

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 2, 2026 vol. 3

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 3, ISSUE 2

JUNE, 2026



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 3, ISSUE 2 JUNE, 2026

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Modelling of thermophysical characteristics and analysis of interfacial interaction in nanocomposites based on polymer matrices

A. Antonov¹, V. Struk¹, M. Rakhmatov², A. Riskulov², Kh. Nurmetov²

¹Yanka Kupala state university of Grodno, Grodno, Belarus

²Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: Using numerical simulation methods and analytical approaches, this paper analyzes the influence of the interfacial boundary layer on the effective thermal conductivity of heterogeneous systems of the “polymer matrix–dispersed filler” type. A methodology for the quantitative estimation of the thermal interfacial layer thickness is proposed and validated, based on a comparison of experimental data with the results of finite-difference modeling of the three-dimensional steady-state heat conduction equation. The effect of the filler particle size factor on their intrinsic thermal conductivity and the resulting thermophysical characteristics of the composite is investigated. It is established that, upon transition to the nanoscale, the Kapitza interfacial thermal resistance and the reduction in the thermal conductivity of the particle material due to phonon boundary scattering play the dominant role in limiting heat transport.

Keywords: polymer nanocomposites, thermal conductivity, interfacial layer, Kapitza resistance, size effect, numerical simulation, thermomechanical compounding, thermoplastics

Моделирование теплофизических характеристик и анализ межфазного взаимодействия в нанокompозитах на основе полимерных матриц

Антонов А.¹, Струк В.¹, Рахматов М.², Рискулов А.², Нурметов Х.²

¹Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

²Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В статье с применением методов численного моделирования и аналитических подходов проведен анализ влияния межфазного граничного слоя на эффективную теплопроводность гетерогенных систем «полимерная матрица – дисперсный наполнитель». Предложена и апробирована методика количественной оценки толщины теплового межфазного слоя на основе сопоставления экспериментальных данных и результатов конечно-разностного моделирования трёхмерного стационарного уравнения теплопроводности. Исследовано влияние размерного фактора частиц наполнителя на их собственную теплопроводность и результирующие теплофизические характеристики композита. Установлено, что при переходе в нанодиапазон доминирующую роль в ограничении теплопереноса играют межфазное термическое сопротивление Капицы и снижение теплопроводности материала частиц вследствие фононного рассеяния на границах.

Ключевые слова: полимерные нанокompозиты, теплопроводность, межфазный слой, сопротивление Капицы, размерный эффект, численное моделирование, термомеханическое совмещение, термопласты

1. Введение

Создание полимерных нанокompозиционных материалов (ПНКМ) с прогнозируемым комплексом эксплуатационных характеристик является одной из приоритетных задач современного материаловедения, что отражено в стратегических документах как Республики Узбекистан, так и Республики Беларусь [1, 2]. Особое место в номенклатуре таких материалов занимают системы на основе полимеров, модифицированных дисперсными частицами различной природы [3, 4]. Если вопросы повышения

деформационно-прочностных и адгезионных свойств таких композитов изучены достаточно подробно, то механизмы формирования их теплофизических характеристик остаются предметом активных дискуссий.

Традиционные полимерные матрицы характеризуются низкими значениями коэффициента теплопроводности (0,1–0,5 Вт/(м·К)), что ограничивает их применение в узлах, требующих эффективного отвода тепла. Простое введение высокотеплопроводных наполнителей, включая углеродные нанотрубки с собственной теплопроводностью порядка 3000

 <https://orcid.org/0000-0002-6155-4635>

 <https://orcid.org/0009-0003-0934-6833>

 <https://orcid.org/0009-0008-6395-5804>

 <https://orcid.org/0000-0002-5275-9153>

 <https://orcid.org/0000-0002-6111-7259>



Вт/(м·К), далеко не всегда приводит к ожидаемому росту эффективной теплопроводности композита [5]. Это указывает на существование дополнительных факторов, лимитирующих теплоперенос, ключевым из которых является формирование межфазного граничного слоя с особыми теплофизическими свойствами.

Данная совместная исследовательская работа направлена на установление взаимосвязи между структурными параметрами нанокомпозитов, получаемых по технологии термомеханического совмещения, и их эффективной теплопроводностью. Центральное внимание уделено количественной оценке вклада межфазного термического сопротивления и анализу размерных эффектов, проявляющихся при переходе частиц наполнителя в нанодиапазон.

