

П. А. Поляков, В. В. Светличный, А. В. Мизюкаев

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УЗЛА ОХЛАЖДЕНИЯ ДИСКОВО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ

Аннотация. Узел охлаждения тормозного диска выполняет роль рассеивания тепловой энергии в окружающую среду. Выполненный анализ источников, посвященных тепловой нагруженности, аккумулируемой на рабочих поверхностях показал увеличение точности прогнозирования температурных полей, напряженно-деформированного состояния и ресурса работы по условиям термической усталости за счет применения тепловых и термоупругих моделей с движущимися источниками тепла. В проанализированных литературных источниках, посвященные конвективному теплообмену от поверхностей вентиляционного аппарата, в основном решается тепловая задача, связанная с потоками воздуха, основные параметры которой изменяются в одной плоскости вентиляционного аппарата, тогда как изменение потоков воздуха в объеме каналов узла охлаждения является не рассматриваемой в процессе исследований. Конструктивные решения, изменяющие форму ребер или сегментов узла охлаждения, увеличивают среднюю скорость потока и теплоотдающую способность от поверхностей ребер, не учитывая режима протекания воздушного потока. На основании проведенного анализа необходимо при построении вентиляционных каналов турбулизовать поток и уменьшать величины слоев воздуха, располагающегося вдоль стенок ребер и нерабочих поверхностей полудисков.

Ключевые слова: тормозной диск, вентиляционный аппарат, вентиляционные каналы, сегменты, турбулизация воздушного потока.

Для цитирования: Поляков, П. А. Пути повышения эффективности работы узла охлаждения дисково-колодочных тормозов / П. А. Поляков, В. В. Светличный, А. В. Мизюкаев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 147–153. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_147.

Тормозные диски аккумулируют при торможении достаточно большое количество тепла на своих рабочих поверхностях, значительное количество перераспределяется по площади и толщине тормозного диска. Для увеличения конвективного теплообмена тормозные диски выполняются с встроенным узлом охлаждения. Узел охлаждения может представлять собой дополнительное оребрение на нерабочих поверхностях тормозного диска, как в случае полудисков встроенных в колесные пары электропоездов, так и вентиляционные каналы для проходящего воздуха с возможностью конвекции от их стенок (рис. 1).

а)



б)



Рис. 1. Тормозные диски с узлами охлаждения:
оребрение нерабочих поверхностей полудисков (а); вентиляционные каналы,
расположенные между полудисками (б)

В статье [1] разработана несимметричная тепловая модель с движущимися источниками тепла, которая определяла влияние на пространственное распределение температуры в тормозном диске изменение радиального и окружного тепловых потоков, и канавок, расположенных на колодках. В результате было установлено, что геометрия и величины габаритных размеров зоны подвода теплового потока значительно оказывают влияние на изменение температуры поверхности. Разработанная модель прогнозировала удельную область перегрева в течение времени торможения. Результаты исследования показали влияние формы, расположения и различных размеров канавок, выполненных на колодках. В работе [2] на примере разработанной термоупругой модели с движущимися источниками тепла исследуются изменения напряжений и деформаций в тормозных дисках с серийной и предлагаемой геометрией дисков. Проведены расчеты прогнозирования срока усталостного разрушения при эксплуатации в режимах непрерывного торможения для тормозных дисков с серийной геометрией. Оценка напряжений и деформаций в термоупругой модели во времени показывает колебательный характер нарастания, изменяющийся по частоте и амплитуде. В конечном итоге петля гистерезиса напряжений и деформаций демонстрирует сложное движение вперед и назад в период нагрева. Модель показала, что циклические колебания напряжений и деформаций происходят на глубине до 8,5 мм от поверхности. Наиболее опасными составляющими напряжения является окружная и радиальная, тогда как осевая составляющая не представляет опасности для зарождения трещин в тормозных дисках. Режим непрерывного торможения увеличивает напряжения и деформации тормозного диска в два раза, в сравнении со служебным циклическим торможением. В работе [3] создана термомеханическая имитационная модель дискового тормоза. Смоделированная максимальная температура на поверхности диска после 0,66 с торможения составляла 244,3 °C, а по достижении времени торможения $t = 0,72$ с, максимальное напряжение дискового тормоза составило 232,1 МПа. Используя метод Мэнсона-Коффина для расчета термической усталости, был рассчитан ресурс работы тормозного диска исходя из условия термической усталости для служебного и экстренного режимов торможения. Для экстренного режима торможения ресурс работы будет снижен в 856 раз по сравнению с эксплуатацией тормоза при служебном торможении.

