

Исследование теплового воздействия на адгезию грунтов к землеройным машинам от разных источников питания

С.А. Зеньков^a, П.Ю. Дрюпин^b, С.Н. Медведев, П.Д. Быков

Братский государственный университет, ул. 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 25.08.2025, принята 27.10.2025

Проведение земляных работ, а именно землеройных, на влажных связных грунтах затруднено физическими свойствами грунтов. Данная категория грунтов обладает свойством налипания на контактирующую поверхность. В связи с этим ковшовые рабочие органы уменьшают свой полезный объем, из-за чего у землеройных машин снижается производительность, так как увеличивается время простоя машины. При отрицательной температуре окружающей среды данное явление происходит более интенсивно, а возникающие адгезионные силы возрастают в несколько раз. Для борьбы с этим явлением наиболее эффективно тепловое воздействие на зону контакта. Однако в настоящее время, в условиях выполнения землеройных работ, самый распространенный способ обогрева ковша – это его обогрев на открытом огне. Данный способ из-за резкого перепада температур оказывает негативное воздействие на металл, вызывая повышенные напряжения и деформации, которые приводят к снижению прочности металла и трещинам. В данной работе рассмотрен гибкий пластинчатый силиконовый нагревательный элемент в качестве источника теплового излучения. В отличие от открытого огня, данные нагревательные элементы нагревают металл постепенно, не допуская перечисленных негативных воздействий. Рассмотрены три варианта исполнения данных нагревателей: от источника питания 12, 24 и 220 В. На лабораторной установке произведено экспериментальное исследование по определению эффективности рассмотренных нагревателей согласно схеме полного факторного эксперимента. По полученным данным проведен сравнительный анализ данных пластин и сделаны выводы об их эффективности.

Ключевые слова: адгезия грунтов; нагревательный элемент; связный грунт; сдвиговое усилие; примерзание грунта.

Study of thermal effects on soil adhesion to earthmoving machines from different power sources

S.A. Zenkov^a, P.Yu. Dryupin^b, S.N. Medvedev, P.D. Bykov

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 25.08.2025, accepted 27.10.2025

Carrying out excavation work, namely earthmoving, on wet cohesive soils is complicated by the physical properties of the soils. This category of soils has the property of sticking to the contact surface. In this regard, the bucket working bodies reduce their useful volume, due to which the productivity of earthmoving machines decreases, since the downtime of the machine increases. At negative ambient temperatures, this phenomenon occurs more intensely, and the resulting adhesive forces increase several times. To combat this phenomenon, the most effective is thermal action on the contact zone. However, at present, in the conditions of excavation work, the most common way to heat the bucket is to heat it over an open fire. This method, due to a sharp temperature drop, has a negative effect on the metal, causing increased stresses and deformations, which lead to a decrease in the strength of the metal and cracks. In this paper, a flexible plate silicone heating element is considered as a source of thermal radiation. Unlike open fire, these heating elements heat the metal gradually, preventing the listed negative effects. Three versions of these heaters are considered: from a power source of 12, 24 and 220 V. An experimental study is carried out on a laboratory setup to determine the efficiency of the adopted heaters, according to the scheme of a full factorial experiment. Based on the data obtained, a comparative analysis of these plates is performed and conclusions are made about their efficiency.

Keywords: soil adhesion; heating element; cohesive soil; shear force; soil freezing.

Введение. По своим физическим свойствам влажный связный грунт обладает способностью к своему прилипанию на контактирующую поверхность. Данная особенность грунтов приводит к затруднению выполнения земляных работ в рамках строительства. А так как значительная часть территории России расположена

в климатических зонах с продолжительной суровой зимой, и строительные работы, в том числе и земляные, при этом не заканчиваются, прилипший грунт примерзает к рабочей поверхности.

Как известно из [1–10, 14–20] при проведении земляных работ землеройными машинами в летний/осенний

период налипший грунтовый массив уменьшает полезный объём ковша на 12...18 % спустя 40 минут от начала выполнения работ. В зимний период при такой же продолжительности работ полезный объём ковша сокращается на 30...45 % (рис. 1).

