Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Минеев Д.А., Бондалет И.С., Быков П.Д. Экспериментальные исследования термоакустического метода снижения адгезии грунтов к рабочим органам землеройных машин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2026. – № 40. – С. 64-69.

УДК 621.879:534.8 https://doi.org/10.26160/2658-3305-2026-40-64-69

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА СНИЖЕНИЯ АДГЕЗИИ ГРУНТОВ К РАБОЧИМ ОРГАНАМ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН

Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Минеев Д.А., Бондалет И.С., Быков П.Д.
Братский государственный университет, Братск

Ключевые слова: намерзание грунта, адгезия, ультразвуковое воздействие, пьезокерамический преобразователь, напряжение сдвига, термоакустический эффект.
Аннотация. В статье рассматривается актуальная научно-техническая задача предотвращения налипания и примерзания грунта к рабочим органам строительно-дорожных и землеройных машин при эксплуатации в условиях отрицательных температур. Исследована эффективность применения пакетных пьезокерамических преобразователей марки CN4038-45LB-P4 (рабочая частота 40 кГц, мощность 60 Вт) в качестве комбинированного термоакустического метода снижения адгезии. На модернизированном лабораторном сдвиговом стенде, установленном в климатической морозильной камере, проведена серия экспериментов по трехфакторному плану Бокса (B3) для суглинка с весовой влажностью 12,5%. Оценено совместное влияние температуры окружающей среды (от –5 до –25°C), давления прижатия (от 10 до 30 кПа) и продолжительности ультразвукового воздействия (от 1 до 5 мин) на величину напряжения сдвига. Получены математические модели регрессии и построены контурные графики отклика. Экспериментально установлено, что ультразвуковая обработка снижает сопротивление сдвигу в 2,1-4,5 раза во всем исследованном диапазоне параметров. Выявлено, что основное разрушение адгезионного контакта (на 50-65%) происходит уже в течение первой минуты воздействия. Это подтверждает целесообразность использования энергоэффективных циклических режимов генерации колебаний в реальных циклах работы землеройной техники.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE THERMOACOUSTIC METHOD FOR REDUCING SOIL ADHESION TO THE WORKING ELEMENTS OF EARTHMOVING MACHINES

Zenkov S.A., Dryupin P.Yu., Mineev D.A., Bondalet I.S., Bykov P.D.
Bratsk State University, Bratsk

Keywords: soil freezing, adhesion, ultrasonic action, piezoceramic transducer, shear stress, thermoacoustic effect.
Abstract. The article addresses the urgent engineering problem of preventing soil sticking and freezing onto the working tools of construction and earthmoving machinery operating under sub-zero ambient temperatures. The study explores the effectiveness of ultrasonic piezoceramic sandwich transducers (model CN4038-45LB-P4, operating at 40 kHz, 60 W) as a combined thermoacoustic method for adhesion reduction. Experimental investigations were conducted using a modernized direct shear test bench placed inside a climate freezing chamber based on a three-factor Box design (B3) for loam with a moisture content of 12.5%. The joint influence of ambient temperature (–5 to –25°C), normal contact pressure (10 to 30 kPa), and ultrasonic exposure duration (1 to 5 min) on shear stress was evaluated. Regression equations were obtained and response contour plots were constructed. The findings demonstrate that ultrasonic treatment reduces shear stress by a factor of 2.1 to 4.5 across the entire investigated parameter range. Furthermore, 50-65% of contact bond weakening occurs within the first minute of excitation, confirming the feasibility of implementing energy-efficient cyclic operating modes during machine digging and dumping cycles.

Введение. Эксплуатация строительно-дорожной техники в условиях повышенной влажности, отрицательных температур и сложных грунтовых условий сопровождается интенсивным налипанием и примерзанием разрабатываемой среды к поверхностям ковшей (рис. 1), отвалов, фрез и других рабочих органов. Адгезия грунта приводит к увеличению сопротивления копанию, снижению полезной ёмкости ковша, нарушению формы отвала, росту энергозатрат и вынужденным простоям на очистку. Традиционные методы – подогрев, механическая очистка, нанесение антиадгезионных покрытий и химических смазок – имеют ограничения: высокое энергопотребление, абразивный износ, зависимость от погодных условий и экологические риски. В этой связи перспективным направлением представляется

использование ультразвуковых преобразователей, в качестве комбинированного метода для борьбы с намерзанием и налипанием грунта [1-6].