Как видно из проведенного анализа литературных источников можно утверждать, что совершенствование методов моделирования процессов аккумуляции энергии на поверхности дисков приводит к более точным расчетам тепловой нагруженности и распределения тепловых потоков в тормозных дисках [4-8].

Исследование [9] показало, что способность к теплообмену у новой конструкции вентиляционного аппарата диска с Y-образными сегментами, увеличилась по сравнению с критериями теплообменных процессов у дисков с другими конструкциями вентиляционных аппаратов дисков на 10 % (рис. 2 и 3). Средняя скорость воздуха при протекании через вентиляционный аппарат увеличилась на 23% в сравнении с остальными конструкциями.

В статье [10] проводилось экспериментальное исследование теплоотдачи от стационарных тормозных дисков, с различными узлами охлаждения: с радиальными каналами, с криволинейными каналами без отверстий и с отверстиями. Показатели теплоотдачи от рабочих поверхностей тормозного диска с вентиляционным аппаратом сравнивались со сплошными дисками. Эксперименты проводились на специально разработанной установке для термического отжима и обеспечили повторяемое и точное измерение температуры и надежный прогноз коэффициентов суммарного, конвективного и радиационного рассеяния тепла. Скорость нагреваемого воздуха, выходящего из стационарного диска, не превышала 1 м/с. Коэффициенты конвективной теплопередачи увеличились с ростом температуры, но их диапазон значений был мал и составил от 3 Вт/(м²К) до 5 Вт/(м²К). Тормозной диск с радиальными каналами обладал самым высоким коэффициентом рассеивания конвективного тепла, а сплошной диск уступал ему примерно на 30%. Коэффициент конвективного рассеивания тепла для дисков с криволинейными каналами

ниже на 20%, чем для дисков с радиальными каналами. Поперечные отверстия незначительно увеличило теплоотдачу от поверхностей диска.

