

Повышение эффективности технологических машин при взаимодействии с адгезивными материалами при отрицательных температурах

С.А. Зеньков^а, Н.А. Балахонов^б

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

^аmf@brstu.ru, ^бbalaxon-off@mail.ru

^а<https://orcid.org/0000-0002-4948-0223>,

^б<https://orcid.org/0000-0002-3493-0244>

Статья поступила 16.04.2019, принята 11.05.2019

Объектом исследования авторов статьи является технологическая машина для земляных работ, разрабатывающая влажный связный грунт в условиях отрицательных температур. В рамках эксперимента проведен анализ использования противообледенительной жидкости «MaxFlight 04» в качестве профилактического материала, применяемого для устранения адгезии системы «грунт–металл», которая проявляется в работе технологических машин во время работы с влажным связным грунтом в условиях отрицательных температур. Первостепенная цель исследования — повышение производительности, качественная и более эффективная работа технологических машин при работе с влажным связным грунтом в условиях отрицательных температур окружающей среды посредством уменьшения адгезии влажного связного грунта, контактирующего с поверхностями рабочих органов землеройных машин. Математическая обработка результатов исследования позволила получить уравнения регрессии для работы в двух условиях— без использования профилактических средств для снижения адгезии грунта; с использованием противообледенительной жидкости «MaxFlight 04». С помощью полученных уравнений регрессии произведен расчет коэффициента пропорциональности (приведенного коэффициента трения f). Представлены результаты расчетов, исходя из которых получены расчетным методом значения коэффициента пропорциональности в зависимости от температуры в плоскости сдвига. Приведенный коэффициент трения, или коэффициент пропорциональности f , обобщает параметры силы сдвига при нахождении силы трения грунта по поверхности рабочего органа, а его величина включает в себя адгезионную и деформационную составляющие и зависит от тех же параметров, что и сопротивление сдвигу, конкретно — давления прижатия P и времени t контактирования с поверхностью, дисперсности D и влажности W грунта, температуры в плоскости сдвига T , общего состояния поверхности металла. Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод об эффективности практического применения противообледенительной жидкости при работе землеройных машин в условиях отрицательных температур.

Ключевые слова: адгезия; коэффициент пропорциональности; «MaxFlight 04»; уравнение регрессии.

Improving the efficiency of technological machines when interacting with adhesive materials at low temperatures

S.A. Zenkov^а, N.A. Balakhonov^б

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

^аmf@brstu.ru, ^бbalaxon-off@mail.ru

^а<https://orcid.org/0000-0002-4948-0223>,

^б<https://orcid.org/0000-0002-3493-0244>

Received 16.04.2019, accepted 11.05.2019

The object of the research is a technological machine for earthworks, developing a wet cohesive soil in conditions of low temperatures. As part of the experiment, the analysis of the use of the Max Flight 04 deicing fluid as a preventive material used to eliminate the adhesion of the soil-metal system, which manifests itself in the operation of technological machines during operation with a wet cohesive ground at negative temperatures, is carried out. The primary objective of the study is to increase productivity, quality and more efficient operation of technological machines when working with wet cohesive soil at low ambient temperatures by reducing the adhesion of wet cohesive soil in contact with the surfaces of the working bodies of earth-moving machines. Mathematical processing of the research results allowed to obtain regression equations for working in two conditions - without the use of prophylactic agents to reduce the adhesion of the soil; using the anti-icing fluid "Max Flight 04". Using the obtained regression equations, the proportionality coefficient (reduced friction coefficient f) was calculated. The results of calculations are presented, on the basis of which the values of the proportionality coefficient depending on the temperature in the shear plane are obtained by a calculation method. The reduced friction coefficient, or coefficient of proportionality f , summarizes the parameters of the shear force when the friction force of the soil is found on the surface of the working body, and its value includes the adhesive and deformation components and depends on the same parameters as the shear resistance, specifically the pressure pressing P and time t in contact with the surface, dispersion D and humidity W of the soil, temperature in the shear plane T , general condition of the metal surface. The results of the study allow to conclude about the effectiveness of the practical use of anti-icing fluid during the operation of earth-moving machines at negative temperatures.

