

Исследование гибкого ленточного нагревательного элемента для снижения намерзания грунта

С.А. Зеньков^a, П.Ю. Дрюпин^b

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

^a amf@brstu.ru, ^b b760bf@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-4948-0223>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6122-9226>

Статья поступила 29.04.2020, принята 18.05.2020

Объектом исследования, которому посвящена статья, являются гибкие ленточные нагревательные элементы, обладающие свойством нагревателя со сложной конфигурацией, малым весом, минимальной толщиной и способностью изгибаться в различных плоскостях. Эти нагревательные элементы имеют широкое распространение в различных сферах промышленности, трубопроводном транспорте, приборостроении и применяются там, где требуются постоянство температуры в необходимом диапазоне, высокая надежность, малая площадь поперечного сечения, износостойкость, небольшая удельная стоимость и где гибкость является решающим фактором. В статье рассмотрен ленточный нагревательный элемент, лента углеродная нагревательная гибкая (ЛУНГ). Ее назначение — подогрев различного технологического оборудования, характеризующегося плоской поверхностью, сложностью геометрических форм. Кроме этого, ЛУНГ устанавливаются в качестве нагревательного элемента в разного рода тепловых устройствах. Представлены технические характеристики ленты и результаты экспериментальных исследований нагрева имитатора ковша при положительной и отрицательной температуре окружающей среды, построены температурно-временные характеристики ЛУНГ. Проведены исследования по воздействию нагрева имитатора ковша лентой ЛУНГ на усилие сдвига грунта. Увеличение влияния давления при воздействии нагрева имитатора ковша лентой ЛУНГ можно интерпретировать исчезновением цементационных связей льда (его таянием) под действием энергии нагрева и трансформации связанной воды в рыхлосвязанную и свободную. В экспериментах установлено усилие сдвига грунта с поверхности имитатора при тепловом воздействии в зоне контакта грунта с металлом.

Ключевые слова: гибкий нагревательный элемент; адгезия; связный грунт; напряжение сдвига.

Study of a flexible tape heating element to reduce soil freezing

S.A. Zenkov^a, P.Yu. Dryupin^b

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

^a amf@brstu.ru, ^b b760bf@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-4948-0223>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6122-9226>

Received 29.04.2020, accepted 18.05.2020.

In this work, the object of study is flexible tape heating elements that have the property of a heater with a complex configuration, low weight, minimal thickness, and the ability to bend in various planes. These heating elements are widespread in various industries, such as pipeline transport and instrument making industry. They are also used where constant temperature in the required range, high reliability, small cross-sectional area, wear resistance, low unit cost are needed and where flexibility is a decisive factor. The article considers a tape heating element — carbon flexible heating tape (CFHT). Its purpose is the heating of various technological devices, which are characterized by a flat surface and complexity of geometric shapes. In addition, CFHT is installed as a heating element in various kinds of thermal equipment. Its technical characteristics and the results of experimental studies of heating the bucket simulator at positive and negative ambient temperatures are presented, and the temperature-time characteristics of the CFHT are determined. Studies have been conducted on the effect of heating a ladle simulator with a CFHT on the soil shear force. The increase in the effect of pressure under the influence of heating the ladle simulator with a CFHT can be interpreted as the disappearance of the cementation bonds of ice (its melting) under the influence of heating energy and the transformation of bound water into loose and friable. In the experiments, the shear force of the soil from the surface of the simulator was established under thermal influence in the zone of contact of the soil with the metal.

Keywords: flexible heating element; adhesion; cohesive soil; shear stress.

Введение. Гибкие ленточные нагревательные элементы наиболее востребованы там, где необходим нагреватель со сложной конфигурацией, малым весом, минимальной толщиной и способностью изгибаться в различных плоскостях. Эти нагревательные элементы имеют широкое распространение в различных сферах промышленности, трубопроводном транспорте, приборостроении. Они применяются там, где требуются постоянство температуры в необходимом диапазоне, высокая надежность, малая площадь поперечного сечения, износостойкость, небольшая удельная стоимость и где гибкость является решающим фактором [1–21].

Методы исследования. В качестве нагревательного элемента использовалась лента углеродная нагревательная гибкая (ЛУНГ).

Методы исследования. В качестве нагревательного элемента использовалась лента углеродная нагревательная гибкая (ЛУНГ).

тельная гибкая (ЛУНГ). Ее назначение — подогрев различного технологического оборудования, характеризующегося плоской поверхностью, сложностью геометрических форм. Кроме этого ЛУНГ устанавливают в качестве нагревательного элемента в разного рода тепловых устройствах. Лента ЛУНГ (рис. 1) состоит из нагревательного элемента, изготовленного из волокнистой углеродной ткани. Она помещена в электроизоляционный чехол, изготовленный из стеклоткани со слоем силиконового материала. К нагревательному элементу прикреплены низкотемпературные выводы, которые изготовлены из медного провода в термостойкой изоляции. Они служат для подсоединения ленты к системе электропитания. Нагревательный элемент и концевые заделки защищены герметиком от воздействия внешней среды [8].