2. Методика исследования

В качестве матричного материала в теплофизических экспериментах использовали эпоксидную смолу, что обеспечивало стабильность геометрии образцов и воспроизводимость результатов.

В роли дисперсных наполнителей выступали порошки оксида алюминия (Al_2O_3) и диоксида кремния (SiO_2) с различными средними размерами частиц – от микронного (4–20 мкм) до нанометрового (20–500 нм) диапазонов.

Выбор данных объектов позволил проследить эволюцию теплофизических характеристик при последовательном уменьшении масштаба наполнителя.

Эффективный коэффициент теплопроводности композитов λ_{eff} определяли экспериментальными стандартизованными методами. Для теоретического анализа теплопереноса применяли два взаимодополняющих подхода.

Первый основывался на аналитической модели Максвелла для эффективной среды.

Второй, более детальный, заключался в численном решении трёхмерного стационарного уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями первого рода на противоположных гранях расчётной ячейки и адиабатическими условиями на остальных. Решение выполняли конечно-разностным методом по схеме «крест» на структурированной сетке. Эффективную теплопроводность вычисляли через суммарный тепловой поток, проходящий через образец.

Ключевым параметром модели выступало межфазное термическое сопротивление R_δ (сопротивление Капицы), характеризующее скачок температуры на границе «матрица–наполнитель».

Толщину теплового межфазного слоя δ оценивали путём варьирования R_δ в численной модели до достижения совпадения расчётных и экспериментальных значений λ_{eff} с последующим применением соотношения $\delta = \lambda_{\text{eff}} \cdot R_\delta$.

3. Результаты и Обсуждение

Формирование в нанокомпозите переходного

граничного слоя является фундаментальным следствием взаимодействия полимерной матрицы с поверхностью наполнителя. В этом слое макромолекулы находятся в особом конформационном состоянии, отличном от состояния в объёме, что влечёт за собой изменение всех физических характеристик, включая теплопроводность.

Как было показано ранее [3, 4], активные наночастицы с нескомпенсированным поверхностным зарядом способны инициировать образование упорядоченных областей матрицы, выступая центрами структурообразования. Однако влияние этого эффекта на интегральную теплопроводность композита неоднозначно и требует количественного анализа.

Для оценки толщины теплового межфазного слоя δ была использована расчётная схема, представленная на рисунке 1.

В рамках предложенной методики, варьируя значение R_δ в численной модели, добивались совпадения теоретической и измеренной концентрационных зависимостей λ_{eff} . Результаты этой процедуры для системы «эпоксидная смола – Al_2O_3 » приведены на рисунке 2.

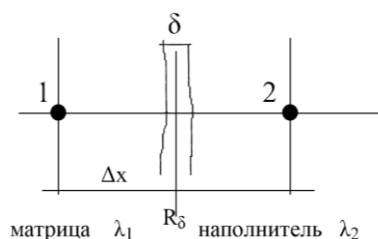


Рис. 1. Схематичное представление межфазной области в композите

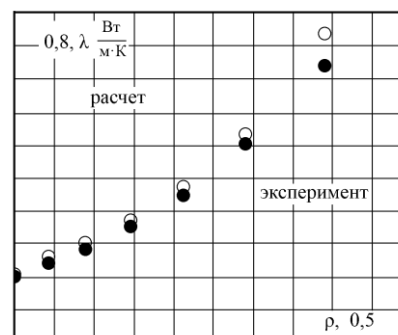


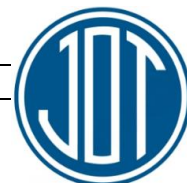
Рис. 2. Сопоставление экспериментальной и расчётных зависимостей λ_{eff} от содержания Al_2O_3 .

Согласно полученным данным, для композита с концентрацией наполнителя 0,312 мас. % и экспериментальным значением $\lambda_{\text{eff}} = 0,675$ Вт/(м·К) совпадение с расчётом достигается при $R_\delta \approx 1 \cdot 10^{-8}$ м²·К/Вт. Данная величина соответствует толщине теплового межфазного слоя δ порядка 6,75 нм.

Этот результат хорошо согласуется с представлениями о нанометровом масштабе зоны возмущения полимерной матрицы вблизи поверхности твёрдого тела [6].

Далее был проведен анализ влияния размерного фактора на собственную теплопроводность частиц наполнителя.

