

## Сравнение эффективности использования нагревательных элементов при борьбе с намерзанием грунта на рабочие органы строительного-дорожных машин

С.А. Зеньков<sup>а</sup>, П.Ю. Дрюпин<sup>б</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>а</sup> mf@brstu.ru, <sup>б</sup> 760bf@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4948-0223>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6122-9226>

Статья поступила 23.06.2022, принята 17.11.2022

*В статье приводится обоснованное подтверждение того, что применение нагревательных элементов снижает адгезионные силы, которые возникают между рабочими органами землеройных машин и влажными грунтами в условиях, когда температура окружающей среды ниже нуля градусов. Представлены результаты экспериментальных исследований, где в качестве нагревательных элементов использовались гибкие пластинчатые силиконовые нагреватели. Данные нагреватели имеют ряд важных качеств, которые способствуют их применению на рабочих органах строительного-дорожных машин: плотное и полное прилегание по всей площади контакта, что способствует равномерному нагреву; малые вес и толщина; возможно применение источников питания различного напряжения. В данном исследовании рассмотрены нагревательные элементы с различным напряжением питания, 12 и 220 В. В ходе исследований на специальном экспериментальном сдвиговом стенде были определены сдвиговое усилие грунта без теплового воздействия и усилия при использовании нагревательных элементов. На основе полученных данных разработана математическая модель, которая описывает влияние различных (варьируемых) факторов на прочность примерзания грунта к поверхности рабочих органов. Определена эффективность применения рассматриваемых пластинчатых нагревателей: при использовании пластины от 220 В сдвиговое усилие снизилось в 1,65...7,0 раза, а применение пластины от 12 В дало снижение сдвигового усилия в 1,21...5,47 раза.*

**Ключевые слова:** напряжение сдвига; связный грунт; адгезионные силы; гибкий нагревательный элемент.

## Comparison of the effectiveness of the use of heating elements in the fight against soil freezing of the working bodies of construction and road machines

S.A. Zenkov<sup>а</sup>, P.Yu. Dryupin<sup>б</sup>

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>а</sup> mf@brstu.ru, <sup>б</sup> 760bf@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4948-0223>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6122-9226>

Received 23.06.2022, accepted 17.11.2022

*This work is aimed at confirming that the use of heating elements reduces the adhesive forces that arise between the working bodies of earth-moving machines and wet soils, in conditions where the ambient temperature is below zero. The results of experimental studies are presented, where it is possible to detect flexible lamellar silicone heaters. The data on heating have a number of values that take place for use on the working organs of construction and road machines: tight and complete fit over the entire contact area, which is prone to rapid heating; have low weight and thickness; manufactured for use with voltage power supplies. The standard specifies requirements for the voltage of batteries with supply voltage: from 12 to 220 V. In the course of studies on a special experimental shear stand, the shear force of the soil without thermal impact and the force when using heating elements are determined. Based on the obtained data, a mathematical model has been developed that describes the influence of various (variable) factors on the strength of soil freezing to the surface of working elements. The effectiveness of the use of the considered plate heaters is determined: when using a plate from 220 V, the shear force decreased by 1.65... 7.0 times, and the use of a plate from 12 V gave a decrease in the shear force by 1.21... 5.47 times.*

**Keywords:** shear stress; cohesive soil; adhesive forces; flexible heating element.

**Введение.** Эффективность выполнения землеройных работ в зимнее время года снижается из-за увеличения времени простоя машин для очистки ковшей от намерзшего грунта [1–12]. Это связано с тем, что влажный связный грунт имеет свойство налипать на

рабочие органы строительного-дорожных машин (СДМ), а при отрицательной температуре окружающей среды силы, которые препятствуют разъединению двух разнородных фаз (адгезионные силы), достигают наивысших значений [13–21]. Для достижения высокой

степени очистки ковша от намерзшего грунта применяется тепловое воздействие на область контакта металлической поверхности рабочего органа и грунта. Стоит отметить, что зачастую источником тепла выступают нагревательные элементы, работающие от сети 220 В, что затрудняет их использование на рабочих органах землеройных машин [1; 6; 8; 9; 12; 18; 19].

