

# ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ ДОПУСКОВ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ С ГАЗОТУРБИНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

## PROBABILISTIC-STATISTICAL METHOD FOR DETERMINING ERGONOMIC TOLERANCES OF MACHINE-TRACTOR UNITS WITH A GAS-TURBINE ENGINE

**В.С. ШКРАБАК**<sup>1</sup>, д.т.н.  
**Н.И. ДЖАББОРОВ**<sup>2</sup>, д.т.н.

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
v.shkrabak@mail.ru

<sup>2</sup> ФГБНУ «Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства», Санкт-Петербург, Россия, nozimjon-59@mail.ru

**V.S. SHKRABAK**<sup>1</sup>, DSc in Engineering,  
**N.I. DZHABBOROV**<sup>2</sup>, DSc in Engineering

<sup>1</sup> Saint-Petersburg state agrarian university, St. Petersburg, Russian Federation, v.shkrabak@mail.ru

<sup>2</sup> The Federal State Budgetary Scientific Institution the «Institute for agroengineering and environmental problems in agricultural production», St. Petersburg, Russian Federation, nozimjon-59@mail.ru

Обоснование и использование допусков на эргономические параметры обеспечивает безопасность и улучшает условия и охрану труда операторов машинно-тракторных агрегатов. Предметом исследования является разработка математических моделей для определения эргономических параметров машинно-тракторных агрегатов с газотурбинными двигателями. Целью исследований является разработка вероятностно-статистического метода определения эргономических допусков машинно-тракторных агрегатов, оснащенных газотурбинными двигателями. Новизна исследований заключается в разработанных математических моделях и алгоритме расчета допусков на эргономические параметры машинно-тракторных агрегатов с газотурбинными двигателями. Предложенный метод разработан на основе системного анализа и методах сбора и обработки информации, математического моделирования. При этом также использовались государственные стандарты ГОСТ 26387-8, ГОСТ Р ИСО 15005-2012, ГОСТ Р ИСО 15534-1-2009. Эргономические параметры машинно-тракторных агрегатов разделены на следующие основные группы: антропометрические, гигиенические, физиологические и психологические. В качестве основных количественных характеристик допусков на эргономические параметры машинно-тракторных агрегатов определены: установочные допуски на уровень настройки, установочные допуски на точность настройки и контрольные допуски. Предложенный метод и алгоритм расчета позволяют с вероятностью 0,95 прогнозировать оптимальные значения эргономических допусков машинно-тракторных агрегатов. В качестве примера в статье приведены примеры расчета допусков температуры на рабочем месте механизатора машинно-тракторного агрегата с газотурбинным двигателем ГТД-350Т. Установлено, что оптимальное значение установочного допуска на уровень настройки температуры на рабочем месте механизатора равно  $20 \pm 1$  °С, а установочного допуска на точность настройки –  $\pm 0,7$  °С. Установленные эргономические допуски и вероятностно-статистический метод их определения предназначены для обоснования, непрерывного контроля и оценки эргономических параметров, обеспечивающих безопасность и улучшение условий и охраны труда оператора машинно-тракторных агрегатов с газотурбинным двигателем. Предложенный вероятностно-статистический метод обеспечивает определение и оптимизацию эргономических параметров машинно-тракторных агрегатов с газотурбинным двигателем с учетом вероятностного характера их изменения в конкретных условиях их эксплуатации.

**Ключевые слова:** эргономические параметры, эргономический допуск, машинно-тракторный агрегат, газотурбинный двигатель.

