

Определение оптимальной температуры поверхности контакта для борьбы с намерзанием грунтов к рабочим органам землеройных машин

С.А. Зеньков^a, П.Ю. Дрюпин^b

Братский государственный университет, Макаренко, 40, Братск, Россия

^a mf@brstu.ru, ^b 760bf@mail.ru

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

Статья поступила 31.05.2021, принята 22.09.2021

Представлены результаты проведенного экспериментального исследования по определению зависимости между температурой поверхности контакта имитатора ковша и усилием сдвига грунта. Данный эксперимент проводился на специальном сдвиговом стенде. В качестве нагревательного элемента использовалась лента углеродная нагревательная гибкая (ЛУНГ). Сфера применения ЛУНГ включает обогрев трубопроводов для перекачки битума; разогрев мазутопроводов и регулирование температуры мазута перед горелками котлов в котельных и ТЭЦ; обогрев поверхностей (строительной опалубки, сушильных камер) и др. Представлена техническая характеристика ленты. В эксперименте установлена зависимость усилия сдвига грунта металлической поверхностью имитатора ковша от различных температур поверхности контакта. Эксперимент проводился при различных показателях номинального давления на грунт. На основе результатов экспериментального исследования построены однофакторные уравнения регрессии, а также зависимости усилия сдвига грунта от температуры поверхности контакта. Определены оптимальные значения температуры поверхности контакта для достижения минимального усилия сдвига грунта. Данные параметры температуры могут быть использованы для определения конструктивных характеристик тепловых устройств, применяемых для обогрева рабочих органов землеройных машин.

Ключевые слова: напряжение сдвига; адгезия; тепловое воздействие; гибкий нагревательный элемент.

Definition of the optimal temperature of the contact surface to combat soil freezing to the working bodies of earth-moving machines

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

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

^a mf@brstu.ru, ^b 760bf@mail.ru

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

Received 31.05.2021, accepted 22.09.2021

This paper presents the results of an experimental study to determine the dependence of the temperature of the contact surface of the bucket simulator and the shear force of the soil. This experiment was carried out on a special shear stand, and a flexible carbon heating tape was used as a heating element (LUNG). Scope of application of the LUNG tape: heating of pipelines for pumping bitumen; heating of fuel oil pipelines and regulation of the temperature of fuel oil in front of boiler burners in boiler houses and thermal power plants; heating of surfaces (construction formwork, drying chambers), etc. The technical characteristics of the tape are presented. The experiment established the dependence of the shear force of the soil with the metal surface of the bucket simulator, at different temperatures of the contact surface. This experiment was carried out at various rates of nominal ground pressure. The results of an experimental study are presented and, based on the data obtained, one-factor regression equations are constructed, the dependences of the soil shear force on the temperature of the contact surface are constructed. The optimal values of the temperature of the contact surface have been determined to achieve the minimum soil shear force. These temperature parameters can be used to determine the design characteristics of thermal devices used to heat the working bodies of earth-moving machines.

Keywords: shear stress; adhesion; thermal effect; flexible heating element.

Введение. Разработка влажных связных грунтов при отрицательных температурах сопровождается намерзанием грунта на поверхности рабочих органов землеройных машин. Намерзание грунта происходит за счет твердения жидкой фазы (воды), содержащейся во влажных грунтах, что приводит к увеличению сил сцепления. Намерзший грунт в значительной степени снижает про-

изводительность землеройных машин из-за уменьшения полезного объема ковша, увеличения лобового сопротивления при копании и увеличения времени простоя машин, требуемого для очистки ковша [1–21].

Существуют различные способы борьбы с намерзанием и налипанием грунта на рабочие органы землеройных машин при их эксплуатации в условиях отри-

цательных температур. Эти способы можно разделить на четыре группы: образование промежуточного слоя на границе контакта; внешнее воздействие (например, тепловое) на рабочий орган в зоне контакта; конструкторско-технологический способ; комбинирование двух и более перечисленных способов.

Тепловое воздействие является одним из наиболее эффективных методов снижения адгезии при отрицательных температурах [2–7]. Для устранения адгезии применяют нагревательные элементы. Гибкие нагреватели представляют собой тонкий нагревательный элемент, обладающий большой гибкостью и изготовленный с применением новейших электронных материалов.

Такие элементы могут использоваться для передачи тепла на объект практически любой формы и конфигурации. Благодаря плоской форме, гибкий нагревательный элемент может быть изготовлен таким образом, чтобы обеспечить отсутствие тепла, в определенных местах нагреваемой конструкции повторяя форму площади, предназначенной для нагрева, и не расходовать тепло на ту часть, которую обогревать не нужно.