Данная работа посвящена изучению ультразвукового воздействия на зону контактирования разрабатываемой среды и поверхности рабочего органа.

Основная часть. В проведенном экспериментальном исследовании источником ультразвуковых колебаний выступает ультразвуковой пьезокерамический преобразователь CN4038-45LB-P4 мощностью 60 Вт и частотой 40 кГц. Стоит отметить, что при использовании данных преобразователей на зону контакта действует комбинированное воздействие – вибрационное и тепловое [7].

В состав ультразвукового излучателя марки CN4038-45LB-P4 (рис. 1) входят пара керамических дисков 1, выполненная из сплава Д16Т верхняя накладка 2, стальная (сталь 45) нижняя опора 4, а также разделяющие фольгированные прослойки 3 толщиной порядка 0,2-0,3 мм. Сборка пакета осуществляется посредством центрального стяжного болта 5, проходящего сквозь осевые каналы активных пластин и концевых накладок [7].

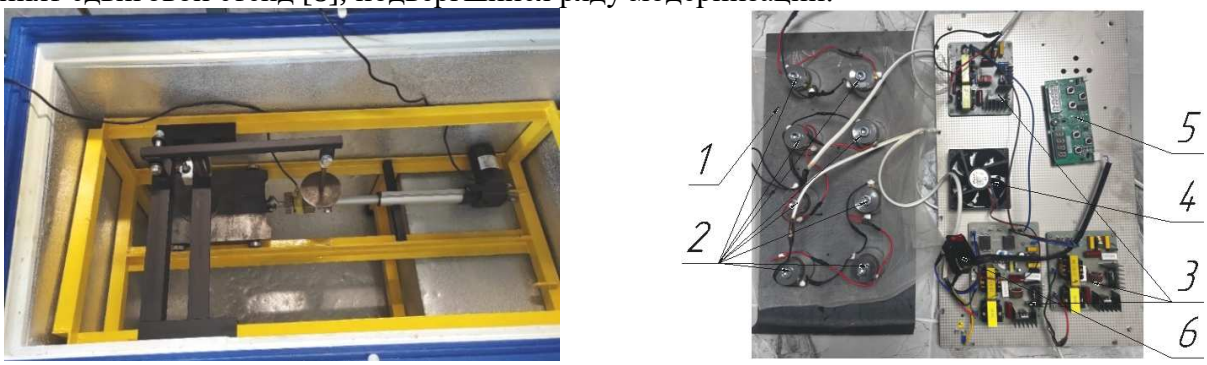


Рис. 1. Конструкция пакетного преобразователя CN4038-45LB-P4

В основе функционирования пьезокерамических излучателей лежит пьезоэлектрический эффект. Это явление представляет собой двустороннюю связь: материал способен деформироваться под воздействием электрического поля, а при механическом напряжении – вырабатывать электрический заряд. В излучателях применяются керамические пьезоэлементы, обладающие высокой чувствительностью.

В процессе функционирования пьезокерамические излучатели подвержены температурному нагреву. Одновременное проявление теплового фактора и высокочастотных механических колебаний обеспечивает суммарный термоакустический эффект на выходе. Благодаря компактным габаритам и удобству установки компоновка пакетного пьезоэлектрического узла наиболее рациональна для интеграции в исполнительные механизмы дорожно-строительной спецтехники.

Для проведения экспериментальных исследований по определению эффективности использования ультразвуковых преобразователей, направленных на противодействие намерзанию грунтовой породы к поверхностям рабочих органов землеройных машин, была разработана специальная лабораторная установка (рис. 2). За основу лабораторной установки принят сдвиговой стенд [8], подвергшийся ряду модернизаций.