Также стоит отметить, что адгезионные силы примерзшего грунта в несколько раз выше, чем прилипшего [1, 3, 5]. Данная закономерность затрудняет выполнение земляных работ при отрицательной температуре окружающей среды тем, что простой машины, необходимый для очистки ковша, значительно увеличивается.



Рис. 1. Ковш экскаватора с примерзшим к нему грунтом

Существует большое количество методов снижения адгезии грунтов (применяемых на практике и теоретических). По способу воздействия на зону контакта, данные методы можно разделить на четыре большие группы:

– I группа – методы, которые разграничивают грунтовую массу и поверхность рабочего органа, т. е. создающие промежуточный слой на границе контакта. Этот слой может представлять из себя твёрдое покрытие, жидкостный или газовый слой;

– II группа – методы, которые воздействуют на зону контакта со стороны, т. е. методы, оказывающие внешнее (интенсифицирующее) воздействие. Оно может быть вибрационное (способствует разрушению адгезионных

связей, снижает коэффициент трения и приводит к тиксотропным превращениям контактного слоя и связанным с этим трансформациям грунтовой влаги), тепловое (чаще всего используется для снижения примерзания, повышение температуры сказывается в изменении энергии структурных связей воды), ультразвуковое и др.;

– III группа – методы, которые направлены на изменение конструкции рабочего органа, т. е. конструкторско-технические методы. Суть данных методов заключается в определении и подборе оптимальных геометрических параметров рабочих органов, таких как: площадь рабочей поверхности, геометрические углы и др.;

– IV группа – методы, которые сочетают в себе два и более способа для снижения адгезии, т. е. комбинированные методы. Данные методы являются более универсальными, так как включают в себя комбинации физических воздействий на грунт и зону контакта.

Постановка и решение задачи. Для снижения сил адгезии при примерзании грунта к рабочей поверхности одним из эффективных методов является внешнее тепловое воздействие на зону контакта. Однако, как показывает практика, в большинстве случаев источником тепла выступает открытый огонь. Воздействие открытого огня на рабочие органы землеройной машины оказывает негативное влияние на металл, из которого изготовлены рабочие органы. Из-за резкого перепада температуры в структуре металла происходят повышенные напряжения и деформации, что приводит к снижению прочности металла и к трещинам. В связи с этим в проведенном исследовании источником теплового излучения является гибкий пластинчатый силиконовый нагревательный элемент [5, 11], который нагревает поверхность контакта постепенно, не оказывая таких негативных эффектов. Пластинчатый нагреватель (рис. 2) обладает рядом необходимых технических характеристик и особенностей, которые способствуют его применению на землеройных машинах с ковшевым рабочим органом. К этим особенностям относятся: малый собственный вес; большая степень гибкости; равномерность нагрева поверхности; возможность исполнения различных напряжений питания и крепежа.

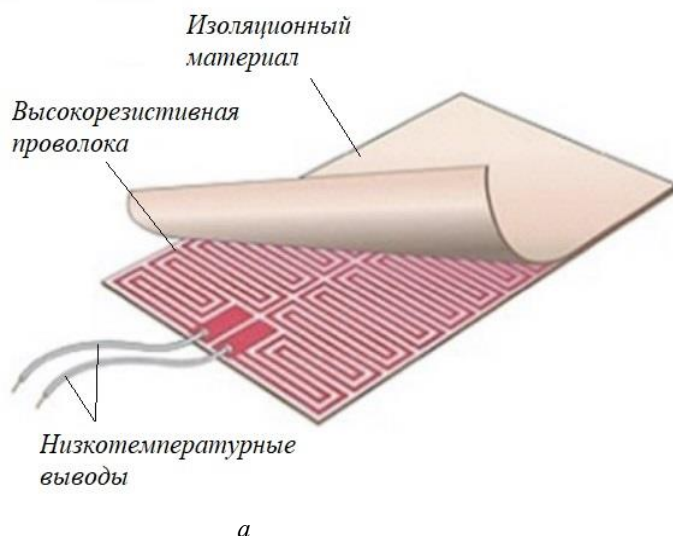


Рис. 2. Гибкий пластинчатый силиконовый нагреватель: а – схема нагревателя; б – вид нагревателя

Цель данного исследования – определение степени эффективности применения гибких силиконовых нагревательных пластин, работающих от различных источников питания (12, 24 и 220 В). Фактические технические характеристики нагревателей приведены в табл. 1.