В работе [1] проведены исследования по использованию гибкого нагревательного элемента от источника питания напряжением 12 В.

**Постановка и решение задачи.** В данном экспериментальном исследовании источником теплового излучения выступает силиконовый пластинчатый нагреватель. Данный нагреватель использовался в двух вариантах исполнения: от источника питания напряжением 12 и 220 В.

*Цель данного эксперимента* — определить температурные характеристики данных нагревателей, определить и сравнить эффективность их применения для борьбы с намерзанием грунта.

Данный нагреватель (рис. 1) состоит из греющей высокорезистивной проволоки, которая изолирована кремнийорганическими соединениями. В качестве основных преимуществ данных пластин можно отметить большую степень гибкости и малая толщина. Эти технические особенности позволяют применять их в труднодоступных местах и на оборудовании, обладающем сложной формой. Основные технические характеристики [2]:

- мощность удельная,  $Вт/см^2$  — 05/0,8 (12/220 В);
- рабочая температура,  $^{\circ}C$  — 250;
- сопротивление изоляции,  $Вт/см^2$  — 4;
- натяжение проволоки,  $H$  — 15x15;
- отклонения мощности, % — не более 5.

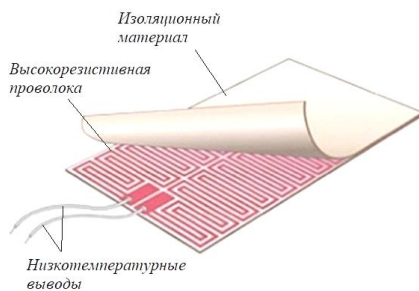


Рис. 1. Пластинчатый силиконовый нагреватель

Практическим путем установлена зависимость температуры нагрева нагревательных элементов от продолжительности нагрева. Данная зависимость выявлялась при температуре окружающей среды  $+20^{\circ}C$ . Температурно-временная характеристика силиконовых нагревательных элементов приведена на рис. 2.

Исследование, направленное на определение эффективности использования данных нагревателей как возможного источника тепла, при противодействии намерзанию грунтовой породы к поверхностям рабочих органов землеройных машин проводилось на сдвиговом стенде (рис. 3). Данный сдвиговой стенд состоит из рамы, на которой, в направляющих, установлена подвижная каретка, с имитатором ковша. Каретка через тензометрический датчик связана с приводным

механизмом. Также на раме установлена обойма, в которую помещается грунт. Для того, чтобы была возможность поместить грунт на стенд для замера, обойма имеет небольшой ход в вертикальном направлении. Перемещение происходит во втулке, которая жестко закреплена на раме. Обойма и нагрузочный рычаг, на одном конце которого подвешивается груз, соединены шарнирно [3; 10]. На рис. 4 представлена принципиальная схема стенда.

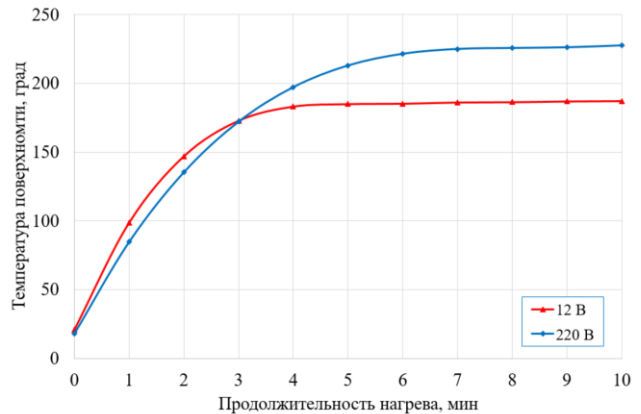


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности нагревателя от продолжительности нагрева