The justification and usage of tolerances for ergonomic parameters ensure safety and improve the conditions and safety of operators of machine-tractor units. The subject of the investigation is a development of the mathematical models for a determination of the ergonomic parameters of machine-tractor units with gas-turbine engines. The aim of the investigations is a development of the probabilistic-statistical method for a determination of the ergonomic tolerances of machine-tractor units equipped with gas turbine engines. The novelty of the researches consists in the developed mathematical models and algorithm for a calculation of the tolerances for ergonomic parameters of machine-tractor units with gas-turbine engines. The proposed method is developed on the basis of systems analysis and methods of collecting and processing information, mathematical modeling. At the same time, state standards GOST 26387-8, GOST R ISO 15005-2012, GOST R ISO 15534-1-2009 were also used. Ergonomic parameters of machine-tractor units are divided into the following basic groups: anthropometric, hygienic, physiological and psychological. As the main quantitative characteristics of the tolerances for ergonomic parameters of machine-tractor units, the following are defined: adjusting tolerances for the level of adjustment, adjusting tolerances for the accuracy of adjustment and control tolerances. The proposed method and algorithm for a calculation allow to predict the optimal values of

ergonomic tolerances of machine-tractor units with a probability of 0,95. As an example in the article, the examples of calculating the temperature tolerances at the mechanic workplace of the machine-tractor unit with a gas-turbine engine GTD-350T are given. It is established that the optimum values of the adjusting tolerance for the level of the temperature setting at the mechanic workplace are equal to  $20 \pm 1$  °C, and the adjusting tolerance for the accuracy of the adjustment is  $\pm 0,7$  °C. The established ergonomic tolerances and the probabilistic-statistical method for their determination are intended for a justification, continuous control and ergonomic parameters assessments that ensure the safety and improvement of the conditions and labor protection of the operator of machine-tractor units with a gas turbine engine. The proposed probabilistic-statistical method provides the definition and optimization of ergonomic parameters of machine-tractor units with a gas turbine engine, taking into account the probabilistic character of their changes under specific conditions of their operation.

**Keywords:** ergonomic parameters, ergonomic tolerance, machine-tractor unit, gas-turbine engine.

## Введение

Машинно-тракторные агрегаты (МТА) в эксплуатационных условиях подвергаются непрерывно изменяющимся внешним воздействиям [1].

Эффективное использование МТА зависит от установленных оптимальных скоростных и нагрузочных режимов их работы с учетом вероятностного характера внешних воздействий.

Наряду с совершенствованием поршневых двигателей отечественными и зарубежными учеными ведутся исследования по эффективности применения на тракторах сельскохозяйственного назначения газотурбинных двигателей (ГТД).

Оценке эффективности применения ГТД на тракторах сельскохозяйственного назначения посвящены работы профессоров Н.С. Ждановского, А.В. Николаенко, В.С. Шкрабака, Л.Е. Агеева, А.В. Соминича, Н.И. Джабборова и других ученых [2–7].

Анализ показывает, что ГТД лучше, чем поршневые двигатели, приспособлены к условиям неустановившихся режимов работы. Применение ГТД на тракторах позволяет значительно снизить их удельную металлоемкость.

На целесообразность использования ГТД на тракторах указывают комплекс их преимуществ по сравнению с поршневыми двигателями, таких как легкий пуск при низких температурах, сокращение трудоемкости технического обслуживания, снижение стоимости капитального ремонта, меньшие значения массы и габаритных размеров.

Анализ исследований показывает, что недостаточно изучены вопросы обоснования эргономических параметров и их влияния на показатели эффективности функционирования МТА с газотурбинными двигателями.

Существенное влияние на эффективность работы МТА и качество выполнения технологических процессов оказывают эргономические параметры.

Эргономические параметры позволяют оценить приспособленность рабочего места оператора и в целом МТА для наиболее безопасного и эффективного труда исходя из физических и психофизиологических особенностей человеческого организма.

Основными факторами, влияющими на условия труда механизатора-оператора МТА, являются микроклимат, состояние воздушной среды и уровень шума в кабине трактора.

Эти показатели оценивают по температуре, влажности и другим параметрам.

Результаты наших исследований по оценке микроклимата в кабине тракторов показывают, что они являются не всегда удовлетворительными по температуре воздуха и неудовлетворительными по влажности воздуха.

Установлено, что превышение температуры воздуха в кабине по отношению к наружной составляет  $4...6$ °C, при этом величина уровня шума превышает допустимые значения на  $3...5$  дБ.