а б

Рис. 2. Лабораторное оборудование: а – сдвиговой стенд; б – компоновка имитатора рабочего органа с пьезокерамическими преобразователями; 1 – имитатор; 2 – преобразователь; 3 – ультразвуковая плата; 4 – вентилятор охлаждения; 5 – панель управления; 6 – тумблер

Лабораторная установка представляет собой сдвиговой стенд (рис. 2, а), размещенный в изолированной морозильной камере. Сдвиговой стенд представляет собой двухярусную жесткую раму. Нижний ярус предназначен для перемещения подвижной каретки, к которой монтируется имитатор рабочего органа вместе с пьезокерамическими преобразователями

(рис. 2, б). В движение подвижная каретка приводится линейным приводом, который соединяется с подвижной кареткой через тензометрический датчик. Величину усилия сдвига измеряет тензометрический датчик и фиксирует его на электронном измерительном индикаторе. На имитатор ковша устанавливается обойма с грунтовым образцом. Верхний ярус предназначен для достижения необходимого давления прижатия грунта. Для этого на нем монтируется поперечная перекладина, на которой в подшипнике скольжения установлен поршень, передающий давление прижатия. Требуемое давление на грунт достигается с помощью рычажного механизма и съемных подвесных грузов [9].

Экспериментальное исследование проводилось по плану Бокса (В3), согласно которому варьирование трех факторов происходит на трех уровнях: нижнем, среднем и верхнем, и предполагает проведение опытов в 15 точках факторного пространства [10]. План проведения экспериментального исследования в кодированном и натуральном виде представлен в таблице 1.

В экспериментальном исследовании использовался суглинок дисперсностью $D = 7 \cdot 10^{-3}$ мм и весовой влажностью $W = 12{,}5\%$. Длительность контакта грунта с рабочей поверхностью составляло $t_к = 10$ мин. Площадь контакта грунтового образца $S = 78{,}5$ мм^2.

Результатом проведенного экспериментального исследования является величина напряжения сдвига грунтового образца без применения (табл. 2) и с применением пьезокерамических излучателей (табл. 3).

Табл. 1. План проведения экспериментального исследования в кодированном и натуральном виде

№	Кодированные значения			Натуральные значения		
	X_1	X_2	X_3	T, ºС	P, кПа	t, мин
1	+1	+1	+1	-5	30	5
2	-1	+1	+1	-25	30	5
3	+1	-1	+1	-5	10	5
4	-1	-1	+1	-25	10	5
5	+1	+1	-1	-5	30	1
7	+1	-1	-1	-5	10	1
8	-1	-1	-1	-25	10	1
9	0	0	-1	-15	20	1
10	0	0	+1	-15	20	5
11	0	-1	0	-15	10	3
12	0	+1	0	-15	30	3
13	+1	0	0	-5	20	3
14	-1	0	0	-25	20	3
15	0	0	0	-15	20	3

Примечание: $X_1(T)$ – температура окружающей среды, ºС; $X_2(P)$ – давление прижатия грунта, кПа; $X_3(t)$ – продолжительность ультразвукового воздействия, мин.

Табл. 2. Напряжение сдвига без применения пьезокерамических излучателей

№	Температура окр. среды, °С	Давление прижатия, кПа	Напряжение сдвига, кПа
1	–5	10	23,1
2		20	30,6
3		30	39,6
4	–15	10	14,3
5		20	27,6
6		30	42,5
7	–25	10	25,6
8		20	54,8
9		30	52,5

Табл. 3. Напряжение сдвига с применением пьезокерамических излучателей

№	Отклик эксперимента (напряжение сдвига, кПа)	№	Отклик эксперимента (напряжение сдвига, кПа)
1	12,63	9	13,51
2	13,69	10	10,06
3	6,28	11	7,38
4	8,46	12	13,49
5	16,03	13	12,73
6	21,71	14	14,69
7	11,26	15	11,20
8	10,96		

Для обработки данных и построения графиков использовался программный пакет для статистического анализа «Statistica». В результате обработки экспериментальных данных были получены уравнения регрессии и контурные графики (рис. 3-5). Полученные уравнения регрессии напряжения сдвига (τ):

– При температуре окружающей среды T = –5°С:

$$\tau(T_{-5}) = 4{,}16 + 0{,}83 \cdot P - 0{,}7 \cdot t - 0{,}012 \cdot P^2 - 0{,}025 \cdot P \cdot t + 0{,}0378 \cdot t^2, \quad (1)$$

где P – давление прижатия грунта, кПа; t – продолжительность ультразвукового воздействия, мин.