Одной из наиболее важных характеристик нагревательных элементов является скорость нагрева. На рис. 3 отображена зависимость изменения температуры поверхности нагревательных элементов от продолжительности нагрева.

Таблица 1. Технические характеристики пластинчатых нагревателей

Параметр	Пластинчатый нагреватель от		
	12 В	24 В	220 В
Мощность, Вт	130	130	205
Температура нагрева ($t = 10$ мин), °С	188	207	226
Геометрические размеры, мм	200 × 150		

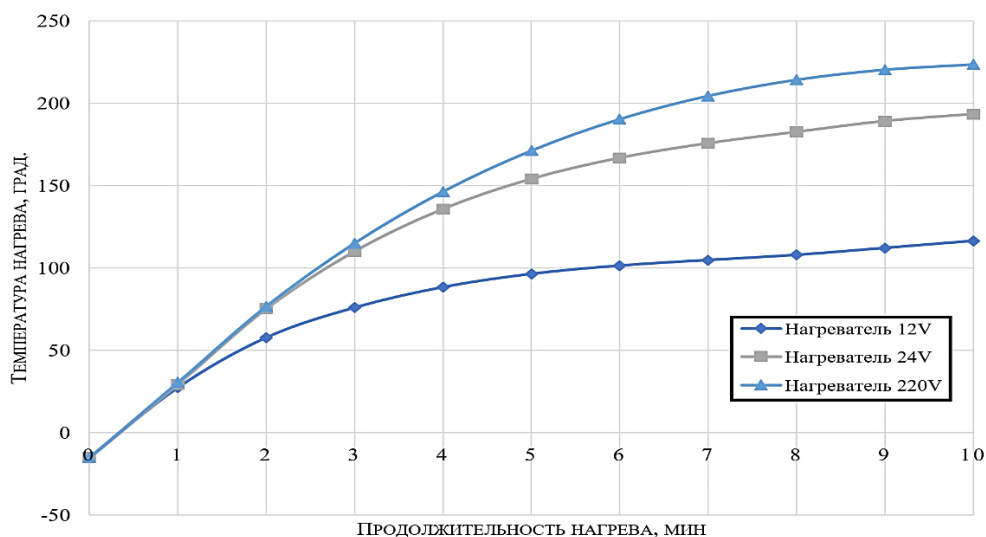


Рис. 3. Зависимость изменения температуры поверхности нагревательного элемента от продолжительности нагрева (при температуре окружающей среды $T = -15^\circ\text{C}$)

Исследование эффективности применения гибких пластинчатых нагревательных элементов для снижения адгезионных сил грунта, проявляемых при примерзании

их к рабочим органам, проводилось на лабораторной установке – сдвиговом стенде (рис. 4, 5) [7, 12].