Рис. 3. Лабораторная установка — сдвиговой стенд

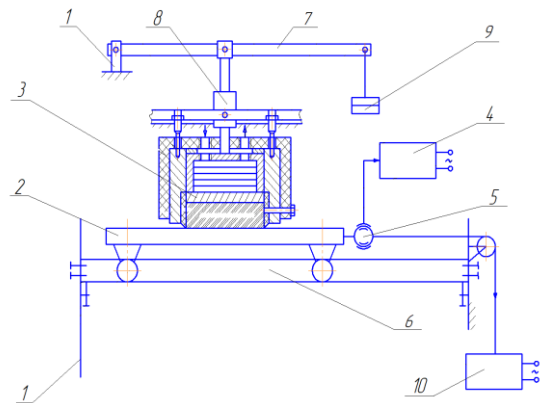


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментального сдвигового стенда: 1 — рама; 2 — каретка; 3 — обойма; 4 — тензометрическая аппаратура; 5 — тензометрический датчик; 6 — направляющая; 7 —

нагрузочный рычаг; 8 — втулка; 9 — груз; 10 — приводной механизм

Сдвиговый стенд предоставляет возможность определить сдвиговое усилие, которое возникает при взаимодействии грунта с поверхностью стенда (имитатором ковша). В исследовании использовался грунт со следующими свойствами: грунт — глина; дисперсность грунта  $D = 7 \cdot 10^{-3}$  мм; весовая влажность  $W = 12,5$  %. Время контакта имитатора ковша и грунта составляло  $t_k = 10$  мин.

План проведения эксперимента: трехфакторная

**Таблица 1.** Интервалы и уровни варьирования

Обозначение варьируемых факторов	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	-1	0	1	
$x_1$	-25	-15	-5	10
$x_2$	30	20	10	10
$x_3$	7	5	3	2

Для определения эффективности применения нагревательных элементов необходимо выяснить сдвиговое усилие, возникающее между грунтовой

модель 3<sup>3</sup>, при которой три рассматриваемых фактора варьируются на трех уровнях. К варьируемым факторам относятся внешняя температура ( $x_1$ ), °C; давление прижатия ( $x_2$ ), кПа; время нагрева имитатора ковша ( $x_3$ ), мин. Уровни варьирования, а также интервал варьирования представлены в табл. 1. Стоит отметить, что данные факторы приняты в результате анализа априорной информации и при анализе данных, полученных на практике.

породой и имитатором ковша, без теплового воздействия на зону контакта (табл. 2), при различной внешней температуре и различном давлении прижатия.

**Таблица 2.** Сдвиговое усилие без воздействия тепла на зону контакта

Внешняя температура, °C	Давление прижатия, кПа	Сдвиговое усилие, кН		
		Замер №1	Замер №2	Замер №3
-5	10	0,162	0,181	0,158
	20	0,189	0,187	0,198
	30	0,217	0,226	0,218
-15	10	0,285	0,335	0,310
	20	0,511	0,482	0,543
	30	0,702	0,669	0,760
-25	10	0,299	0,330	0,306
	20	0,474	0,462	0,483
	30	0,760	0,776	0,753

В общем виде регрессионная модель, которая описывает взаимодействие варьируемых факторов на изменение сдвигового усилия, имеет вид (1):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_3 + b_9x_2x_3 \quad (1)$$

В результате проведения экспериментального исследования, по получению значений сдвигового усилия грунтовой породы и имитатора ковша при воздействии тепла на зону контакта были получены следующие данные (табл. 3).

С использованием программных модулей выполнена обработка полученных данных и построены уравнения регрессии для каждой нагревательной пластины:

– пластина 12 В [1]:

$$Y_{12В} = 2,765 - 0,084x_1 + 1,348x_2 - 1,325x_3 - 0,006x_1^2 - 0,022x_2^2 + 0,079x_3^2 + 0,002x_1x_2 - 0,023x_1x_3 - 0,023x_2x_3 \quad (2)$$