– При температуре окружающей среды T = –15°С:

$$\tau(T_{-15}) = 2{,}57 + 0{,}8 \cdot P - 0{,}92 \cdot t - 0{,}012 \cdot P^2 - 0{,}025 \cdot P \cdot t + 0{,}05 \cdot t^2. \quad (2)$$

– При температуре окружающей среды T = –25 °С:

$$\tau(T_{-25}) = 4{,}80 + 0{,}95 \cdot P - 1{,}05 \cdot t - 0{,}012 \cdot P^2 - 0{,}025 \cdot P \cdot t + 0{,}05 \cdot t^2. \quad (3)$$

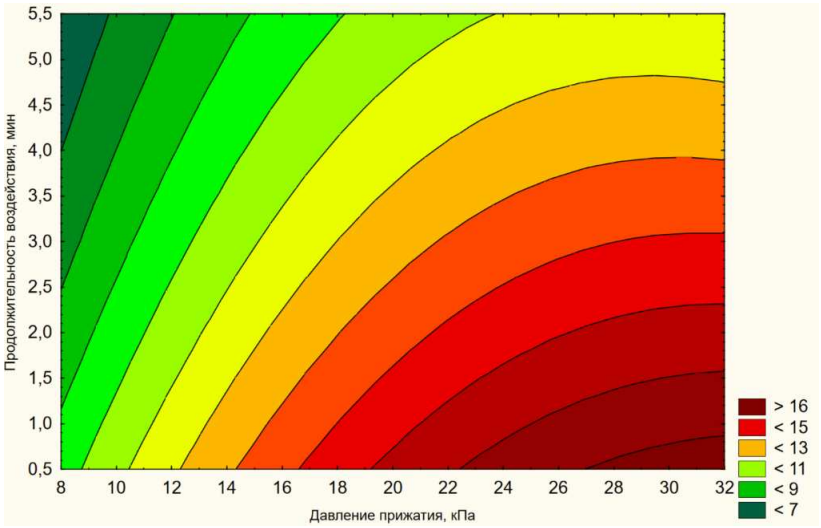


Рис. 3. Контурный график при температуре окружающей среды T = –5ºС

Как видно из графика (рис. 3) применение пьезокерамических излучателей эффективно снижает напряжение сдвига грунтового образца. Для эффективного предотвращения примерзания грунта к рабочим органам при рабочих давлениях прижатия порядка 16-24 кПа оптимальная продолжительность ультразвукового воздействия должна составлять не менее 3,5-4,5 мин. Так же стоит отметить, что при продолжительности воздействия более 4,0 мин напряжение сдвига удерживается в зоне минимальных значений (до 9-11 кПа) даже при умеренно высоких давлениях прижатия.

На данном графике (рис. 4) видно, что применение пьезокерамических излучателей эффективно снижает напряжение сдвига примерсшего грунта по рабочей поверхности. Наибольшая эффективность метода достигается при умеренных давлениях прижатия до 16-18 кПа, где для предотвращения адгезии достаточно воздействия продолжительностью

2,5-4 минуты. При повышенных нагрузках (>24 кПа) эффект ультразвукового воздействия замедляется.