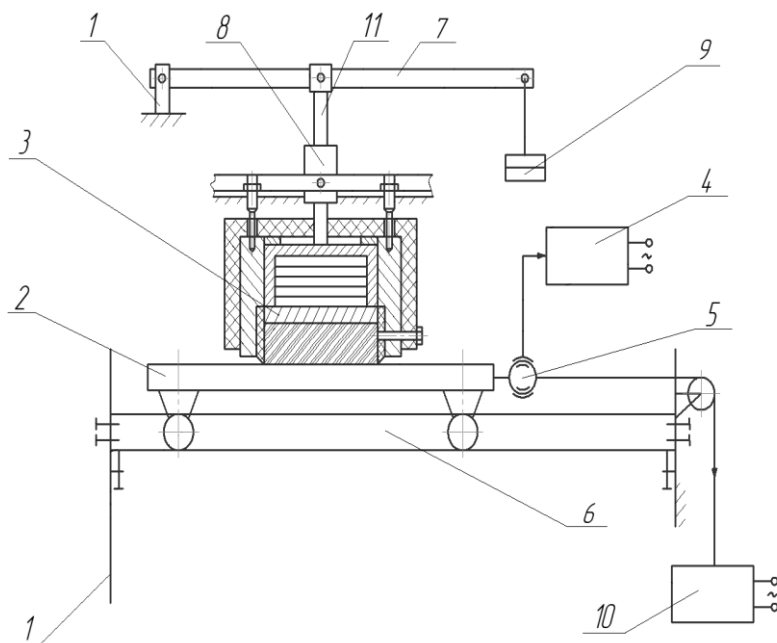


Рис. 4. Принципиальная схема сдвигового стенда: 1 – рама; 2 – подвижная каретка; 3 – стакан; 4 – тензометрическая аппаратура; 5 – тензометрический датчик; 6 – направляющая; 7 – нагрузочный рычаг; 8 – втулка; 9 – груз; 10 – приводной механизм; 11 – тяга



Рис. 5. Лабораторная установка – сдвиговой стенд

Данный стенд состоит из рамы 1, на которой жёстко закреплены направляющие 6, вдоль которых перемещается подвижная каретка 2. На каретке установлена стальная (сталь 3) пластина, имитирующая поверхность рабочего органа СДМ. Имитирующая пластина жёстко закреплена с подвижной кареткой при помощи болтов. В стакан 3 устанавливается обойма с грунтом, таким образом, что грунт соприкасается с имитатором ковша. Стакан создаёт давление на грунт посредством подвешенного груза 9 на одном конце нагрузочного рычага 7, другой конец рычага шарнирно закреплён с рамой. Стакан и рычаг соединены тягой 11, которая имеет возможность вертикально перемещаться в жёстко закреплённой на раме втулке 8.

Подвижная каретка 2 связана с приводным механизмом через тензометрический датчик 5, который, в свою очередь, отслеживает изменение усилия сдвига каретки и отправляет сигнал на электронный измерительный индикатор. На данном стенде установлена тензометрическая аппаратура 4 – электронный динамометр ДОР-3-5И.

Данная лабораторная установка позволяет определить возникающее усилие сдвига при смещении грунтового образца с поверхности физической модели, которая имитирует поверхность рабочего органа землеройной машины. Пятно контакта грунтового образца и контактируемой поверхности составляет $S = 10\,000\text{ мм}^2$, продолжительность контакта составляет $t_k = 10\text{ мин}$. Сдвиговой стенд позволяет проводить испытания на различных грунтах. В данном случае использован грунт – суглинок, дисперсностью $D = 7 \cdot 10 - 3\text{ мм}$ и весовой влажностью $W = 12,5\%$. Температурные условия окружающей среды $T = -15\text{ °C}$.

Экспериментальное исследование проводилось по схеме полного факторного эксперимента [13], суть которого заключается в том, что реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных уровнях. При этом количество факторов определяется по формуле

$$N = n^k; \quad (1)$$

где N – количество уровней; k – число факторов.

Из большого количества факторов, которые влияют на адгезионные свойства грунтов, в проведённом исследо-

вании были выбраны два фактора: x_1 – давления прижатия грунтового образца, кПа и x_2 – время продолжительности нагрева, мин. Уровни и интервалы варьирования принятых факторов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Уровни и интервалы варьирования

Факторы варьирования	Уровни			Интервалы варьирования
	–1	0	1	
Давление прижатия (x_1), кПа	10	20	30	10
Время продолжительности нагрева (x_2), мин	3	5	7	2

Результаты. В результате проведения исследования по определению эффективности гибкого пластичного силиконового нагревателя для снижения адгезионных сил были получены экспериментальные данные для данных элементов, работающих от разного напряжения (табл. 3).

Таблица 3. Отклик эксперимента

Факторы		Усилие сдвига, Н		
Давление прижатия (x_1), кПа	Время продолжительности нагрева (x_2), мин	12 В	24 В	220 В
30	7	137,67	106,93	99,74
30	5	151,79	141,26	107,26
30	3	192,25	153,36	128,84
20	7	138,65	104,64	93,20
20	5	151,40	105,95	95,48
20	3	157,61	122,63	117,72
10	7	85,67	87,64	66,05
10	5	88,94	89,93	77,50
10	3	102,68	104,64	87,64

В общем виде математическая модель имеет вид полинома второй степени:

$$Y(x_1, x_2) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2 \quad (2)$$

где b_0 – свободный член; b_1, b_2 – линейные коэффициенты; b_3, b_4 – квадратичные коэффициенты; b_5 – коэффициент парного взаимодействия.