Как показывают наши исследования, фактические условия труда механизаторов существенно отличаются от принятых норм. Превышение нормируемых эргономических параметров приводит к преждевременной усталости операторов МТА и снижению производительности труда. При длительной работе в подобных условиях, можно сказать, повышенной опасности для здоровья, увеличивается риск преждевременного приобретения профессиональной заболеваемости.

Результаты настоящих исследований должны учитываться при разработке требований охраны труда к перспективным энергонасыщенным тракторам с газотурбинными и другими типами двигателей.

Таким образом, особую актуальность представляет проблема обоснования оптимальных и допускаемых значений эргономических параметров МТА.

В связи с этим возникла необходимость в разработке вероятностно-статистического метода определения допустимых значений эргономических параметров (или эргономические допуски) МТА с ГТД.

### Цель исследования

Целью исследований является разработка вероятностно-статистического метода определения эргономических допусков машинно-тракторных агрегатов (МТА), оснащенных тракторными газотурбинными двигателями. Эргономические допуски предназначены для непрерывного контроля и оценки эргономических параметров, обеспечивающих безопасность и улучшение условий и охраны труда оператора МТА.

### Материалы, методы исследования и обсуждение результатов

Предложенный метод разработан на основе системного анализа и методах сбора и обработки информации, математического моделирования. При этом также использовались действующие государственные стандарты ГОСТ 26387-84 «Система "Человек – машина", ГОСТ Р ИСО 15005-2012 «Эргономика транспортных средств. Эргономические аспекты информационно-управляющей системы транспортного средства. Принципы управления диалогом и процедуры проверки соответствия», ГОСТ Р ИСО 15534-1-2009 «Эргономическое проектирование машин для обеспечения безопасности. Часть 1. Принципы определения размеров проемов и доступа всего тела человека внутри машины, исходные эргономические требования и эргономического обеспечения».

Эргономические параметры МТА делятся на следующие основные группы: антропометрические, гигиенические, физиологические и психологические.

Номенклатура эргономических параметров МТА в основном определяются нормативно-технической документацией, в том числе и государственными стандартами, приведенными в разделе «Материалы и методы» настоящей статьи.

Основными количественными характеристиками допусков на эргономические параметры МТА (или эргономические допуски) являются: установочные допуски на уровень настройки, установочные допуски на точность настройки и контрольные допуски (рис. 1).

Установочный допуск,  $\Delta_{\bar{y}}$  на уровень настройки, основанный на сравнении среднего значения  $\bar{Y}$  с номинальным значением  $Y_n$  эргономического параметра, определяет уровень настройки МТА по данному параметру. Установочный допуск  $\Delta_{\bar{y}}$  является основным при оценке стабильности эргономических параметров МТА в процессе их использования при выполнении технологических процессов.

Установочный допуск  $\Delta_{\sigma_{\bar{y}}}$  на точность настройки МТА по эргономическому параметру представляет собой разность между фактическим  $\sigma_{\bar{y}}$  и фиксированным (заданным)  $\sigma_{\bar{y}n}$  значениями средних квадратических отклонений. Установочный допуск  $\Delta_{\sigma_{\bar{y}}}$  учитывает точность настройки МТА по эргономическому параметру.

Контрольный допуск  $\Delta\bar{Y}$  (или поле допуска) устанавливает ограничения на неравномерность изменения эргономических параметров и может быть односторонним или двусторонним, в зависимости от закономерности их изменения.