Keywords: adhesion; coefficient of proportionality; “Max Flight 04”; regression equation.

Введение

Во время работы землеройных машин с влажным связным грунтом в диапазоне температур $+5...-12$ °C происходит активное налипание грунта на стенки ковшовых и отвальных рабочих органов, а при отрицательной температуре от -10 °C и ниже так же наблюдается смерзание грунта и металлической поверхности рабочего органа. В летний и осенний сезоны уже спустя 40 мин работы технологических машин с грунтовым массивом полезный объем ковшовых и отвальных органов уменьшается за счет налипания на 12–18%.

При работе в зимний и весенний сезоны налипание и примерзание грунта к поверхностям рабочих органов наиболее активно. Это зависит от многих факторов, таких как температура окружающей среды, влажность грунта, давление прижатия грунта к металлической поверхности. Зимой полезный объем ковшовых и отвальных рабочих органов может сократиться на 30–45 %, при этом толщина налипшего грунтового массива достигает 21–36 см. Налипание или примерзание грунта наиболее свойственно для ковшовых рабочих органов закрытого типа. Такое явление, как адгезия грунта, ухудшает условия наполнения рабочих органов, усиливает сопротивление копания и нарезке земляного полотна, увеличивает время на разгрузку ковшовых и отвальных рабочих органов, уменьшает их полезный объем. Все это приводит к уменьшению производительности технологических машин. Данная проблема актуальна не только для землеройных механизмов, но и для автомобилей, выполняющих транспортировку грунта. За счет вибрации и уплотнения грунта в кузовах машин при транспортировке, а также при длительном контакте грунтового массива с бортовой частью кузовов налипание и намерзание грунта происходит более интенсивно.

В основу исследования положен один из актуальных на сегодняшний день и перспективных методов снижения налипания и примерзания грунтового массива к контактирующим поверхностям — профилактический метод [1–20]. Данный метод базируется на образовании жидкого промежуточного слоя в зоне границы между металлической поверхностью рабочего органа технологической машины и контактирующего с ней грунтового массива. Промежуточный (профилактический) слой выполняет защитную роль при взаимодействии межмолекулярных сил. В свою очередь, данная защитная (экранирующая) особенность обеспечивает свободное перемещение фазовых поверхностей. Промежуточный слой может представлять собой жидкий, твердый и газообразный слой, также возможно их комбинирование. В качестве жидкого промежуточного слоя для проведения исследований было использовано профилактическое средство — противообледенительная жидкость (ПОЖ) «MaxFlight 04».

Эксперимент. «MaxFlight 04» является противообледенительным средством на основе пропиленгликоля и имеет очень хорошую противообледенительную характеристику — при использовании в нагретом до $+70$ °C состоянии не имеет ограничений в выполнении данной операции. Обладает наименьшим пределом вязкости из всех аналогов жидкостей SAE, относящихся к типу IV, в определенных ситуациях более низким, чем у жидкостей SAE, относящихся к типу II [3]. В экспериментальных исследованиях был использован грунт IV категории, суглинок, как наиболее распространенный на территории северных районов Иркутской области. Влажность грунта составляла 7,5, 12,5 и 17,5%, время контакта грунта с металлической поверхностью — 3; 5 и 7 мин, что соответствует параметрам работы технологических машин. План и результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