В фоновом приближении влияние характерного размера частицы на её теплопроводность может быть описано через число Кнудсена $K_n = l / L$, где l – длина



свободного пробега фононов, а L – характерный размер частицы [7].

Эффективная теплопроводность частицы λ_{eff} связана с теплопроводностью объёмного материала λ_0 соотношением (2):

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_0}{1 + K_n} \quad (2)$$

Расчётные оценки, выполненные с использованием справочных данных по теплофизическим параметрам и температурам Дебая для ряда соединений (MgO , Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , SiC , SiO_2), показали, что проявление размерных эффектов для различных материалов начинается в существенно различающихся диапазонах (рисунок 3).

Как видно из представленных зависимостей, границы наноразмерности, ниже которых теплопроводность материала частицы начинает заметно снижаться, простираются от полутора до пятисот нанометров.

Примечательно, что для таких соединений, как SiO_2 и TiO_2 , расчётный порог L_0 , полученный из соотношения $L_0 = 230 \cdot \theta D^{-1/2}$, даёт удовлетворительную оценку этой границы, тогда как для других материалов требуются более сложные модели, учитывающие особенности фононного спектра.

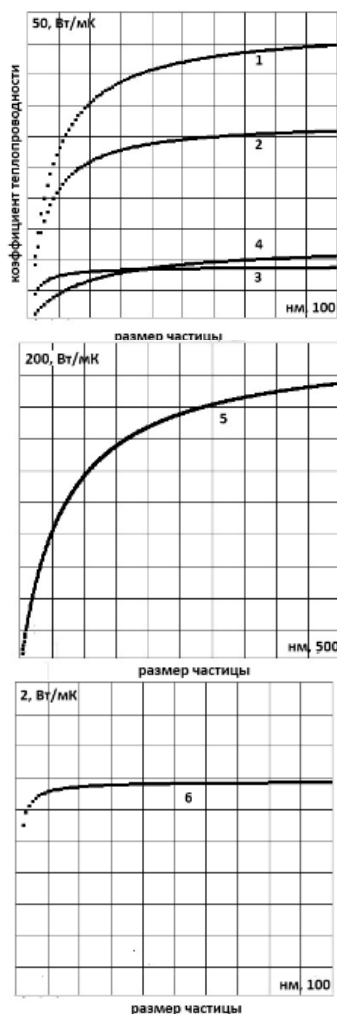


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности частицы от ее размеров: 1 – MgO ; 2 – Al_2O_3 ; 3 – TiO_2 ; 4 – ZnO ; 5 – SiC ; 6 – SiO_2 .

Сопоставление экспериментальных данных по теплопроводности композитов с наполнителями различной дисперсности (рисунки 4 и 5) выявляет устойчивую закономерность.

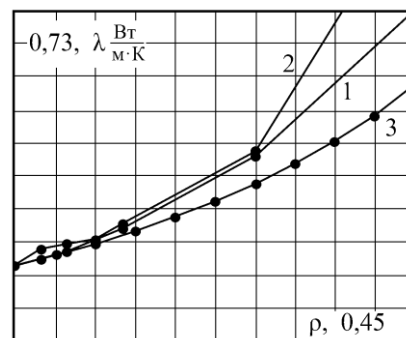


Рис. 4. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности модельного композита «эпоксидная смола + SiO_2 » при размерах частиц наполнителя $d > 200$ нм: 1 – эксперимент; 2 – расчет; 3 – расчет по модели Максвелла

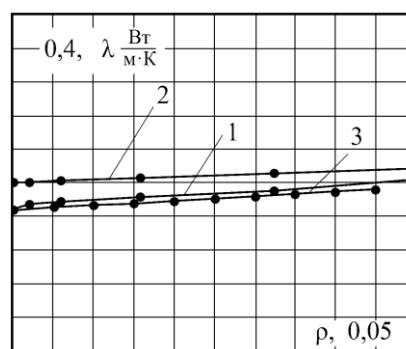


Рис. 5. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности модельного композита «эпоксидная смола + Al_2O_3 » при размерах частиц наполнителя $d > 500$ нм: 1 – эксперимент; 2 – расчет; 3 – расчет по модели Максвелла

Как следует из графиков, расчёты по классической модели Максвелла, не учитывающей ни межфазное сопротивление, ни размерную зависимость теплопроводности наполнителя, дают систематически завышенные значения λ_{eff} . Напротив, численная модель, параметризованная по описанной выше методике, демонстрирует хорошее согласие с экспериментом во всём исследованном диапазоне концентраций.