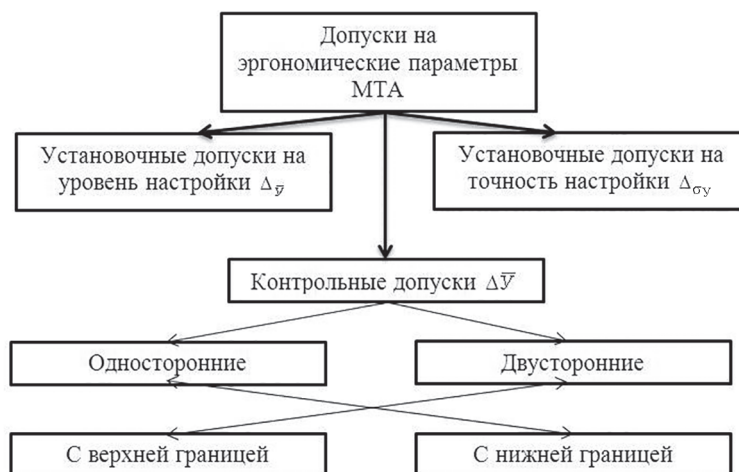


Рис. 1. Классификация допусков на эргономические параметры МТА по назначению

1. Установочный допуск  $\Delta_{\bar{y}}$  на уровень настройки по эргономическому параметру МТА с ГТД представляет собой алгебраическую разность:

$$\Delta_{\bar{y}} = |Y_H - \bar{Y}|, \quad (1)$$

где  $Y_H$ ,  $\bar{Y}$  – номинальное (базовое) и выборочное среднее значения эргономического параметра МТА с ГТД.

Установочный допуск  $\Delta_{\bar{y}}$  определяет уровень настройки МТА с ГТД по контролируемому эргономическому параметру и характеризует его степень реализации в конкретных эксплуатационных условиях.

2. Установочный допуск  $\Delta_{\sigma_y}$  на точность настройки МТА с ГТД по эргономическому параметру определяется по формуле:

$$\Delta_{\sigma_y} = |\sigma_{yH} - S_y|, \quad (2)$$

где  $\sigma_{yH}$ ,  $S_y$  – номинальное (базовое) и выборочные значения среднего квадратического отклонения эргономического параметра МТА с ГТД.

3. Контрольный допуск  $\Delta\bar{Y}$  (поле допуска) определяется из выражения:

– односторонний:

$$L_{B,H} = \bar{Y} \pm \Delta_{\bar{y}}; \quad (3)$$

– двусторонний:

$$\Delta\bar{Y} = 0,5(L_B - L_H) = |K \cdot S_y|, \quad (4)$$

где  $L_B$ ,  $L_H$  – верхняя и нижняя предельные границы эргономического допуска;  $\Delta_{\bar{y}}$  – установочный допуск на уровень настройки МТА с ГТД по эргономическому параметру.

В расчетах установочных допусков применяется метод доверительных границ [1], а при определении контрольных допусков – метод толерантных пределов, в которых помещается заданная часть признака или доля всей совокупности значений эргономического параметра  $\bar{P}_\Delta = (1 - q)100\%$  с вероятностью  $\gamma$ , где  $q$  – доля значений параметра вне зоны допуска  $\Delta\bar{Y}$ .

С учетом выражений (1)–(4) допуски на эргономические параметры МТА определяются по формулам, приведенным ниже.

1. Установочный допуск  $\Delta_{\bar{y}}$  на уровень настройки:

– односторонний допуск при  $n > 30$ :

$$\Delta_{\bar{y}} \leq U_\gamma S_y / \sqrt{n};$$

– двусторонний допуск при  $n < 30$ :

$$\Delta_{\bar{y}} = U_{0,5(1+\gamma)} S_y / \sqrt{n}, \quad (5)$$

где  $U_\gamma$ ,  $U_{0,5(1+\gamma)}$  – квантили нормального закона распределения, определяемые по таблицам справочной литературы [8];  $n$  – объем выборки.

По выборочным данным при определении уровня температуры на рабочем месте механизатора (оператора МТА):

$$\bar{Y} = 20 \text{ }^\circ\text{C}; S_y = 3,6 \text{ }^\circ\text{C}; n = 50; \gamma = 0,95$$

из формулы (5) находим:

$$\begin{aligned} \Delta_{\bar{y}} &= U_{0,5(1+\gamma)} \cdot S_y / \sqrt{n} = \\ &= \pm 1,96 \cdot 3,6 \cdot 50^{-1/2} = \pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

или  $\Delta_{\bar{y}} = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2. Установочный допуск  $\Delta_{\sigma_y}$  на точность настройки:

– односторонний при  $n > 30$ :

$$\Delta_{\sigma_y} \leq U_\gamma S_y [2(n-1)]^{-1/2};$$

– двусторонний допуск при  $n < 30$ :

$$\Delta_{\sigma_y} = \pm U_{0,5(1+\gamma)} S_y [2(n-1)]^{-1/2}, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – доверительная вероятность.