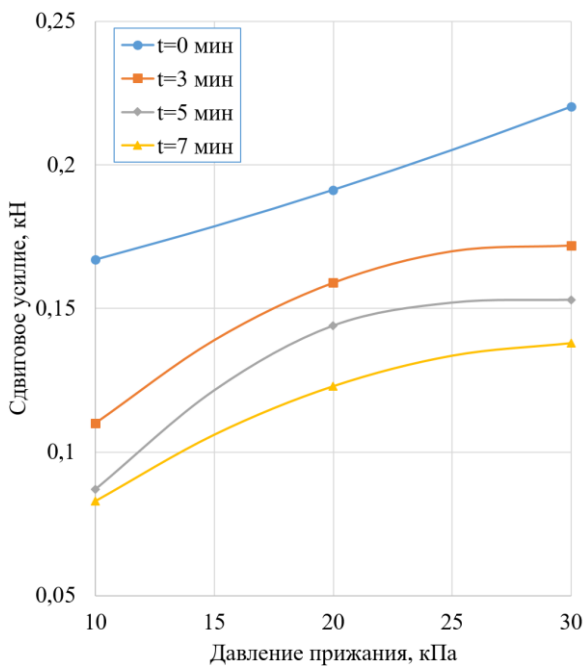
– пластина 220 В:

$$Y_{220В} = 7,440 + 0,513x_1 + 0,775x_2 - 0,774x_3 + 0,02x_1^2 - 0,014x_2^2 + 0,06x_3^2 - 0,005x_1x_2 + 0,0075x_1x_3 - 0,019x_2x_3 \quad (3)$$

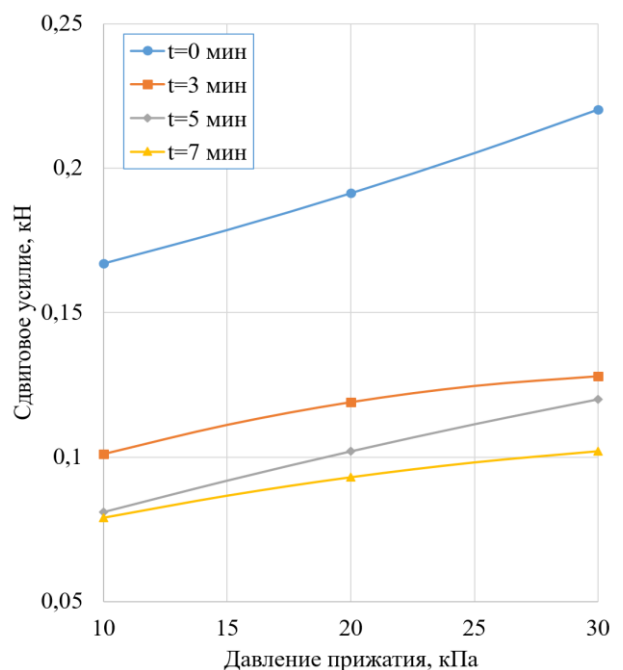
Для каждого рассмотренного нагревательного элемента построены графики зависимостей сдвигового усилия от давления прижатия при различной внешней температуре (рис. 5–10). Данные графики наглядно отражают эффективность применения нагревательных пластин при различном времени нагрева. По графикам (рис. 5–10) видно, что зависимость сдвигового усилия от давления прижатия без нагрева имитатора ковша носит прямо пропорциональный характер — чем больше давление прижатия, тем больше усилие сдвига.

**Таблица 3.** Результаты проведенного исследования

Внешняя температура, °C	Давление прижатия, кПа	Время нагрева, мин	Сдвиговое усилие, кН	
			12 В	220 В
-5	10	3	0,110	0,101
		5	0,087	0,081
		7	0,083	0,079
	20	3	0,159	0,119
		5	0,144	0,102
		7	0,123	0,093
	30	3	0,172	0,128
		5	0,153	0,120
		7	0,138	0,102
-15	10	3	0,103	0,087
		5	0,089	0,077
		7	0,085	0,066
	20	3	0,158	0,118
		5	0,151	0,095
		7	0,138	0,093
	30	3	0,192	0,129
		5	0,152	0,107
		7	0,137	0,100
-25	10	3	0,096	0,095
		5	0,089	0,094
		7	0,088	0,096
	20	3	0,150	0,175
		5	0,145	0,154
		7	0,133	0,119
	30	3	0,155	0,162
		5	0,140	0,140
		7	0,139	0,127