Целью настоящих исследований является определение оптимальных значений температуры поверхности контакта грунта с имитатором ковша, при которых достигается наибольшее снижение адгезии.

Методика исследования. Для снижения адгезионных связей применяется метод внешнего, а именно теплового воздействия [2–7].

Нагревательным элементом выступала лента углеродная нагревательная гибкая (ЛУНГ) (рис. 1), которая содержит нагревательный элемент, изготовленный из углеродной ленты, а также защитное электроизоляционное покрытие, состоящее из фторопластовой пленки и стеклоткани с силиконовым покрытием. Низкотемпературные выводы, соединенные с нагревательным элементом, служат для подключения питающего напряжения. Нагревательный элемент и концевые заделки герметизированы для защиты от воздействия внешней среды. Сфера применения ЛУНГ включает обогрев трубопроводов для перекачки битума; разогрев мазутопроводов и регулирование температуры мазута перед горелками котлов в котельных и ТЭЦ; обогрев поверхностей (строительной опалубки, сушильных камер); встраивание в жесткие кожухи для получения конвективных обогревателей помещений; использование в калориферах, воздуховодах для нагрева потока воздуха с минимальным аэродинамическим сопротивлением и безынерционностью нагрева [8].

Техническая характеристика ленты представлена в табл. 1.



Рис. 1. Лента углеродная нагревательная гибкая (ЛУНГ)

Таблица 1. Техническая характеристика ЛУНГ

Мощность номинальная	750 Вт
Мощность удельная	150 Вт/м
Напряжение питания	220 В
Температура на активной части	250 °С
Длина активной части	5 000 мм
Ширина активной части	60 мм
Толщина активной части	4 мм

Экспериментальное исследование по определению усилия сдвига грунта при различной температуре поверхности контакта (рис. 2) проводилось на специальном сдвиговом стенде (рис. 3) [9; 10]. Для проведения эксперимента были зафиксированы значения некоторых факторов: температура окружающей среды $T = -15\text{ °C}$; дисперсность грунта $D = 7 \cdot 10^{-3}\text{ мм}$; продолжительность контакта грунта с металлом $t = 10\text{ мин}$; весовая влажность грунта $W = 12,5\%$. Варьируемым фактором являлась температура поверхности контакта (T_K). Данный фактор варьируется на пяти уровнях с интервалом варьирования 5 °C . Данный эксперимент проводился при трех показателях номинального давления на грунт $P = 10; 20\text{ и }30\text{ кПа}$. Во избежание ошибки проводилось по три замера. Отклик эксперимента представлен в табл. 2.



Рис. 2. Имитатор ковша (поверхность контакта)



Рис. 3. Экспериментальный сдвиговой стенд

Таблица 2. Отклик эксперимента

Температура поверхности контакта (T_k), °C	Усилие сдвига, кг		
	1-й замер	2-й замер	3-й замер
Номинальное давление на грунт $P = 10 \text{ кПа}$			
-5	37.7	25.4	27.0
0	14.1	15.4	13.3
+5	12.3	13.5	14.8
+10	10.8	13.4	12.7
+15	13.9	13.1	13.3
Номинальное давление на грунт $P = 20 \text{ кПа}$			
-5	36.1	34.7	28.4
0	22.8	21.4	22.1
+5	16.5	19.1	17.7
+10	15.2	15.9	15.5
+15	16.2	17.1	16.8
Номинальное давление на грунт $P = 30 \text{ кПа}$			
-5	35.6	35.8	34.9
0	22.1	23.7	22.8
+5	18.9	20.1	19.4
+10	16.9	19.8	18.2
+15	23.9	19.2	21.3

В результате математической обработки результатов эксперимента получены однофакторные уравнения регрессии. Для обработки результатов эксперимента использовалась квадратичная модель, которая имеет вид: $y = C_0 + C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^2$.

При давлении на грунт $P = 10 \text{ кПа}$:

$$y = 17,8511 - 1,6545 \cdot x + 0,0951 \cdot x^2; \quad (1)$$

При давлении на грунт $P = 20 \text{ кПа}$:

$$y = 23,0814 - 1,5396 \cdot x + 0,0753 \cdot x^2; \quad (2)$$

При давлении на грунт $P = 30 \text{ кПа}$:

$$y = 24,3506 - 1,6124 \cdot x + 0,0963 \cdot x^2; \quad (3)$$

По полученным уравнениям регрессии строятся зависимости усилия сдвига от температуры поверхности сдвига (рис. 4).