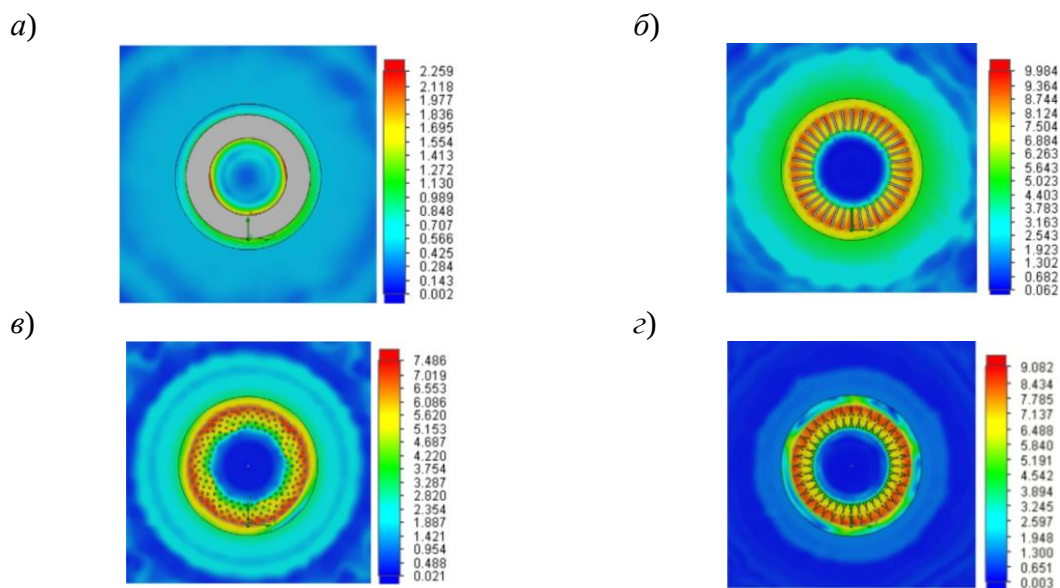


Рис. 2. Изменение скоростей потока воздуха для различных конфигураций вентиляционных аппаратов тормозных дисков [м/с]:
сплошной диск (а), с радиальными стенками (б), с цилиндрическими сегментами (в), с Y-образными сегментами (з)

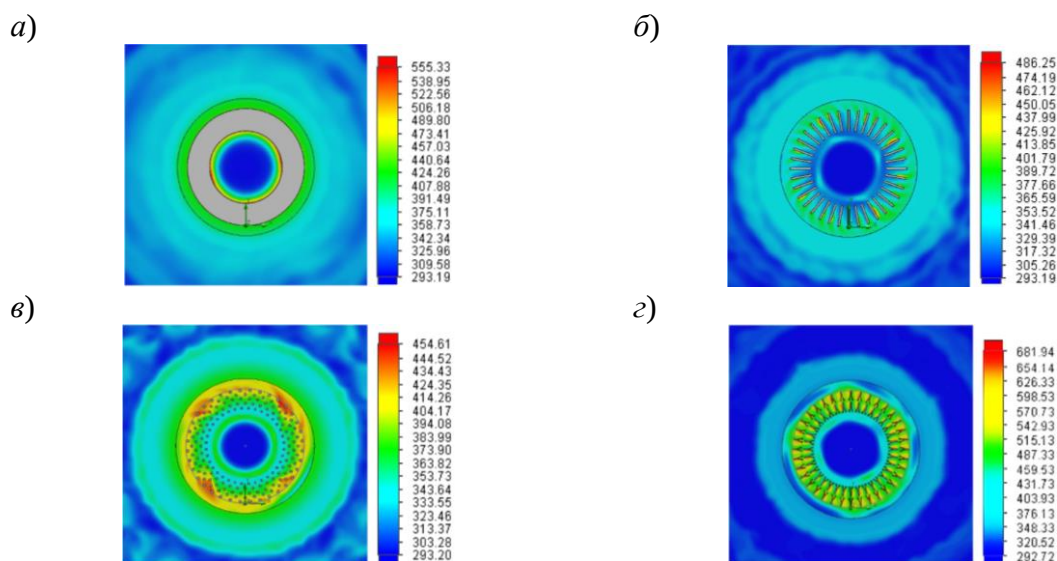


Рис. 3. Изменение температуры воздушного потока в различных конфигурациях дисковых тормозов:
сплошной диск (а), с радиальными стенками (б), с цилиндрическими сегментами (в), с Y-образными сегментами (з)

В исследовании [10] предложена модель оптимизации вентиляционного тормозного механизма легкового автомобиля. Проработаны пути повышения конвективной теплопередачей и ее лучшее распределение внутри вентиляционных каналов за счет использования турбулизаторов с квадратными ребрами (рис. 4).

Целью исследования [11] является повышение теплопередачи вентилируемых тормозных дисков с помощью модифицированных ребер. В результате была предложена новая конструкция ребра с использованием профиля для повышения эффективности откачки воздуха, повышающего скорость потока между ребрами. Сравнение производилось между моделями тормозных дисков с различными оребренными вентиляционными аппаратами. В

закключение исследования авторы отмечают улучшение значений коэффициента теплопередачи на 17-29% для оребренного вентиляционного аппарата с аэродинамическими ребрами и ребрами вторичного профиля.