**Рис. 5.** Зависимость сдвигового усилия от давления прижатия при внешней температуре -5 °C (12 В)



**Рис. 6.** Зависимость сдвигового усилия от давления прижатия при внешней температуре -5 °C (220 В)

прижатия при внешней температуре  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (220 В)

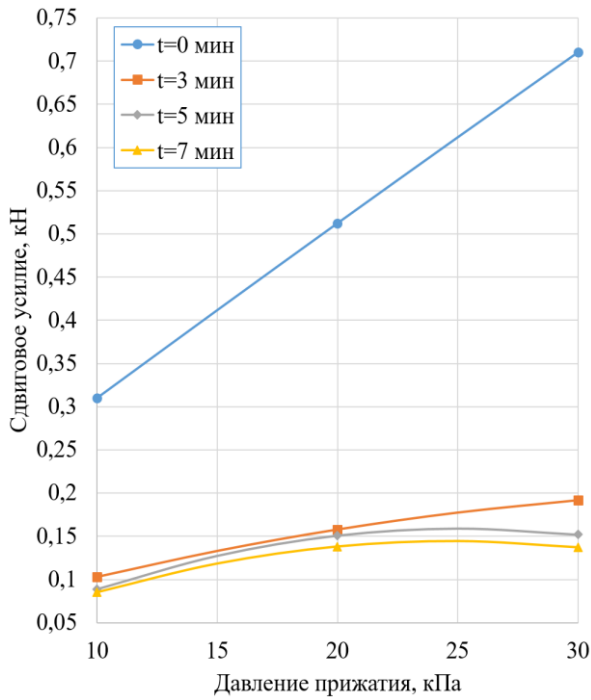


Рис. 7. Зависимость сдвигового усилия от давления прижатия при внешней температуре  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (12 В)

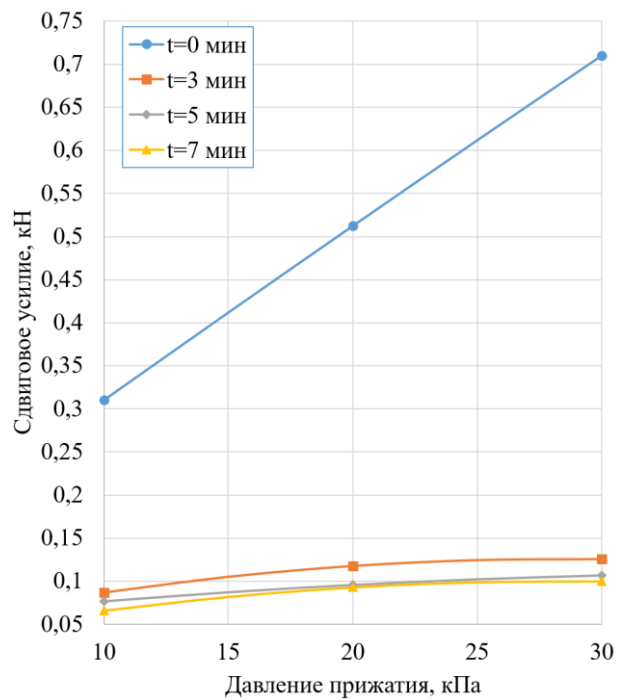


Рис. 8. Зависимость сдвигового усилия от давления прижатия при внешней температуре  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (220 В)