План и результаты эксперимента

Температура окружающей среды $T_{ср}$, °C	Влажность грунта W , %	Время контакта t , мин	Напряжение сдвига $\tau_{об}$ без воздействия, Н	Напряжение сдвига τ с использованием «MaxFlight 04», Н
–35	7,5	3	92,73	30,4
	7,5	7	174,2	62,74
	12,5	5	186,54	78,91
	17,5	3	218,54	134,2
	17,5	7	400	159,89
–15	7,5	5	63,74	38,25
	12,5	3	78,45	50,01
	12,5	5	144,2	56,88
	12,5	7	240,3	58,84
	17,5	5	228,5	94,14
5	7,5	3	11,6	4,2
	7,5	7	15,2	5,1
	12,5	5	17,9	8,3
	17,5	3	24,3	14,8
	17,5	7	31,7	17,4

Математическая обработка результатов, полученных в ходе экспериментальной работы, произведена при помощи программы Model для многофакторных уравнений регрессии. Итоговый результат программной обработки позволил получить уравнения регрессии, определяющие напряжение сдвига от различных воздействующих на исследуемый объект факторов (температуры окружающей среды T_{cp} , относительной влажности грунта W , времени контакта грунта с поверхностью технологических машин t), для двух методов исследования: без воздействия на контактную зону и с использованием ПОЖ «MaxFlight 04».

Без воздействия [3]:

$$\tau_{\text{БЗ}} = 134.3 + 1.026 \cdot T_{cp} - 4.3 \cdot W - 46.08 \cdot t - 0.1 \cdot T_{cp}^2 + 0.1074 \cdot W^2 + 3.985 \cdot t^2 - 0.4 \cdot T_{cp} \cdot W - 0.8 \cdot T_{cp} \cdot t + 1.3 \cdot W \cdot t \quad (1)$$

С использованием «MaxFlight 04» [3]:

$$\tau_{\text{MaxFlight}} = 41.22 + 0.66 \cdot T_{cp} - 8.14 \cdot W + 4.4 \cdot t - 0.03 \cdot T_{cp}^2 + 0.43 \cdot W^2 - 0.27 \cdot t^2 - 0.22 \cdot T_{cp} \cdot W - 0.17 \cdot T_{cp} \cdot t - 0.062 \cdot W \cdot t \quad (2)$$

1. Сила трения F грунта относительно поверхности скольжения при учете образования адгезии имеет выражение [4]:

$$F = fP + f_1 \cdot \rho_n \cdot S, \quad (3)$$

где P — равнодействующая сил нормального давления на зону контакта с грунтом; ρ_n — удельная сила прилипания (намерзания) массива грунта, Па; f_1 — коэффициент пропорциональности для адгезионной составляющей силы трения; f — коэффициент пропорциональности для деформационной составляющей силы трения; S — площадь контакта металлической поверхности. При равенстве коэффициентов $f = f_1$ имеем известную формулу Дерягина–Кротовой.

Сопrotивление сдвигу [4]:

$$\tau = \frac{fP + f_1 \rho_n \cdot S}{S} \quad (4)$$

При анализе формулы (4) получаем, что сопротивление (напряжение) сдвигу грунтового массива по металлической поверхности рабочего органа включает в себя адгезионную (f, ρ_n, S) и деформационную (f, P) составляющие и зависит от давления прижатия и площади контактирующей поверхности, свойств поверхностей сдвига и скорости перемещения грунта.

Коэффициент пропорциональности f выражается формулой [4]:

$$f = \frac{rS}{P} = f + f_1 \cdot \rho_n \frac{S}{P} \quad (5)$$

Приведенный коэффициент трения f , или коэффициент пропорциональности, учитывает особенности сдвига образца при определении силы трения грунта по металлической поверхности рабочего органа. Его величина включает деформационную и адгезионную составляющие и зависит от тех же параметров, что и со-

противление сдвигу, а именно: времени t и давления P контакта, влажности W и дисперсности D грунта, температуры в плоскости сдвига T , состояния поверхности металла.

Считается [4], что формула сопротивления сдвигу (4) определяет и значение сопротивления сдвигу при примерзании связного грунта к поверхности скольжения. В этом случае коэффициент пропорциональности f будет учитывать влияние адгезии при отрицательной температуре и определяется равенством зависимостей, полученных аналитическим путем (4) и экспериментальным методом на специальном сдвиговом стенде ((1), (2)), где $\tau = f(D, F, P, W, T, t)$.