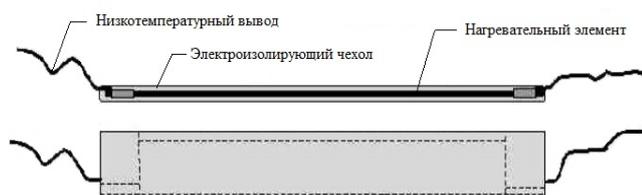


Рис. 1. Лента углеродная нагревательная гибкая (ЛУНГ)

В табл. 1 представлены технические характеристики ленты ЛУНГ.

Таблица 1. Технические характеристики ЛУНГ

Номинальная мощность, Вт	750
Удельная мощность, Вт/м	150
Номинальное напряжение питания, В	220
Температура поверхности, °С	250
Длина, мм	5 000
Ширина, мм	60
Толщина активной части, мм	Не более 1
Толщина в зоне контактов, мм	Не более 4

Произведен нагрев имитатора рабочего органа лентой ЛУНГ при температуре окружающей среды +20 и –15 °С. Нагрев металлической пластины продолжался 10 мин. Значения температуры поверхности показаны в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость нагрева имитатора ковша от продолжительности нагрева

Показатель	Температура нагрева ленты в зависимости от продолжительности нагрева, °С				
	2	4	6	8	10
При температуре окружающей среды t = +20 °С	27	38	46	53	60
При температуре окружающей среды t = –15 °С	12	21	29	35	40

Математическая обработка экспериментальных данных для однофакторных зависимостей выполнена

при помощи программы MODEL. Уравнения регрессии описывались функцией $y = C_0 + C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^2$.

Получены следующие уравнения регрессии:

– при температуре окружающей среды t = +20 °С:

$$y = 17,4333 + 5,2833 \cdot x - 0,0985 \cdot x^2; \quad (1)$$

– при температуре окружающей среды t = –15 °С:

$$y = 1,4167 + 5,7492 \cdot x - 0,1932 \cdot x^2. \quad (2)$$

На рис. 2 представлена температурно-временная характеристика нагрева имитатора ковша лентой ЛУНГ, выполненная в программе Microsoft Excel. Как видно на графике, одной минуты достаточно, чтобы нагреть поверхность имитатора до температуры +7 °С при температуре окружающей среды –15 °С.

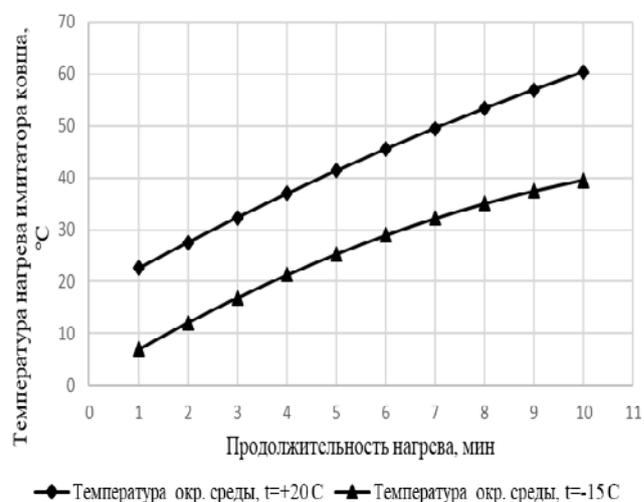


Рис. 2. Зависимость нагрева имитатора ковша от продолжительности нагрева

На специальном сдвиговом стенде [9; 10] был проведен эксперимент по определению усилия сдвига при нагревании поверхности контакта лентой ЛУНГ. Испытания проводились при постоянных параметрах: температура окружающей среды (–15 °С), продолжительность контакта грунта с металлом (10,5 мин), весовая влажность грунта (12,5 %), дисперсность грунта ($7 \cdot 10^{-3}$ мм). Переменными параметрами являлись номинальное давление на грунт и продолжительность нагрева. Результаты эксперимента приведены в табл. 3.

В программе Microsoft Excel построены зависимости усилия сдвига от номинального давления на грунт (см. рис. 3) и усилия сдвига от продолжительности нагрева имитатора ковша (см. рис. 4). Зависимость усилия сдвига от давления прижатия носит прямолинейный характер и с ростом давления увеличивается примерно в три раза в исследованном диапазоне изменения факторов. Нагрев снижает усилие сдвига в 2,8...6,9 раз. Продолжительность нагрева при одном и том же давлении прижатия не оказывает существенного влияния на усилие сдвига. С увеличением продолжительности нагрева с 3 до 7 мин усилие сдвига уменьшается в 1,3...1,8 раза.