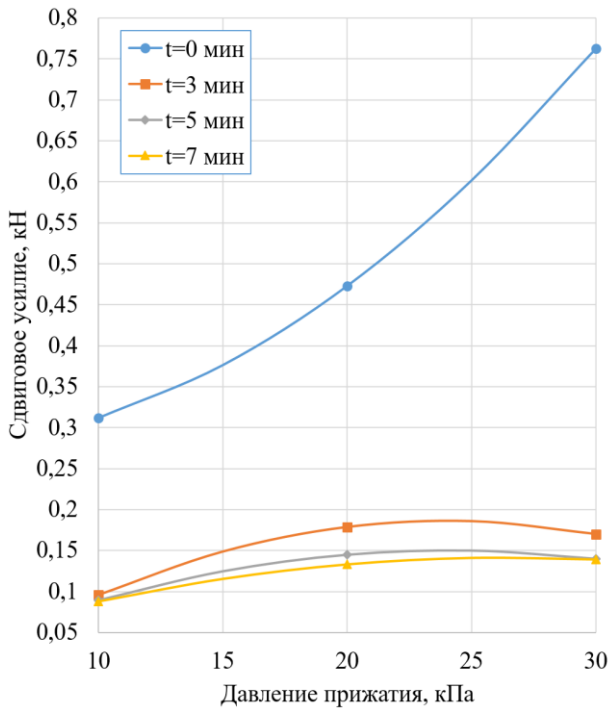


Рис. 9. Зависимость сдвигового усилия от давления прижатия при внешней температуре  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (12 В)

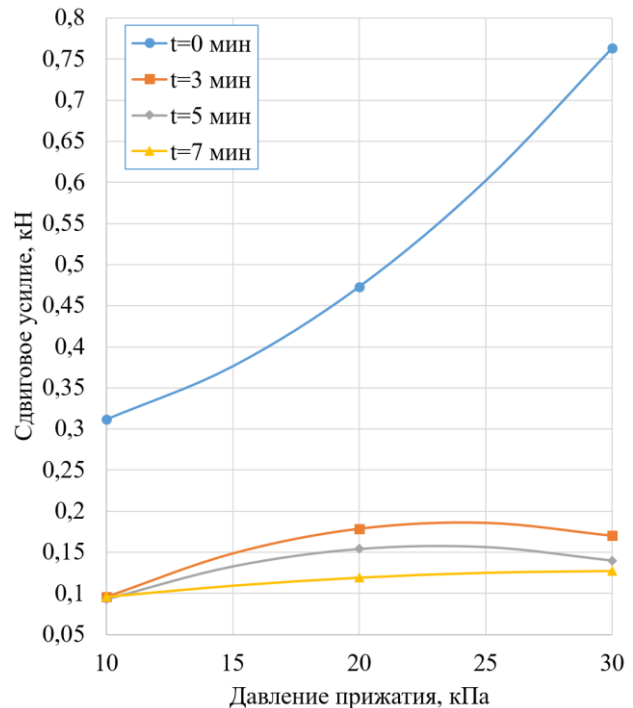


Рис. 10. Зависимость сдвигового усилия от давления прижатия при внешней температуре  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (220 В)

**Заключение.** По данным, полученным при проведении экспериментальных исследований, и по построенным по ним графикам видно, что применение силиконовых нагревательных пластин приводит к уменьшению усилия сдвига грунта. Действие адгезионных сил снижается за счет того, что цементационные связи льда исчезают (он тает под

тепловым воздействием). Стоит отметить, что продолжительность нагрева незначительно влияет на изменение усилия сдвига.

Так при использовании нагревателя от источника питания 220 В при внешней температуре  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  сдвиговое усилие уменьшается в 1,65...2,15 раза; при внешней температуре  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  — в 3,55...7,0 раза; а при



внешней температуре  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  — в 2,70...6,0 раза. При использовании нагревателя от источника питания 12 В при внешней температуре  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  сдвиговое усилие уменьшается в 1,21...2,0 раза; при внешней

температуре  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  — в 3,0...5,17 раза; при внешней температуре  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  — в 3,15...5,50 раза.

Полученные значения позволяют сделать вывод, что повышение напряжения питания незначительно влияет на снижение адгезии.