Сопrotивление сдвигу τ , площадь S и давление контакта P можно измерить, что дает возможность экспериментального определения приведенного коэффициента трения f при смерзании грунта с контактирующей поверхностью рабочего органа.

Без воздействия жидкости, с учетом зависимости (1):

$$f = (134.3 + 1.026 T_{cp} - 4.3 \cdot W - 46.08 \cdot t - 0.1 \cdot T_{cp}^2 + 0.1074 W^2 + 3.985 t^2 - 0.4 \cdot T_{cp} \cdot W - 0.8 \cdot T_{cp} \cdot t + 1.3 \cdot W \cdot t) \cdot \frac{S}{P} \quad (6)$$

При применении жидкостного промежуточного слоя, с учетом зависимости (2):

$$f = (41.22 + 0.66 \cdot T_{cp} - 8.14 \cdot W + 4.4 \cdot t - 0.03 \cdot T_{cp}^2 + 0.43 \cdot W^2 - 0.27 \cdot t^2 - 0.22 \cdot T_{cp} \cdot W - 0.17 \cdot T_{cp} \cdot t - 0.062 \cdot W \cdot t) \cdot \frac{S}{P} \quad (7)$$

Результаты математического расчета коэффициента пропорциональности по зависимостям относительно температуры окружающей среды приведены в табл.2–4.

Таблица 2

Ориентировочные значения коэффициента пропорциональности f в зависимости от температуры в плоскости сдвига

Использование профилактических средств	Температура окружающей среды T_{cp} , °C				
	+5	-5	-15	-25	-35
Без воздействия	0,39	1,1	1,7	2,16	2,5
«MaxFlight04»	0,11	0,38	0,61	0,81	0,97

1. Данные величины коэффициента пропорциональности f определены при следующих значениях внешних факторов: давление прижатия $P = 20$ кПа, влажность $W = 17,5\%$, время контакта $t = 7$ мин.

Графическая интерпретация квазиоднофакторных зависимостей коэффициента пропорциональности, полученных из зависимостей (6), (7), представлена на рис. 1–3.

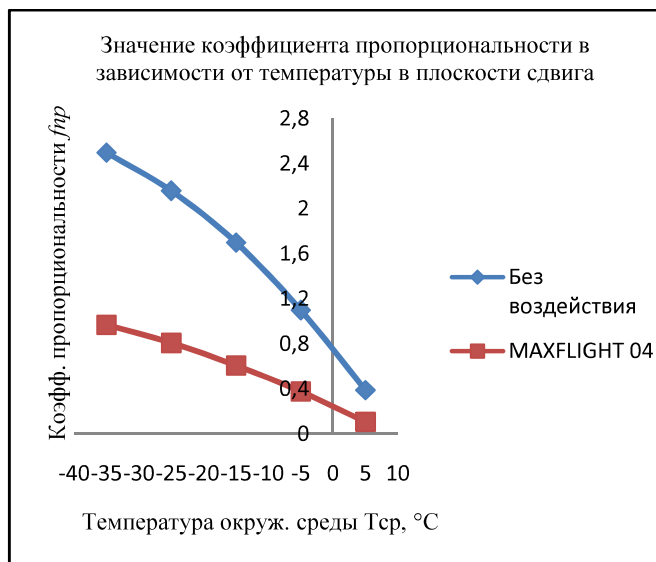


Рис. 1. Значение коэффициента пропорциональности в зависимости от температуры в плоскости сдвига

Анализ графиков показывает, что при положительной температуре $+5^{\circ}\text{C}$ и применении жидкости «MaxFlight 04» коэффициент пропорциональности f в 3,5 раза ниже f без использования профилактических средств. При отрицательной температуре -5°C и применении жидкости «MaxFlight 04» коэффициент пропорциональности в 2,9 раза ниже f без использования профилактических средств. При отрицательной температуре -15°C и применении жидкости «MaxFlight 04» коэффициент пропорциональности в 2,8 раза ниже f без использования профилактических средств. При отрицательной температуре -25°C и применении жидкости «MaxFlight 04» коэффициент пропорциональности в 2,7 раза ниже, чем f без использования профилактических средств. При отрицательной температуре -35°C и применении жидкости «MaxFlight 04» коэффициент пропорциональности в 2,6 раза ниже f без использования профилактических средств.