Обработка полученных экспериментальных данных производилась с помощью программного обеспечения "Statistica". Результатом обработки является получение уравнений регрессии для каждого нагревательного элемента:

– для нагревательного элемента от 12 В:

$$Y_{12В} = 8,42 + 14,86x_1 - 10,46x_2 - 0,23x_1^2 + 1,22x_2^2 - 0,47x_1x_2 \quad (3)$$

– для нагревательного элемента от 24 В:

$$Y_{24В} = 84,79 + 2,65x_1 - 1,46x_2 + 0,03x_1^2 + 0,21x_2^2 - 0,37x_1x_2 \quad (4)$$

– для нагревательного элемента от 220 В:

$$Y_{220В} = 91,92 + 5,54x_1 - 20,74x_2 - 0,08x_1^2 + 1,64x_2^2 - 0,09x_1x_2 \quad (5)$$

По результатам проведённого экспериментального исследования были построены трёхмерные поверхности

отклика, которые отображают изменение величины усилия сдвига, от комбинации двух внешних факторов – продолжительности нагрева и давления прижатия грунта в зоне контакта.

Данные поверхности построены при использовании программного обеспечения "Statistica" для трёх нагревательных пластин (рис. 6, 7 и 8).

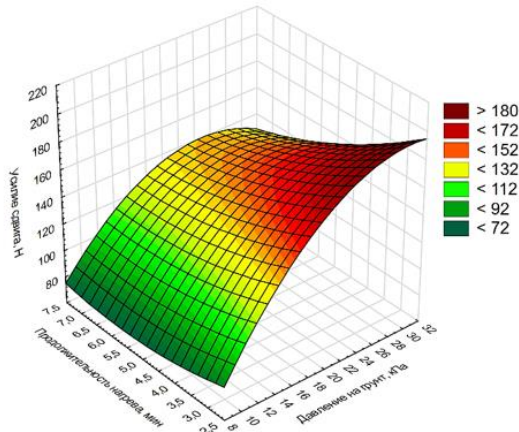


Рис. 6. Поверхность отклика усилия сдвига в зависимости от двух факторов: продолжительности нагрева и давления на грунт для нагревательного элемента от 12 В

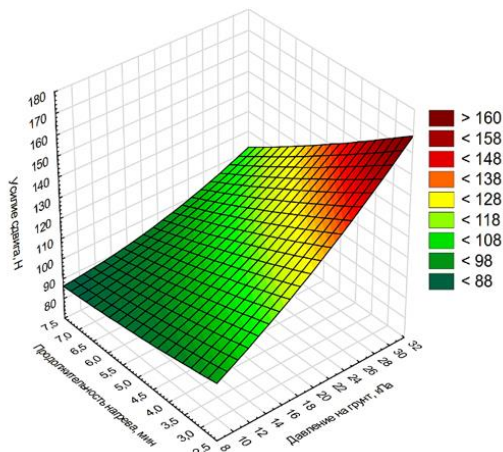


Рис. 7. Поверхность отклика усилия сдвига в зависимости от двух факторов: продолжительности нагрева и давления на грунт для нагревательного элемента от 24 В

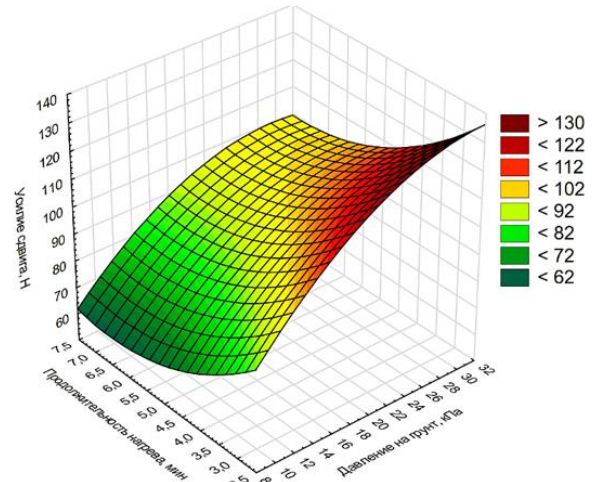


Рис. 8. Поверхность отклика усилия сдвига в зависимости от двух факторов: продолжительности нагрева и давления на грунт для нагревательного элемента от 220 В