#### Литература

1. Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Бондалет И.С. Применение силиконовых нагревательных элементов при борьбе с намерзанием грунта к рабочим органам землеройных машин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: Наука и производство. 2022. № 15. С. 53-57.
2. Гибкие поясные и плоские силиконовые нагреватели [Электронный ресурс]. URL: <https://tvoy-nagrev.ru/catalog/gibkie-nagrevateli/gibkie-silikonovye-nagrevateli/> (дата обращения: 14.11.2022).
3. Зеньков С.А., Кобзов Д.Ю., Курмашев Е.В. Стенд сдвиговой: пат. на изобретение RUS 2460989 28.09.2010; заявл. 28.09.2010; опубл. 10.09.2012.
4. Заднепровский Р.П. Рабочие органы землеройных и мелиоративных машин и оборудования для разработки грунтов и материалов повышенной влажности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.
5. Buturovich I., Kim Han Duc. Calculation curved concentrators, Trudy LPI.1969. V. 309. 169 p.
6. Зеньков С.А., Игнатъев К.А., Филонов А.С. Эффективность гибких нагревательных элементов для борьбы с адгезией грунтов к землеройным машинам // Труды Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 134-137.
7. Tong J. Study on reducing adhesion and resistance of soil to soil engaging components of machinery for land locomotion by bionics. A Ph.D. Dissertation, Jilin University of Technology, Changchun, China (in Chinese), 1993.
8. Зеньков С.А., Игнатъев К.А., Филонов А.С., Банщиков М.С. Исследование влияния теплового воздействия на адгезию грунтов к рабочим органам землеройных машин // Механика XXI века. 2013. № 12. С. 228-232.
9. Зеньков С.А., Курмашев Е.В., Елохин А.В., Дэлэг Д. Перспективы применения гибких нагревательных ленточных элементов для снижения адгезии грунта к рабочим органам ковшового типа // Механика XXI века. 2009. № 8. С. 164-167.
10. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Зеньков С.А., Журавчук С.В. Сдвиговой стенд: пат. на изобретение Рос. Федерация. № 1310696. 12.12.1985; заявл. 12.12.1985; опубл. 15.05.1987.
11. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties // Journal of Terramechanics 36 (1999). P. 39-49.
12. Зеньков С.А., Кожевников А.С., Баев А.О., Дрюпин П.Ю. Определение мест установки электронагревательных гибких ленточных элементов для борьбы с намерзанием грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Труды Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 195-202.
13. Заднепровский Р.П. Теория трения скольжения. Волгоград: Ofset, 2005. 51 с.
14. Sharma V.K., Drew L.O., Nelson L. Transactions of the ASAE 20. 1977. P. 46-51.
15. Tong J., Ren L., Yan J., Ma Y., Chen B. 1999. Int. Agricultural Eng. J. 8. 1999. P. 1-22.
16. Wang X.L., Ito N., Kito K., Garcia P.P. 1998. J. of Terramech. 35. 1998. P. 87-101.
17. Wang X.L., Ito N., Kito K. Study on reducing soil adhesion to machines by vibration. In: Proceedings of the 12th International Conference of ISTVS, 7-10 October, 1996 (Yu Q; Qiu L, eds). 1996. P. 539-545. China Machine Press, Beijing, China.
18. Azadegan B., Massah J. Effect of temperature on adhesion of clay soil to steel // Cercetări Agronomice în Moldova. 2012. V. XLV. № 2 (150). P. 21-27.
19. Chen B., Liu D., Ning S., Cong Q. Research on the reducing adhesion and scouring of soil of lugs by using unsmoothed surface electro-osmosis method // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 1995. № 11 (3). P. 29-33.
20. Ignatyev K.A., Filonov A.S., Lkhanag D., Battseren I. Definitions of time from the surface soil breakout body work in a high impact // Scientific transactions. № 3/139. Ulaanbaatar, Mongolia, MUST. 2013. P. 144-146.
21. Ignatyev K.A., Filonov A.S., Zarubin D.A. Application of piezoceramic radiators for combating adhesion or soils to excavating part of an earthmoving machine. Science and Education: materials of the II international research and practice conference. Vol. 1. Munich, December 18th-19th. 2012 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg Munich Germany, 2012. P. 251-256.