При переходе к частицам нанометрового размера экспериментально фиксируется снижение эффективной теплопроводности композита по сравнению с системами, содержащими микронные частицы того же химического состава при сопоставимой объёмной доле (рисунки 6 и 7) [8].

Данное наблюдение на первый взгляд противоречит интуитивному ожиданию, что наночастицы, обеспечивая колоссальную межфазную поверхность, должны способствовать росту теплопроводности за счёт модифицирования матрицы. Однако количественный анализ демонстрирует, что в нанодиапазоне начинают доминировать два конкурирующих фактора, снижающих теплоперенос.

Во-первых, резко возрастает вклад межфазного

термического сопротивления Капицы, обусловленного рассогласованием акустических спектров полимера и наполнителя, а также дефектностью контакта. Суммарная площадь границ раздела фаз с уменьшением размера частиц растёт обратно пропорционально их диаметру, что ведёт к пропорциональному росту интегрального термического сопротивления.

Во-вторых, уменьшается собственная теплопроводность материала частиц из-за баллистического характера фононного переноса и рассеяния фононов на границах нанокристаллитов.

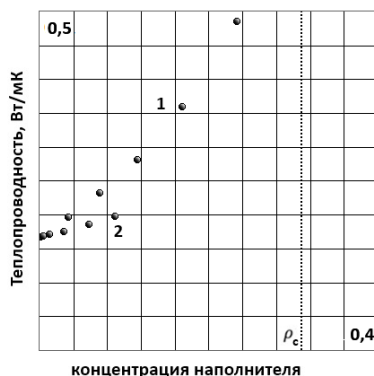
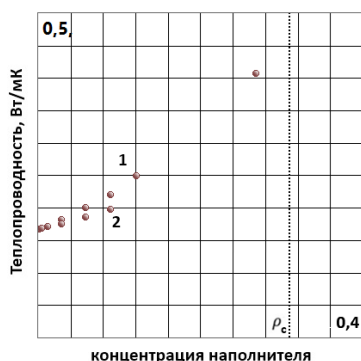


Рис. 6. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности композита «эпоксидная смола + Al_2O_3 » при размерах частиц наполнителя: 1 – $d \sim 4$ мкм; 2 – $d \sim 30$ нм; ρ_c – порог перколяции



Рису. 7 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности композита «эпоксидная смола + SiO_2 » при размерах частиц наполнителя: 1 – $d \sim 20$ нм; 2 $d \sim 20$ нм; ρ_c – порог перколяции

Эффект модифицирования матрицы, выражающийся в образовании упорядоченных областей с потенциально более высокой теплопроводностью, в данных системах оказывается количественно незначительным по сравнению с вышеуказанными факторами.

Иными словами, механизмы, ответственные за упрочнение нанокомпозитов, и механизмы, определяющие их теплопроводность, имеют различную природу. Целесообразно ввести разделение на механический межфазный слой, обеспечивающий передачу напряжений, и тепловой межфазный слой (слой Капицы), лимитирующий тепловой поток.

Дальнейшее совместное углублённое изучение взаимосвязи структуры этих двух слоёв представляет собой актуальную задачу.

4. Заключение

Выполненный комплекс расчётно-экспериментальных исследований теплопереноса в полимерных нанокомпозитах, получаемых термомеханическим совмещением, позволяет сформулировать следующие научно обоснованные положения:

1. Предложена и верифицирована конечно-разностная методика, позволяющая на основе сопоставления с экспериментом количественно определять межфазное термическое сопротивление Капицы и соответствующую ему эффективную толщину теплового граничного слоя. Для композита «эпоксидная смола – Al_2O_3 » установлено значение $\delta \approx 6,75$ нм, что соответствует нанометровому масштабу.

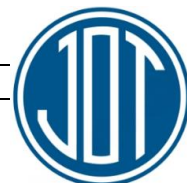
2. Показано, что собственная теплопроводность частиц наполнителя не является величиной константной и при уменьшении их размера ниже нескольких сотен нанометров начинает монотонно снижаться вследствие ограничения длины свободного пробега фононов.

3. Установлено, что доминирующими факторами, определяющими эффективную теплопроводность нанокомпозита, являются межфазное сопротивление Капицы и снижение теплопроводности самого наполнителя. Их совокупное действие перекрывает позитивный эффект от модифицирования приповерхностных слоёв матрицы, что приводит к наблюдаемому в эксперименте уменьшению λ_{eff} при переходе к наночастицам.