Закключение. По данным, полученным в ходе проведённого экспериментального исследования, можно сделать ряд выводов и заключений:

1. При температуре -15°C и ниже (когда переход воды в лёд происходит более интенсивно), значительную роль в величине напряжения сдвига играет давление прижатия грунта к зоне контакта, а температура окружающей среды оказывает несущественное влияние.

2. Применение гибкого пластинчатого силиконового нагревательного элемента приводит к уменьшению адгезионных сил, возникающих между влажным связным грунтом и металлической поверхностью. Нагревательный элемент, работающий от напряжения питания 12 В, снижает сдвиговое усилие в 3,04...5,17 раза. Нагревательный элемент, работающий от напряжения питания 24 В, снижает сдвиговое усилие в 2,96...6,64 раза. Нагревательный элемент, работающий от напряжения питания 220 В, снижает сдвиговое усилие в 3,55...7,0 раза.

3. Максимальное снижение сдвигового усилия достигается при использовании нагревательной пластины от 220 В. Однако пластины (от 12 и 24 В), которые могут быть установлены на рабочие органы и подключены к бортовой сети землеройных машин, также показали высокую степень снижения сдвигового усилия.

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. Buturovich I, Kim Han Duc. Calculation curved concentrators, Trudy LPI, Vol. 309, 1969, 169 p.
3. 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.
4. 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.
5. Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Высоцкий Е.С., Ревин Д.В. Повышение производительности экскаватора при разработке влажного грунта в условиях севера // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 21. С. 92–97.
6. Sharma V.K., Drew L.O., Nelson L. High Frequency Vibrational Effects on Soil-Metal Friction // Transactions of the ASAE. 1977, no. 20(1), pp. 0046-0051. doi: 10.13031/1935.35490.
7. Патент №1310696 СССР. Сдвиговой стенд / В.И. Баловнев, Ю.П. Бакатин, С.А. Зеньков, С.В. Журавчук. – Заявка №3992052 от 12.12.1985; опубл. 15.05.1987, Бюл. №18.
8. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties // Journal of Terramechanics 36 (1999). P. 39–49.
9. Заднепровский Р.П. Теория трения скольжения. Волгоград: Offset. 2005. 51 с.
10. A.K. Basmenj, M. Ghafoori, A. Cheshomi, and Y.K. Azandariani. "Adhesion of clay to metal surface; normal and tangential measurement" Geomechanics and Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 125–135, 2016.