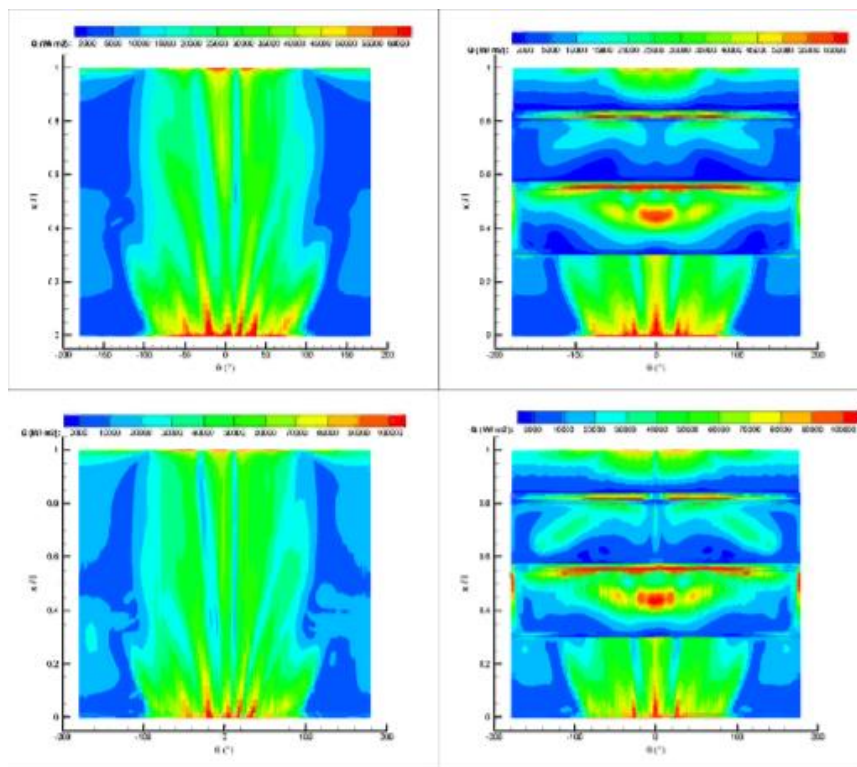


Рис. 4. Тепловой поток на поверхности вентиляционных каналов: оребренный вентиляционный аппарат (слева) и оребренный вентиляционный аппарат с турбулизаторами (справа) при оборотах вращения $n = 8850$ об/мин (вверху) и $n = 1770$ об/мин (внизу)

Подводя итог проводимому литературному анализу можно утверждать, что оценка тепловой нагруженности увеличивает точность прогнозирования теплового и напряженного состояния, тогда как разработка вентиляционных аппаратов базируется на методах оценки плоских CFD-моделях [12]. В качестве предлагаемых усовершенствований вентиляционного аппарата на первый план выступают изменение геометрии сегментов и дополнение турбулизаторов в вентиляционных каналах. В первую очередь необходимо совершенствовать каналы, таким образом, чтобы разделять потоки и искусственно уменьшать прослойку воздуха, расположенную у поверхностей каналов и сегментов, для увеличения скорости протекания вблизи сегментов, что увеличит теплообменные процессы не только от стенок ребер и сегментов, но и от нерабочих поверхностей полудисков. Увеличивая скорость протекания воздушного потока необходимо также стремиться турбулизировать поток для уменьшения пограничных слоев, как фактора препятствующего росту теплообменных процессов и увеличению эффективности работы узла охлаждения тормозного диска.

Список литературы

1. Deressa, K. T., Ambie, D. A. Non-Axisymmetric modelling of moving heat source for spatial and temporal investigation of temperature in railway vehicles disc brake (2022) Urban Rail Transit 8, PP. 198–216. <https://doi.org/10.1007/s40864-022-00176-9>.
2. Deressa, K. T., Ambie, D. A. Non-axisymmetric modeling of a moving heat

References

1. Deressa, K. T., Ambie, D. A. Non-Axisymmetric modelling of moving heat source for spatial and temporal investigation of temperature in railway vehicles disc brake (2022) Urban Rail Transit 8, PP. 198–216. <https://doi.org/10.1007/s40864-022-00176-9>.
2. Deressa, K. T., Ambie, D. A. Non-axisymmetric modeling of a moving heat

source for thermal stress and fatigue analysis of railway vehicle disc brakes (2024) Urban Rail Transit 10, PP. 42–64. <https://doi.org/10.1007/s40864-023-00207-z>.