Таблица 3. Результаты измерения усилия сдвига при номинальном давлении на грунт 10, 20 и 30 кПа

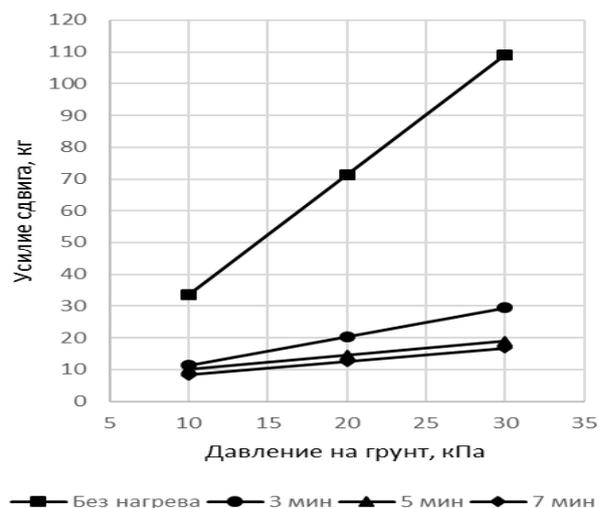
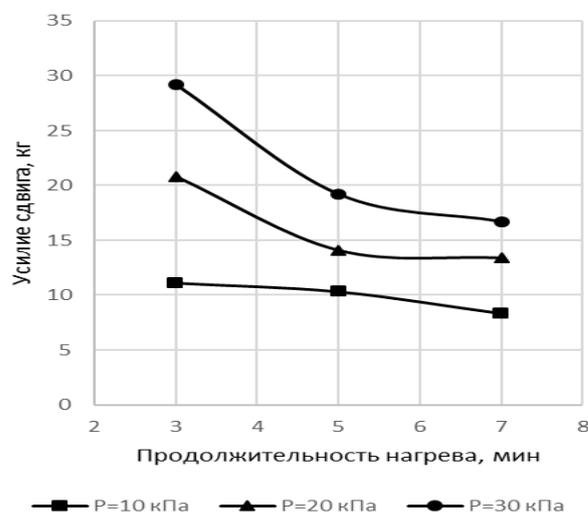
Продолжительность нагрева, мин	Результаты замеров			Среднее усилие с тепловым воздействием, кг
	1-й замер	2-й замер	3-й замер	
Номинальное давление на грунт 10 кПа				
Без нагрева	36,2	42,5	40,1	39,6
3	10,2	11,7	11,3	11,1
5	9,9	10,3	10,7	10,3
7	9,2	8,8	6,1	8,3
Номинальное давление на грунт 20 кПа				
Без нагрева	60,3	57,4	59,2	58,9
3	20,7	22,1	19,7	20,8
5	14,2	14,5	13,7	14,1
7	13,8	13,1	13,4	13,4
Номинальное давление на грунт 30 кПа				
Без нагрева	102,5	130,8	112,3	115,2
3	28,0	29,2	30,3	29,2
5	19,5	19,2	18,8	19,2
7	17,1	16,7	16,2	16,7

Увеличение влияния давления при воздействии нагрева имитатора ковша лентой ЛУНГ можно интерпретировать исчезновением цементационных связей льда (его таянием) под действием энергии нагрева и трансформацией связанной воды в рыхлосвязанную и свободную. В экспериментах установлено усилие сдвига грунта с поверхности имитатора при тепловом воздействии в зоне контакта грунта с металлом.

Выводы. На основе проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что при использовании нагревательной ленты ЛУНГ усилие сдвига уменьшается в 2,8...6,9 раза. Максимальное снижение усилия сдвига зафиксировано при номинальном давлении на грунт 30 кПа и продолжительности нагрева 7 мин, оно уменьшилось на 85,5 %.

Литература

1. Заднепровский Р.П. Рабочие органы землеройных и мелиоративных машин и оборудования для разработки грунтов и материалов повышенной влажности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.
2. Зеньков С.А., Кожевников А.С., Кутимский Г.М. Использование электронагревательных гибких ленточных элементов для борьбы с намерзанием грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Механики XXI века. 2014. № 13. С. 156–160.
3. Buturovich I, Kim Han Duc. Calculation curved concentrators, Trudy LPI, Vol. 309, 1969, 169 p.
4. Зеньков С.А., Игнатьев 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.
5. 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.
6. Зеньков С.А., Игнатьев К.А., Филонов А.С., Банщиков М.С. Исследование влияния теплового воздействия на

**Рис. 3.** График зависимости усилия сдвига от номинального давления на грунт при использовании ленты ЛУНГ**Рис. 4.** График зависимости усилия сдвига от продолжительности нагрева имитатора ковша лентой ЛУНГ