Полученные результаты создают основу для обоснованного выбора типа и дисперсности наполнителей при конструировании полимерных композиционных материалов с заданными теплофизическими характеристиками для применения в системах терморегулирования.

Использованная литература / References

- [1] Стратегия «Узбекистан – 2030»: Указ Президента Республики Узбекистан № УП-158 от 11 сентября 2023 г. URL: https://strategy.uz/index.php?static=strategy_action&lang=ru.
- [2] О Государственной программе инновационного развития на 2026 – 2030 годы: Указ Президента Республики Беларусь № 448 от 21 декабря 2025 г. URL: <https://president.gov.by/ru/documents/ukaz-po-448-ot-21-dekabrya-2025-g>.
- [3] Авдейчик, С. В. Фактор наносоостояния в материаловедении полимерных нанокомпозитов / С. В. Авдейчик, В. А. Струк, А. С. Антонов. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017. – 468 с.
- [4] Антонов, А. С. Энергетический фактор материаловедения и технологии полимерных композитов : монография / А. С. Антонов, С. В. Авдейчик, А. Г. Икромов ; под науч. ред. В. А. Струка, А. А. Riskulova. – Ташкент : Vneshinvestprom, 2019. – 214 с.
- [5] Никитин, А. В. Тепловое сопротивление Капицы межфазного слоя композиционных систем с мелкодисперсным наполнителем / А. В. Никитин, А. В. Белко // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта



імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 137–145.

[6] Kochetov R., Korobko A., Andritsch Th., Morshuis P. H. F., Picken S. J., Smit J. J. Modelling of the thermal conductivity in polymer nanocomposites and the impact of the interface between filler and matrix // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2011. – Vol. 44(39). – 12 p.

[7] Хвесюк, В. И. Теплопроводность наноструктур / В. И. Хвесюк, А. С. Скрыбин // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 3. – С. 447–471.

[8] Zhang, G. A Percolation Model of Thermal Conductivity for Filled Polymer Composite / G. Zhang [et al.] // Journal of Composite Materials. – 2010. – Vol. 44, № 8. – P. 963–970.

Інфармацыя аб аўтарах/ Information about the authors

Антонов
Александр
Сергеевич /
Aleksandr
Antonov
Гродненского
государственного
университета имени Янки
Купалы (Республика
Беларусь), К.т.н., доцент
E-mail:
antonov.science@gmail.com
Тел.: +375 29 265 9936
<https://orcid.org/0000-0002-6155-4635>

Струк Василий
Александрович
/ Vasilij Struk

Гродненского
государственного
университета имени Янки
Купалы (Республика
Беларусь), Д.т.н., профессор
E-mail: struk@grsu.by
Тел.: +375 29 265 9936
<https://orcid.org/0009-0003-0934-6833>

Рахматов
Муроджон
Искандарович
/ Murodjon
Rakhmatov

Ташкентский государственный
транспортный университет,
Старший преподаватель
E-mail:
murodjonrakhmatov9@gmail.com
Тел.: +998974070053
<https://orcid.org/0009-0008-6395-5804>

Рискулов
Алимжон
Ахмаджанович
/ Alimjon
Riskulov

Ташкентский государственный
транспортный университет,
Д.т.н., профессор
E-mail: olimjonr2008@mail.ru
Тел.: +998983003055
<https://orcid.org/0000-0002-5275-9153>

Нурметов
Хуршидбек
Икромович /
Khurshidbek
Nurmetov

Ташкентский государственный
транспортный университет,
PhD, доцент
E-mail: behbudbek@gmail.com
Тел.: +998901877001
<https://orcid.org/0000-0002-6111-7259>



M. Miralimov, Sh. Akhmedov, B. Mukhitdinov, A. Menglibaev <i>Effective technologies for protecting bridge cones using gabion structures.....</i>	160
A. Antonov, V. Struk, M. Rakhmatov, A. Riskulov, Kh. Nurmetov <i>Modelling of thermophysical characteristics and analysis of interfacial interaction in nanocomposites based on polymer matrices.....</i>	164
M. Sobirov <i>Heating of car brake discs and measures to eliminate it.....</i>	169
R. Dadaboev, T. Olimov <i>Theoretical foundations of the mass customization concept in the automotive industry.....</i>	174