Для предыдущего примера из формулы (6) находим:

$$\begin{aligned} \Delta_{\sigma_y} &= \pm U_{0,5(1+\gamma)} \cdot S_y [2(n-1)]^{-1/2} = \\ &= \pm 1,96 \cdot 3,6 \cdot 98^{-1/2} = \pm 0,7 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

3. Контрольный допуск  $\Delta\bar{Y}$ :

– односторонний:

нижняя граница:

$$L_H = \bar{Y} - K_\gamma S_y;$$

верхняя граница:

$$L_B = \bar{Y} + K_\gamma S_y;$$

– двусторонний:

$$\pm \Delta\bar{Y} = \bar{Y} \pm K_\gamma S_y, \quad (7)$$

где  $K_\gamma$  – коэффициент, определяемый при фиксированных значениях  $\gamma$ ,  $n$  и  $\bar{P}_\Delta$ .

При  $\bar{P}_\Delta = 0,95$  из формулы (7) получаем:

$$\pm \Delta\bar{Y} = \bar{Y} \pm K_\gamma \cdot S_y = 20 \pm 2,379 \cdot 3,6 = 20 \pm 8,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

или  $\pm 0,43\bar{Y}$ , то есть с вероятностью 0,95 значений параметра, а 5% – превышение зоны допуска.

Оптимальные значения допусков эргономических параметров, соответствующие эффективному функционированию МТА с ГТД, рассчитываются по формулам:

– установочный допуск на уровень настройки:

$$\Delta_{\bar{y}}^* = |Y_H - \bar{Y}^*|;$$

– установочный допуск на точность настройки:

$$\Delta_{\sigma_y}^* = |\sigma_{yH} - S_y^*| = S_y^*;$$

– контрольный допуск:

$$\pm \Delta^* \bar{Y} = \bar{Y}^* \pm K_y^* S_y^*,$$

где  $\Delta \bar{Y}^*$  – экстремальное (оптимальное) значение эргономического параметра МТА с ГТД;  $S_y^*$  – экстремальное (минимальное) значение среднего квадратического отклонения эргономического параметра МТА с ГТД.

В качестве основных критериев оптимизации допусков на эргономические параметры МТА можно рассматривать регламентированные государственными стандартами уровни эргономических параметров: допускаемый уровень безвредности, требуемый уровень комфорта на рабочем месте оператора МТА, минимальный уровень токсичности, вибрации, шума, запыленности и т.д. [9–11].

## Выводы

1. Апробированная система допусков на агротехнические и энергетические параметры, а также технико-экономические показатели средств механизации показывает, что строгое их соблюдение гарантирует эффективное и качественное функционирование МТА.

2. Предложенный метод обеспечивает определение и оптимизацию эргономических параметров МТА с ГТД с учетом вероятностного характера их изменения в конкретных условиях их эксплуатации. Эргономические допуски представляют диапазон изменения эргономических параметров, при котором обеспечивается безопасный и эффективный труд оператора МТА.

