкого рабочего давления (при давлении 35...100 кПа). Однако низкое рабочее давление в шинах сказывается на их сохранности и сроке службы. Очень низкое давление приводит к дефектам боковин, разгерметизации, разрушению шин. Повышенное давление в шинах вызывает увеличение износа протектора, неравномерный износ резины.

**Заключение.** В ходе исследования получены следующие результаты:

1) выполненный анализ экспериментальных исследований различных авторов доказывает перспективность технической диагностики тепловым методом агрегатов и узлов тяжело нагруженной автотракторной техники, источником теплообразования в которых являются процессы трения (двигатели, трансмиссионные узлы) или деформационное теплообразование в материалах (пневматические шины, стальные элементы с трещинами и др.);

2) контроль тяжело нагруженных и потенциально опасных агрегатов и несущих конструкций следует проводить в режиме мониторинга их теплового состояния системой бортовой диагностики с использованием как контактных, так и бесконтактных датчиков температуры;

3) применение тепловой диагностики шин сельхозтехники позволит найти оптимальные режимы их эксплуатации;

4) для более широкого применения теплового метода при диагностике автотракторной техники, в том числе техники сельскохозяйственного назначения, необходимо выполнение дополнительных исследований.

#### Список цитируемых источников

1. Бобровицкий, В. И. Механическое оборудование: техническое обслуживание и ремонт / В. И. Бобровицкий, В. А. Сидоров. — Донецк : Юго-Восток, 2011. — 238 с.

2. Богданов, С. А. Разработка метода определения изменения технического состояния агрегатов трансмиссии автомобилей по показателям их теплового состояния : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. А. Богданов. — Харьков, 1987. — 23 с.

3. Зайцев, А. В. Разработка метода теплового расчета ведущих мостов автомобилей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Зайцев. — Курган, 1999. — 19 с.

4. Бердик, Б. Г. Смазочное масло как элемент конструкции, неразрушающего контроля и диагностики техники при эксплуатации по состоянию / Б. Г. Бердик // Контроль. Диагностика. — 2005. — № 5. — С. 23—26.

5. Хорешок, А. А. Влияние условий эксплуатации на тепловое состояние редукторов мотор-колес автосамосвалов БелАЗ / А. А. Хорешок, Д. В. Стенин, Н. А. Стенина // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 2. — С. 28—30.

6. Горюнов, С. В. Прогнозирование эксплуатационной температуры пневматических шин карьерных автосамосвалов / С. В. Горюнов, В. М. Шарипов // Изв. ИГТУ «МАМИ». — 2012. — Т. 1. — № 2(14). — С. 89—92.

7. Шарипов, В. М. Прогнозирование долговечности пневматических шин карьерных автосамосвалов / В. М. Шарипов, С. В. Горюнов. — М. : Горная книга, 2015. — С. 127—130.

8. Стенин, Д. В. Оценка влияния загрузки на надежность редукторов мотор-колес карьерных автомобилей / Д. В. Стенин, Н. А. Стенина, Ю. Е. Воронов // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. — 2017. — № 2. — С. 94—99.

9. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. — М. : Спектр, 2009. — 544 с.

10. Мойсейчик, Е. А. Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом / Е. А. Мойсейчик // Прикладная механика и техн. физика. — 2013. — № 1. — С. 134—142.

11. Ларін, О. М. Теоретичні основи оцінки працездатності шин легкового автомобіля у експлуатації : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.20 / О. М. Ларін. — Киев, 2001. — 392 с.

12. Гринчук, П. С. Теплообмен с воздухом и профиль температуры в движущейся крупногабаритной шине / П. С. Гринчук, С. П. Фисенко // Инженер.-физич. журн. — 2016. — Т. 89. — № 6. — С. 1 387—1 391.

13. Кубо, Р. Термодинамика / Р. Кубо. — М. : Мир, 1970. — 304 с.

14. Эластокалорический эффект в резине при периодическом воздействии растягивающей силы / Е. В. Морозов [и др.] // Журн. техн. Физики. — 2016. — Т. 86. — Вып. 11. — С. 75—79.

15. Ларин, А. А. Исследование формирования теплового состояния пневматических шин в процессе стационарного качения [Электронный ресурс] / А. А. Ларин, И. М. Баранник. — Режим доступа: repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/16402. — Дата доступа: 04.04.2018.

16. Lin, Yeong-Jyh. Temperature prediction of rolling tires by computer simulation / Lin Yeong-Jyh, Hwang Sheng-Jye // Math. Comp. Simul. — 2004. — Vol. 67. — Pp. 235—249.

17. Коханенко, В. Б. Порівняльні дослідження температурних полів шин автомобілів / В. Б. Коханенко, А. М. Юрченко, О. М. Ларін // Автошляховик України. — 2002. — № 3. — С. 20—22.

18. McCarty, J. L. Temperature Distribution in an Aircraft Tire at Low Ground Speeds / J. Locke McCarty, J. A. Tanner // NASA Technical Paper 2195. Langley Research Center. — Hampton, 1983. — 34 p.

19. Еремін, Г. П. Экспериментальное исследование тепловой нагруженности безопасных колес / Г. П. Еремін, А. Б. Карташов, А. А. Смирнов // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. — 2015. — № 4. — С. 49—56.

20. Бабичева, О. Ф. Определение диапазона температурного режима троллейбусных шин [Электронный ресурс] / О. Ф. Бабичева, Н. П. Лукашова // Коммунал. хоз-во городов : науч.-техн. сб. № 74. — Режим доступа: [http://eprints.kname.edu.ua/4139/1/393-396\\_БАБИЧЕВА\\_О.\\_Ф..pdf](http://eprints.kname.edu.ua/4139/1/393-396_БАБИЧЕВА_О._Ф..pdf). — Дата доступа: 04.04.2018.

21. Карасёва, С. Я. Химические реакции полимеров / С. Я. Карасёва, В. С. Саркисова, Ю. А. Дружинина. — Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2012. — 125 с.

22. Зайков, Г. Е. Почему стареют полимеры / Г. Е. Зайков // Сорос. образоват. журн. — 2000. — Т. 6. — № 12. — С. 48—55.

23. Клепикова, С. Обувь для трактора [Электронный ресурс] / С. Клепикова // Агротехника и технологии. — Режим доступа: [www.agroinvestor.ru/technologies/article/15063-obuv-dlya-traktora](http://www.agroinvestor.ru/technologies/article/15063-obuv-dlya-traktora). — Дата доступа: 03.04.2018.

Поступила в редакцию 14.04.2018