3. **Chen, C., Yang, Q., Zhang, H., Zhao, X., Gao, C., Gao, Y.** Thermal fatigue life prediction under emergency braking of disc brake based on FEA simulation. (2026) The 9th International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering. ICACMVE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. PP. 73–83. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5527-4_7.

4. **Яицков, И. А.** Моделирование динамики рычажной передачи тормозной системы в процессе торможения на участке пути, имеющему неровности (на примере пассажирского вагона) / И. А. Яицков, В. В. Косаревский // Вестник Донского государственного технического университета. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 36-41. – DOI 10.23947/1992-5980-2020-20-1-36-41. – EDN XZXASI.

5. **Яицков, И. А.** Эффективность теплоотвода поверхностей тормозного диска тормозной системы подвижного состава при различных режимах работы вентиляционного аппарата / И. А. Яицков, Е. С. Федотов, А. А. Назаретов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1(97). – С. 219-224. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_219. – EDN BKEGWH.

6. **Яицков, И. А.** Методика определения аэродинамических характеристик диффузорных вентиляционных каналов тормозных дисков транспортных средств / И. А. Яицков, Е. С. Федотов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1(89). – С. 257-263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257. – EDN RCETKE.

7. Влияние направление воздушного потока воздуха на эффективность работы вентиляционного аппарата тормозного диска / И. А. Яицков, Е. С. Федотов, М. В. Стародуб [и др.] // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 15. – С. 99-103. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-99-103. – EDN BJEISP.

source for thermal stress and fatigue analysis of railway vehicle disc brakes (2024) Urban Rail Transit 10, PP. 42–64. <https://doi.org/10.1007/s40864-023-00207-z>.

3. **Chen, C., Yang, Q., Zhang, H., Zhao, X., Gao, C., Gao, Y.** Thermal fatigue life prediction under emergency braking of disc brake based on FEA simulation. (2026) The 9th International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering. ICACMVE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. PP. 73–83. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5527-4_7.

4. **Yaitskov, I. A.** Modeling the dynamics of the lever transmission of the brake system during braking on a section of the track with unevenness (using a passenger car as an example) / I. A. Yaitskov, V. V. Kosarevsky // Bulletin of the Don State Technical University. – 2020. – Vol. 20, No. 1. – P. 36-41. – DOI 10.23947/1992-5980-2020-20-1-36-41. – EDN XZXASI.

5. **Yaitskov, I. A.** Efficiency of heat removal of brake disc surfaces of the rolling stock braking system under various operating modes of the ventilation apparatus / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov, A. A. Nazaretov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2025. – No. 1 (97). – P. 219-224. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_219. – EDN BKEGWH.

6. **Yaitskov, I. A.** Methodology for determining the aerodynamic characteristics of diffuser ventilation ducts of brake discs of vehicles / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 257-263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257. – EDN RCETKE.

7. The influence of air flow direction on the efficiency of the brake disc ventilation apparatus / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov, M. V. Starodub [et al.] // Transport, mining and construction engineering: science and production. – 2022. – No. 15. – P. 99-103. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-99-103. – EDN BJEISP.

8. **Яицков, И. А.** Повышение эффективности торможения локомотивов: специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Яицков Иван Анатольевич. – Ростов-на-Дону, 2003. – 233 с. – EDN NMKGOJ.

9. **Haddar, M. B. J., Ghorbel, A., Djemal, F. [et al.]** Heat transfer and flow analysis through a new brake disc design: a CFD approach (2025) *Int J Interact Des Manuf* 19, PP. 4215–4224. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02027-2>.

10. **Topouris, S., Stamenković D., Olphe-Galliard, M., Popović, V., Tirovic, M.** Heat dissipation from stationary passenger car brake discs (2020) *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 66, PP. 15-28. DOI:10.5545/sv-jme.2019.6002.

11. **Panelli, M.** Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators. Conference: International conference: Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, ASME-UIT-ATI, Sorrento, Italy. 2010. 7p. DOI: 10.13140/2.1.3525.7122.