11. Гибкие поясные и плоские силиконовые нагреватели [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tvoy-nagrev.ru/catalog/gibkie-nagrevateli/gibkie-silikonovye-nagrevateli/>.
12. Патент №2460989 РФ. Стенд сдвиговый / С.А. Зеньков, Д.Ю. Кобзов, Е.В. Курмашев. – Заявка №2010139838/28 от 28.09.2010; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25.
13. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980 – 384 с.
14. U. Burbaum and I. Sass. "Physics of adhesion of soils to solid surfaces" Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 76, no. 3, pp. 1097–1105, 2017.
15. J.S. McFarlaned and D. Tabor "Adhesion of solids and the effect of surface films" Proceedings of the Royal Society of London, vol. 202, no. 1069, pp. 224–243, 1950.
16. C.L. Qiu, Q.J. Zhang, S.W. Yan and Y.C. Ji, "Experimental study of adhesion of clay" Rock and Soil Mechanics, vol. 38, no. 5, pp. 1267–1272, 2017.
17. Y.H. Xiao, C. Liu, L. Huang, and L. Liu, "Laboratory tests on adhesion reduction of clay soil by electro-osmosis method" Journal of Forestry Engineering, vol. 5, no. 4, pp. 168–173, 2020.
18. S.K. Deb, M.K. Shukla, P. Sharma and J.G. Mexal. "Coupled liquid water, water vapor, and heat transport simulations in an unsaturated zone of a sandy loam field" Soil Science, vol. 176, no. 8, pp. 387–398, 2011.
19. B. Minasny and A.B. McBratney "Integral energy as a measure of soil-water availability" Plant and Soil, vol. 249, no. 2, pp. 253–262, 2003.
20. L.Q. Ren, J. Tong, J.Q. Li, and B.C. Chen "Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review" // Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 79, no. 3, pp. 239–263, 2001.
- in northern conditions // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2023. No. 21. pp. 92–97.
6. Sharma V.K., Drew L.O., Nelson L. High Frequency Vibrational Effects on Soil-Metal Friction // Transactions of the ASAE. 1977, no. 20(1), pp. 0046-0051. doi: 10.13031/2013.35490.
7. Patent No. 1310696 USSR. Shear stand / V.I. Balovnev, Yu.P. Bakatin, S.A. Zenkov, S.V. Zhuravchuk – Application No. 3992052 dated 12.12.1985; published 15.05.1987, Bull. No. 18.
8. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties // Journal of Terram echanics 36 (1999). pp. 39–49.
9. Zadneprovsky R.P. Theory of sliding friction. Volgograd: Ofset. 2005. 51 p.
10. A.K. Basmenj, M. Ghafoori, A. Cheshomi and Y.K. Azandariani. "Adhesion of clay to metal surface; normal and tangential measurement" Geomechanics and Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 125–135, 2016.
11. Flexible Belt and Flat Silicone Heaters [Electronic resource]. URL: <https://tvoy-nagrev.ru/catalog/gibkie-nagrevateli/gibkie-silikonovye-nagrevateli/>.
12. Patent No. 2460989 of the Russian Federation. Shear stand / S.A. Zenkov, D.Yu. Kobzov, E.V. Kurmashev. – Application No. 2010139838/28 dated 28.09.2010; published 10.09.2012, Bulletin No. 25.
13. Montgomery D.K. Experimental Design and Data Analysis: trans. from English. – Л. : Судостроение, 1980 – 384 p.
14. U. Burbaum and I. Sass "Physics of adhesion of soils to solid surfaces" Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 76, no. 3, pp. 1097–1105, 2017.
15. J.S. McFarlaned and D. Tabor "Adhesion of solids and the effect of surface films" Proceedings of the Royal Society of London, vol. 202, no. 1069, pp. 224–243, 1950.
16. C.L. Qiu, Q.J. Zhang, S.W. Yan and Y.C. Ji. "Experimental study of adhesion of clay" Rock and Soil Mechanics, vol. 38, no. 5, pp. 1267–1272, 2017.
17. Y.H. Xiao, C. Liu, L. Huang, and L. Liu "Laboratory tests on adhesion reduction of clay soil by electro-osmosis method" Journal of Forestry Engineering, vol. 5, no. 4, pp. 168–173, 2020.
18. S.K. Deb, M.K. Shukla, P. Sharma and J.G. Mexal "Coupled liquid water, water vapor, and heat transport simulations in an unsaturated zone of a sandy loam field" Soil Science, vol. 176, no. 8, pp. 387–398, 2011.
19. B. Minasny and A.B. McBratney "Integral energy as a measure of soil-water availability" Plant and Soil, vol. 249, no. 2, pp. 253–262, 2003.
20. L.Q. Ren, J. Tong, J.Q. Li and B.C. Chen. "Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review" // Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 79, no. 3, pp. 239–263, 2001.

References

1. Zadneprovsky R.P. Working bodies of earthmoving and melioration machines and equipment for the development of soils and materials of high humidity. Moscow : Mashinostroenie, 1992. 176 p.
2. Buturovich I, Kim Han Duc. Calculation curved concentrators, Trudy LPI, Vol. 309, 1969, 169 p.
3. Zenkov S.A., Ignatiev K.A., Filonov A.S. Efficiency of flexible heating elements for combating soil adhesion to earthmoving machines // Transactions of Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences. 2013. Vol. 1. pp. 134–137.
4. 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.
5. Zenkov S.A., Dryupin P.Yu., Vysotsky E.S., Revin D.V. Increasing excavator productivity when developing wet soil