## Литература

- Агеев Л.Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов. Л.: Колос, 1978. 296 с.
- Агеев Л.Е., Шкрабак В.С., Моргулис-Якушев В.Ю. Сверхмощные тракторы сельскохозяйственного назначения. Л.: Агропромиздат, 1986. 415 с.
- Ждановский Н.С., Николаенко А.В., Шкрабак В.С. Режимы работы двигателей энергонасыщенных тракторов. Л.: Машиностроение, 1981. 240 с.
- Шкрабак В.С., Джабборов Н.И. Эффективность применения газотурбинных двигателей на тракторах сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 10. С. 46–48.
- Шкрабак В.С., Джабборов Н.И., Шкрабак Р.В., Федькин Д.С. Сравнительная оценка энергетической эффективности пахотных агрегатов на базе тракторов с дизельным и газотурбинным двигателями // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 2. С. 44–46.
- Шкрабак В.С., Джабборов Н.И., Федькин Д.С., Шкрабак Р.В. Влияние случайной нагрузки на эффективную мощность газотурбинного и дизельного двигателей в составе почвообрабатывающих агрегатов // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 6. С. 17–21.
- Шкрабак В.С., Джабборов Н.И. Методика определения вероятностных оценок удельного расхода топлива газотурбинного двигателя в составе пахотного агрегата // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. № 1 (31). С. 72–77.
- Шор Я. Б., Кузьмин Ф.И. Таблицы для анализа и контроля надежности. М.: Советское радио, 1968. 268 с.
- Степанов И.С., Евграфов А.Н., Карунин А.Л., Ломакин В.В., Шарипов В.М. Основы эргономики и дизайна автомобилей и тракторов / под общ. ред. В.М. Шарипова. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 256 с.
- Степанов И.С., Евграфов А.Н., Карунин А.Л., Ломакин В.В., Шарипов В.М. Автомобили и тракторы. Основы эргономики и дизайна / под общ. ред. В.М. Шарипова. М.: МГТУ «МАМИ», 2002. 230 с.
- Шарипов В.М. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Климатическая комфортабельность колесных и гусеничных машин. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 197 с.

## References

- Ageev L.E. Osnovy rascheta optimal'nykh i dopuskamykh rezhimov raboty mashinno-traktornykh agregatov [Basics of the calculation of optimal and acceptable modes of operation of machine-tractor units]. Leningrad: Kolos Publ., 1978. 296 p.
- Ageev L.E., Shkrabak V.S., Morgulis-Yakushev V.Yu. Sverkhmoshchnye traktory sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Heavy-duty agricultural tractors]. Leningrad: Agropromizdat Publ., 1986. 415 p.
- Zhdanovskiy N.S., Nikolaenko A.V., Shkrabak V.S. Rezhimy raboty dvigateley energonasyshchennykh traktorov [Modes of operation of energy-saturated tractors engines]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1981. 240 p.
- Shkrabak V.S., Dzhabborov N.I. Efficiency of application of gas turbine engines on the agricultural

- tractors. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. No 10, pp. 46–48 (in Russ.).
5. Shkrabak V.S., Dzhabborov N.I., Shkrabak R.V., Fed'kin D.S. Comparative assessment of the energy efficiency of tillable units based on tractors with diesel and gas turbine engines. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. No 2, pp. 44–46 (in Russ.).
  6. Shkrabak V.S., Dzhabborov N.I., Fed'kin D.S., Shkrabak R.V. Influence of a random load on the effective power of gas turbine and diesel engines in the composition of tillage units. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. No 6, pp. 17–21 (in Russ.).
  7. Shkrabak V.S., Dzhabborov N.I. A method of determination of the probabilistic estimates of the specific fuel consumption of a gas turbine engine as a part of tillage unit. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2017. No 1 (31), pp. 72–77 (in Russ.).
  8. Shor Ya. B., Kuz'min F.I. *Tablitsy dlya analiza i kontrolya nadezhnosti* [Tables for analysis and control of reliability]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1968. 268 p.
  9. Stepanov I.S., Evgrafov A.N., Karunin A.L., Lomakin V.V., Sharipov V.M. *Osnovy ergonomiki i dizayna avtomobiley i traktorov* [Basics of ergonomics and design of automobiles and tractors]. Pod obshch. red. V.M. Sharipova. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya» Publ., 2005. 256 p.
  10. Stepanov I.S., Evgrafov A.N., Karunin A.L., Lomakin V.V., Sharipov V.M. *Avtomobili i traktory. Osnovy ergonomiki i dizayna* [Automobiles and tractors. Basics of ergonomics and design]. Pod obshch. red. V.M. Sharipova. Moscow: MGTU «MAMI» Publ., 2002. 230 p.
  11. Sharipov V.M., Mikhaylov V.A., Sharipova N.N. *Klimaticheskaya komfortabel'nost' kolesnykh i gusenichnykh mashin* [Climatic comfort of wheeled and caterpillar vehicles]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 197 p.