12. **Nejat, A., Aslani, M., Mirzakhilili, E., Najian, R. Asl.** Heat Transfer Enhancement in Ventilated Brake Disk Using Double Airfoil Vanes. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2011. vol. 3(4). USA. 10p. DOI: 10.1115/1.4004931.

8. **Yaitskov, I. A.** Increasing the efficiency of locomotive braking: specialty 05.22.07 "Rolling stock of railways, train traction and electrification": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Yaitskov Ivan Anatolyevich. - Rostov-on-Don, 2003. - 233 p. - EDN NMKGOJ.

9. **Haddar, M. B. J., Ghorbel, A., Djemal, F. [et al.]** Heat transfer and flow analysis through a new brake disc design: a CFD approach (2025) *Int J Interact Des Manuf* 19, PP. 4215–4224. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02027-2>.

10. **Topouris, S., Stamenković D., Olphe-Galliard, M., Popović, V., Tirovic, M.** Heat dissipation from stationary passenger car brake discs (2020) *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 66, PP. 15-28. DOI:10.5545/sv-jme.2019.6002.

11. **Panelli, M.** Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators. Conference: International conference: Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, ASME-UIT-ATI, Sorrento, Italy. 2010. 7p. DOI: 10.13140/2.1.3525.7122.

12. **Nejat, A., Aslani, M., Mirzakhilili, E., Najian, R. Asl.** Heat Transfer Enhancement in Ventilated Brake Disk Using Double Airfoil Vanes. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2011. vol. 3(4). USA. 10p. DOI: 10.1115/1.4004931.

P. A. Polyakov, V. V. Svetlichny, A. V. Mazyukaev

WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE DISC BRAKE COOLING UNIT

Abstract. The cooling unit of the brake disc performs the role of dissipating heat energy into the environment. The analysis of sources devoted to thermal stress accumulated on work surfaces showed an increase in the accuracy of forecasting temperature fields, stress-strain state and service life under thermal fatigue conditions due to the use of thermal and thermoelastic models with moving heat sources. In the analyzed literature sources devoted to convective heat exchange from the surfaces of the ventilation apparatus, the thermal problem associated with air flows is mainly solved, the main parameters of which change in one plane of the ventilation apparatus, while the change in air flows in the volume of the channels of the cooling unit is not considered in the research process. Constructive solutions that change the shape of the fins or segments of the cooling unit increase the average flow rate and heat transfer capacity from the fin surfaces, without taking into account the flow mode of the air flow. Based on the analysis carried out, it is necessary to turbulate the flow and reduce

the size of the air layers located along the walls of the ribs and the non-working surfaces of the half-discs when constructing ventilation ducts.

Keywords: brake disc, ventilation unit, ventilation ducts, segments, turbulence of the air flow.

For citation: Polyakov, P. A. Ways to Improve the Efficiency of the Disc Brake Cooling Unit / P. A. Polyakov, V. V. Svetlichny, A.V. Mizyukaev // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – №. 4. – P. 147–153. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_147.

Сведения об авторах

Поляков Павел Александрович

Набережночелнинский институт Казанского
федерального университета,
кафедра «Механики и конструирования»,
заведующий кафедрой,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Светличный Владислав Владимирович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
аспирант,
e-mail: mr.vladvladvlad14@mail.ru

Мизюкаев Анатолий Вячеславович

Набережночелнинский институт Казанского
федерального университета,
кафедра «Автомобилей»,
аспирант,
e-mail: mizyukaev2000@gmail.com

Information about the authors

Polyakov Pavel Alexandrovich

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan
Federal University,
Chair «Mechanics and Engineering»,
Head of the Chair,
Doctor of Technical Sciences, Associate
Professor,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Svetlichny Vladislav Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Postgraduate Student,
e-mail: mr.vladvladvlad14@mail.ru

Mizyukaev Anatoly Vyacheslavovich

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan
Federal University,
Chair «Automobiles»,
Postgraduate Student,
e-mail: mizyukaev2000@gmail.com