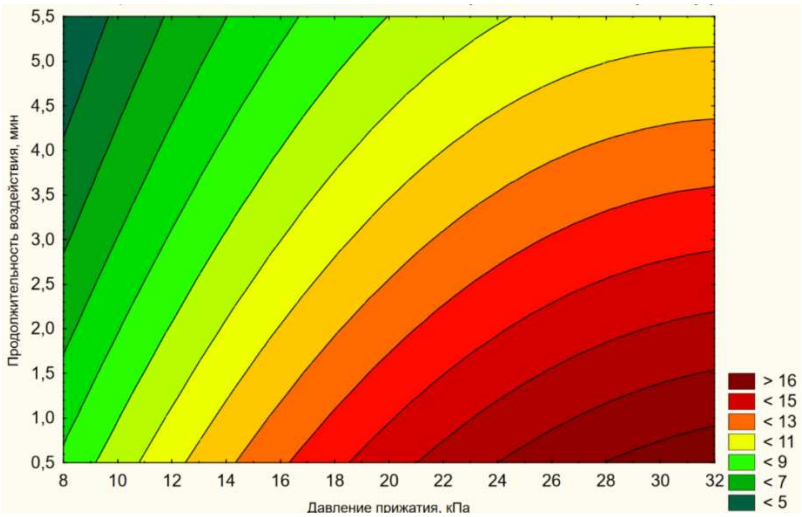


Рис. 4. Контурный график при температуре окружающей среды T = –15ºС

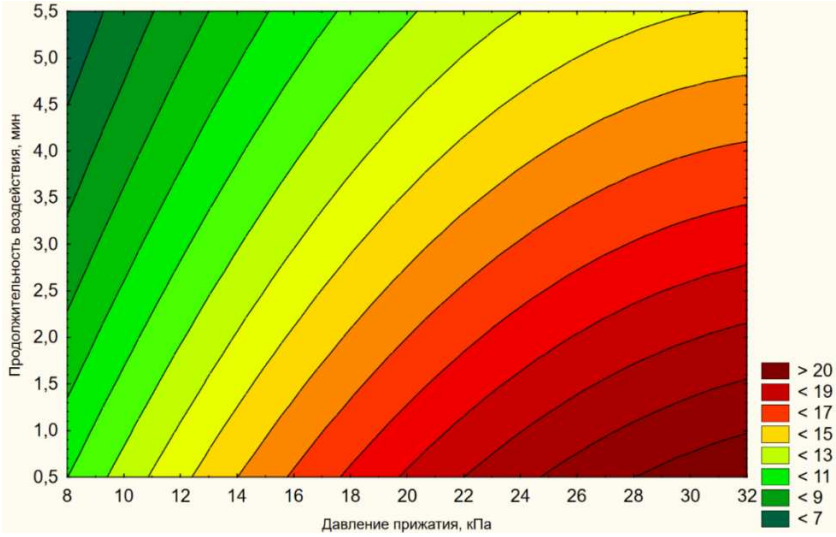


Рис. 5. Контурный график при температуре окружающей среды Т= -25 *ºС*

На данном графике (рис. 5) видно, что применение пьезокерамических излучателей эффективно снижает напряжение сдвига грунтового образца по поверхности рабочего органа. Однако эффективность ультразвукового воздействия зависит от удельного давления: при высоком давлении прижатия (>22 кПа) эффект снижения напряжения сдвига требует продолжительности непрерывного воздействия не менее 4,5-5,0 мин. Оптимальным технологическим диапазоном работы излучателей при умеренных нагрузках (до 16-18 кПа) является продолжительность воздействия 3,0-4,5 мин.

Выводы

1. Экспериментально подтверждена эффективность применения ультразвуковых пьезокерамических преобразователей пакетного типа (CN4038-45LB-P4, рабочая частота 40 кГц, мощность 60 Вт) для интенсификации процесса разрушения адгезионного контакта между мерзлым грунтом и металлической поверхностью рабочего органа.

2. Установлена кратность снижения сдвигового усилия: комбинированное термоакустическое воздействие обеспечивает снижение напряжения сдвига в 2,1-4,5 раза во всем исследованном диапазоне температур (от –5 до –25°С) и нормальных давлений прижатия (от 10 до 30 кПа). Без ультразвуковой обработки максимальное напряжение сдвига достигало 54,8 кПа, тогда как при 5-минутном ультразвуковом воздействии его величина не превышала 13,69 кПа.

3. Выявлен выраженный кинетический эффект начального периода: основное разупрочнение контактного слоя (на 50-65%) происходит уже в течение первой минуты работы преобразователей. Это свидетельствует о возможности применения кратковременных циклических режимов генерации колебаний в цикле копания/разгрузки, что существенно снижает удельное энергопотребление системы.