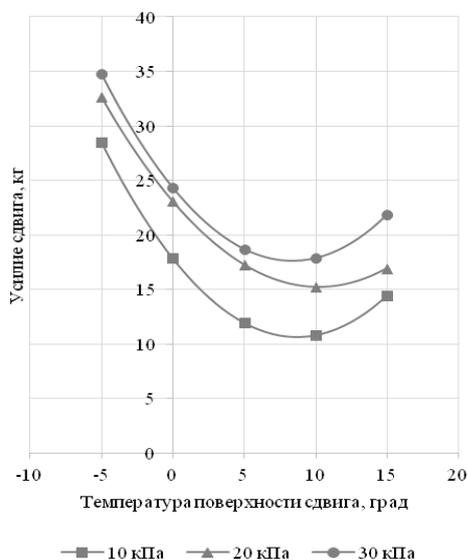


Рис. 4. Зависимости усилия сдвига от температуры поверхности сдвига

Заключение. Произведя математическую обработку полученных уравнений регрессии и проанализировав полученные зависимости усилия сдвига от температуры поверхности нагрева, можно сделать вывод, что минимальное усилие сдвига при номинальном давлении на грунт $P = 10 \text{ кПа}$ достигается при температуре поверхности контакта $T_k = 8,7 \text{ °C}$; при номинальном давлении на грунт $P = 20 \text{ кПа}$ при температуре поверхности контакта $T_k = 10,2 \text{ °C}$; при номинальном давлении на грунт $P = 30 \text{ кПа}$ при температуре поверхности контакта $T_k = 8,4 \text{ °C}$. Таким образом, наименьшие значения усилия сдвига достигаются при температуре поверхности контакта в диапазоне $8,4 \dots 10,2 \text{ °C}$.

Данные параметры температуры могут быть использованы для определения конструктивных характеристик тепловых устройств, применяемых для обогрева рабочих органов землеройных машин.

На рис. 5 представлен вариант возможного расположения ленточного нагревательного элемента на ковше экскаватора.

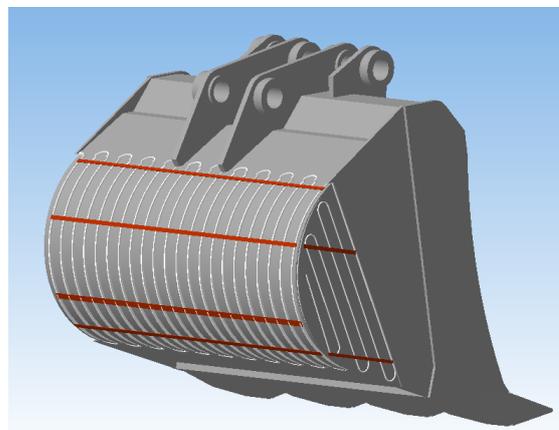


Рис. 5. Ковш экскаватора с ленточным нагревательным элементом

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 // Механика XXI века. 2014. № 13. С. 156-160.
3. Buturovich I., Kim Han Duc. Calculation curved concentrators, Trudy LPI. 1969. V. 309. 169 p.
4. Зеньков С.А., Игнатьев К.А., Филонов А.С. Эффективность гибких нагревательных элементов для борьбы с адгезией грунтов к землеройным машинам // Тр. 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 адгезию грунтов к рабочим органам землеройных машин // Механика 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 ковшового типа // Механика 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 сдвиговой: пат. на изобретение Рос. Федерация. № 2460989; заяв. 28.09.2010; опубл. 09.10.2012.
10. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Зеньков С.А., Журавчук С.В. Сдвиговой стенд: пат. на изобретение Рос. Федерация. № 1310696; заяв. 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. 1999. № 36. 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 // Тр. 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. 1998. 35. 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.). 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 of soils to excavating part of an earthmoving machine. Science and Education: materials of the II international research and practice conference. V. 1. Munich, December 18th-19th. 2012 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg Munich Germany. 2012. P. 251-256.

References

1. 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.
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 earthmoving machines // Mekhaniki XXI veku. 2014. № 13. P. 156-160.
3. Buturovich I., Kim Han Duc. Calculation curved concentrators. Trudy LPI. 1969. V. 309. 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 earthmoving machines // Tr. 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., Banshchikov 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> (data obrashcheniya: 10.05.2020).
9. Zen'kov S.A., Kobzov D.YU., Kurmashev E.V. Shift bench: pat. na izobretenie Ros. Federaciya. № 2460989; yayav. 28.09.2010; opubl. 09.10.2012.
10. Balovnev V.I., Bakatin YU.P., Zen'kov S.A., ZHurvachuk S.V. Shift stand: pat. na izobretenie Ros. Federaciya. № 1310696; yayav. 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. 1999. № 36. 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 // Tr. 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. 1998. 35. 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.). 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. V. 1. Munich, December 18th-19th. 2012 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg Munich Germany. 2012. P. 251-256.