#### References

1. Zen'kov S.A., Dryupin P.YU., Bondalet I.S. The use of silicone heating elements in the fight against soil freezing to the working bodies of earth-moving machines // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022. № 15. P. 53-57.
2. Flexible belt and flat silicone heaters [Elektronnyj resurs]. URL: <https://tvoy-nagrev.ru/catalog/gibkie-nagrevateli/gibkie-silikonovye-nagrevateli/> (data obrashcheniya: 14.11.2022).
3. Zen'kov S.A., Kobzov D.YU., Kurmashev E.V. Shift bench: pat. na izobretenie RUS 2460989 28.09.2010; zayavl. 28.09.2010; opubl. 10.09.2012.
4. 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.: Mashinostroenie, 1992. 176 p.
5. Buturovich I., Kim Han Duc. Calculation curved concentrators, Trudy LPI.1969. V. 309. 169 p.
6. Zen'kov S.A., Ignat'ev K.A., Filonov A.S. The effectiveness of flexible heating elements to combat soil adhesion to earthmoving machines // Trudy Bratskogo gos. un-ta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2013. V. 1. P. 134-137.
7. Tong J. Study on reducing adhesion and resistance of soil to soil engaging components of machinery for land locomotion by bionics. A Ph.D. Dissertation, Jilin University of Technology, Changchun, China (in Chinese), 1993.
8. Zen'kov S.A., Ignat'ev K.A., Filonov A.S., Banshchikov M.S. Investigation of the effect of thermal effects on soil adhesion to the working bodies of earth-moving machinery // Mekhani-

- ki XXI veku. 2013. № 12. P. 228-232.
9. Zen'kov S.A., Kurmashev E.V., Elohin A.V., Deleg D. Prospects for the use of flexible heating tape elements to reduce soil adhesion to bucket-type working bodies // *Mekhaniki XXI veku*. 2009. № 8. P. 164-167.
  10. Balovnev V.I., Bakatin YU.P., Zen'kov S.A., ZHurvachuk S.V. Shift stand: pat. na izobretenie Ros. Federaciya. № 1310696. 12.12.1985; zayavl. 12.12.1985; opubl. 15.05.1987.
  11. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties // *Journal of Terramechanics* 36 (1999). P. 39-49.
  12. Zen'kov S.A., Kozhevnikov A.S., Baev A.O., Dryupin P.YU. Determination of installation places for electric heating flexible tape elements to combat soil freezing to metal surfaces of working bodies of earthmoving machines // *Trudy Bratskogo gos. un-ta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2014. V. 1. P. 195-202.
  13. Zadneprovskij R.P. Theory of sliding friction. Volgograd: Ofset, 2005. 51 p.
  14. Sharma V.K., Drew L.O., Nelson L. Transactions of the ASAE 20. 1977. P. 46-51.
  15. Tong J., Ren L., Yan J., Ma Y., Chen B. 1999. *Int. Agricultural Eng. J.* 8. 1999. P. 1-22.
  16. Wang X.L., Ito N., Kito K., Garcia P.P. 1998. *J. of Terramech.* 35. 1998. P. 87-101.
  17. Wang X.L., Ito N., Kito K. Study on reducing soil adhesion to machines by vibration. In: *Proceedings of the 12th International Conference of ISTVS*, 7-10 October, 1996 (Yu Q; Qiu L, eds). 1996. P. 539-545. China Machine Press, Beijing, China.
  18. Azadegan B., Massah J. Effect of temperature on adhesion of clay soil to steel // *Cercetări Agronomice în Moldova*. 2012. V. XLV. № 2 (150). P. 21-27.
  19. Chen B., Liu D., Ning S., Cong Q. Research on the reducing adhesion and scouring of soil of lugs by using unsmoothed surface electro-osmosis method // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 1995. № 11 (3). P. 29-33.
  20. Ignatyev K.A., Filonov A.S., Lkhanag D., Battseren I. Definitions of time from the surface soil breakout body work in a high impact // *Scientific transactions*. № 3/139. Ulaanbaatar, Mongolia, MUST. 2013. P. 144-146.
  21. Ignatyev K.A., Filonov A.S., Zarubin D.A. Application of piezoceramic radiators for combating adhesion or soils to excavating part of an earthmoving machine. *Science and Education: materials of the II international research and practice conference*. Vol. 1. Munich, December 18th-19th. 2012 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg Munich Germany, 2012. P. 251-256.