Список литературы

1. Заднепровский Р.П. Теория трения скольжения. – Волгоград: Ofset, 2005. – 51 с.
2. Заднепровский Р.П. Рабочие органы землеройных и мелиоративных машин и оборудования для разработки грунтов и материалов повышенной влажности. – М.: Машиностроение, 1992. – 176 с.
3. Сладкова Л.А., Григорьев П.А. Физико-математическая модель налипания грунта на поверхность рабочих органов землеройно-транспортных машин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2021. – №4. – С. 381-388. – DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-381-388.
4. Tong J., Ren L., Yan J., Ma Y., Chen B. Adhesion and abrasion of several materials against soil // International Agricultural Engineering Journal. 1999, vol. 8, no. 1, pp. 1-22.
5. Azadegan B., Massah J. Effect of temperature on adgesion of clay soil to steel // Cercetări Agronomiceîn Moldova. 2012, vol. XLV, no. 2(150), pp. 21-27.
6. Zenkov S.A., Kirichenko O.P., Mineev D.A. Reducing adhesion of soil to the earth-moving machines using piezoceramic transducers // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2017. – №4. – С. 56-58.
7. Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Бондалет И.С., Минеев Д.А., Медведев С.Н. Перспективы применения пьезокерамических преобразователей для снижения адгезии грунтов к машинам // Механики XXI веку. – 2026. – №25. – С. 105-110.
8. Патент №2460989 РФ. Стенд сдвиговый / С.А. Зеньков, Д.Ю. Кобзов, Е.В. Курмашев. – Заявка №2010139838 от 28.09.2010; опубл. 09.10.2012, Бюл. №10.
9. Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Бондалет И.С., Минеев Д.А., Медведев С.Н. Лабораторное оборудование для измерения силы адгезии грунтов для определения эффективности методов борьбы с ней // Механики XXI веку. – 2026. – №25. – С. 96-101.
10. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980 – 384 с.

References

1. Zadneprovskij R.P. Theory of sliding friction. – Volgograd: Ofset, 2005. – 51 p.
2. Zadneprovskij R.P. The working bodies of earth-moving and reclamation machines and equipment for the development of soils and materials of high humidity. – M.: Mechanical Engineering, 1992. – 176 p.
3. Sladkova L.A., Grigorev P.A. Physical-mathematical model of ground adhesion on the surface of the excavating parts of earth-moving machines // Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University. 2021, no. 4, pp. 381-388. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-381-388.
4. Tong J., Ren L., Yan J., Ma Y., Chen B. Adhesion and abrasion of several materials against soil // International Agricultural Engineering Journal. 1999, vol. 8, no. 1, pp. 1-22.
5. Azadegan B., Massah J. Effect of temperature on adgesion of clay soil to steel // Cercetări Agronomiceîn Moldova. 2012, vol. XLV, no. 2(150), pp. 21-27.
6. Zenkov S.A., Kirichenko O.P., Mineev D.A. Reducing adhesion of soil to the earth-moving machines using piezoceramic transducers // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2017, no. 4, pp. 56-58.
7. Zenkov S.A., Dryupin P.Yu., Bondalet I.S., Mineev D.A., Medvedev S.N. Prospects for the use of piezoceramic transducers to reduce soil adhesion to machinery // Mechanics for the 21st Century. 2026, no. 25, pp. 105-110.
8. Patent No. 2460989 RU. Shear stand / S.A. Zenkov, D.Yu. Kobzov, E.V. Kurmashev. – Appl. No. 2010139838 from 28.09.2010; publ. 10.09.2012, Bull. No. 25.
9. Zenkov S.A., Dryupin P.Yu., Bondalet I.S., Mineev D.A., Medvedev S.N. Laboratory equipment for measuring soil adhesion force to evaluate the effectiveness of mitigation methods // Mechanics for the 21st Century. 2026, no. 25, pp. 96-101.
10. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments: trans. from English. – L.: Shipbuilding, 1980 – 384 p.

Сведения об авторах:	*Information about authors:*
Зеньков Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины»	**Zenkov Sergey Alekseevich** – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department «Construction and road-building machinery»
Дрюпин Павел Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Строительные и дорожные машины»	**Dryupin Pavel Yurievich** – Senior Lecturer of the Department «Construction and road-building machinery»
Бондалет Иван Сергеевич – аспирант	**Bondalet Ivan Sergeevich** – postgraduate student
Минеев Дмитрий Андреевич – аспирант	**Mineev Dmitry Andreevich** – postgraduate student
Быков Павел Дмитриевич – студент	**Bykov Pavel Dmitrievich** – student
dryupin_p@mail.ru	

Получена 08.10.2026