- адгезию грунтов к рабочим органам землеройных машин // Механики XXI века. 2013. № 12. С. 228-232.
7. Зеньков С.А., Курмашев Е.В., Елохин А.В., Дэлэг Д. Перспективы применения гибких нагревательных ленточных элементов для снижения адгезии грунта к рабочим органам ковшевого типа // Механики XXI века. 2009. № 8. С. 164–167.
 8. Лента углеродная нагревательная гибкая: технические характеристики и предназначение [Электронный ресурс]. URL: <http://elkadm.ru/?page=4.html> (дата обращения: 10.05.2020).
 9. Зеньков С.А., Кобзов Д.Ю., Курмашев Е.В. Стенд сдвиговый: пат. на изобретение Рос. Федерация. № 2460989. 28.09.2010
 10. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Зеньков С.А., Журавчук С.В. Сдвиговой стенд: пат. на изобретение Рос. Федерация. № 1310696. 12.12.1985.
 9. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties // Journal of Terramechanics 36 (1999). P. 39–49.
 10. 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.
11. Заднепровский Р.П. Теория трения скольжения. Волгоград: Ofset. 2005. 51 с.
 12. Sharma V.K., Drew L.O., Nelson L. Transactions of the ASAE 20. 1977. P. 46–51.
 13. Tong J., Ren L., Yan J., Ma Y. and Chen B. 1999. Int. Agricultural Eng. J.8. 1999. P. 1–22.
 14. Wang X.L., Ito N., Kito K. and Garcia P.P. 1998. J. of Terramech.35. 1998. P. 87–101.
 15. 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.
 16. Azadegan B., Massah J. Effect of temperature on adhesion of clay soil to steel // Cercetări Agronomice în Moldova. Vol. XLV. 2012. № 2 (150). P. 21–27.
 17. 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, № 11 (3). 1995. P. 29–33.
 18. 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.
 19. 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.
 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.
 5. 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.
 6. Zen'kov S.A., Ignat'ev K.A., Filonov A.S., Bانشchikov M.S. Investigation of the effect of thermal effects on soil adhesion to the working bodies of earth-moving machinery // Mekhaniki XXI veku. 2013. № 12. P. 228–232.
 7. 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.
 8. Flexible carbon heating tape: technical specifications and purpose [Elektronnyj resurs]. URL: <http://elkadm.ru/?page=4.html> (дата обращения: 10.05.2020).
 9. Zen'kov S.A., Kobzov D.YU., Kurmashev E.V. Shift bench: patent № 2460989. 28.09.2010.
 10. Balovnev V.I., Bakatin YU.P., Zen'kov S.A., ZHuravchuk S.V. Shift stand: patent № 1310696. 12.12.1985.
 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. Zаднепровский Р.П. 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. and Chen B. 1999. Int. Agricultural Eng. J.8. 1999. P. 1–22.
 16. Wang X.L., Ito N., Kito K. and 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. Vol. XLV. 2012. № 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, № 11 (3). 1995. 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.

Reference

1. Zаднепровский Р.П. 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.
2. Zen'kov S.A., Kozhevnikov A.S., Kutimskij G.M. The use of electric heating flexible tape elements to combat freezing of the soil to the metal surfaces of the working bodies of earth-moving machines // Mekhaniki XXI veku. 2014. № 13. P. 156–160.
3. Buturovich I, Kim Han Duc. Calculation curved concentrators, Trudy LPI, Vol. 309, 1969, 169 p.
4. Zen'kov S.A., Ignat'ev K.A., Filonov A.S. The effectiveness of flexible heating elements to combat soil adhesion to earth-moving machines // Trudy Bratskogo gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki. 2013. V. 1. P. 134–137.
5. 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.
6. Zen'kov S.A., Ignat'ev K.A., Filonov A.S., Bانشchikov M.S. Investigation of the effect of thermal effects on soil adhesion to the working bodies of earth-moving machinery // Mekhaniki XXI veku. 2013. № 12. P. 228–232.
7. 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.
8. Flexible carbon heating tape: technical specifications and purpose [Elektronnyj resurs]. URL: <http://elkadm.ru/?page=4.html> (дата обращения: 10.05.2020).
9. Zen'kov S.A., Kobzov D.YU., Kurmashev E.V. Shift bench: patent № 2460989. 28.09.2010.
10. Balovnev V.I., Bakatin YU.P., Zen'kov S.A., ZHuravchuk S.V. Shift stand: patent № 1310696. 12.12.1985.
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. Zаднепровский Р.П. 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. and Chen B. 1999. Int. Agricultural Eng. J.8. 1999. P. 1–22.
16. Wang X.L., Ito N., Kito K. and 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. Vol. XLV. 2012. № 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, № 11 (3). 1995. 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.