Таблица 3

Ориентировочные значения коэффициента пропорциональности f в зависимости от температуры в плоскости сдвига

Использование профилактических средств	Температура окружающей среды $T_{ср}$, °C				
	+5	-5	-15	-25	-35
Без воздействия	0,05	0,52	0,86	1,08	1,18
«MaxFlight04»	0,04	0,18	0,27	0,33	0,36

Данные величины f определены при следующих значениях внешних факторов: давление прижатия $P = 20$ кПа, влажность $W = 7,5\%$, время контакта $t = 7$ мин.

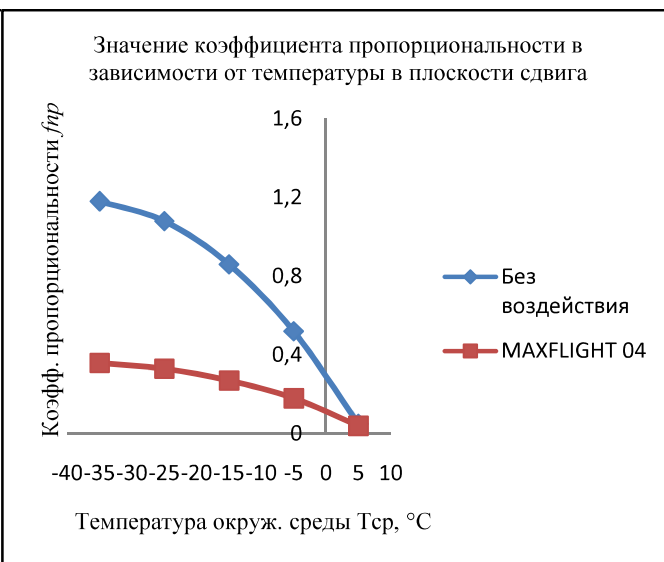


Рис. 2. Значение коэффициента пропорциональности в зависимости от температуры в плоскости сдвига

Анализ зависимостей (рис. 2) позволяет сделать вывод об эффективности использования ПОЖ «MaxFlight 04». Обусловлено это тем, что при рассмотрении значений коэффициентов пропорциональности f двух методов исследования (без воздействия на контактную зону и с использованием «MaxFlight 04») в положительной отметке температуры окружающей среды $T_{ср} = +5^{\circ}\text{C}$ значение f профилактической жидкости ниже значения f без использования ПОЖ в 1,25 раза. Сохраняется тенденция эффективности использования противообледенительной жидкости и в диапазоне отрицательных температур $T_{ср} = -5; -15; -25; -35^{\circ}\text{C}$, где коэффициент пропорциональности f для «MaxFlight 04» в сравнении с коэффициентом пропорциональности f без применения ПОЖ в 2,9; 3,2; 3,3 и 3,3 раза ниже соответственно отрицательным температурам.

Таблица 4

Ориентировочные значения коэффициента пропорциональности f в зависимости от температуры в плоскости сдвига

Использование профилактических средств	Температура окружающей среды $T_{ср}$, °C				
	+5	-5	-15	-25	-35
Без воздействия	0,2	0,79	0,26	1,6	1,82
«MaxFlight04»	0,1	0,21	0,38	0,6	0,6

Данные величины коэффициента пропорциональности f определены при следующих значениях внешних факторов: давление прижатия $P = 20$ кПа, влажность $W = 12,5\%$, время контакта $t = 7$ мин.

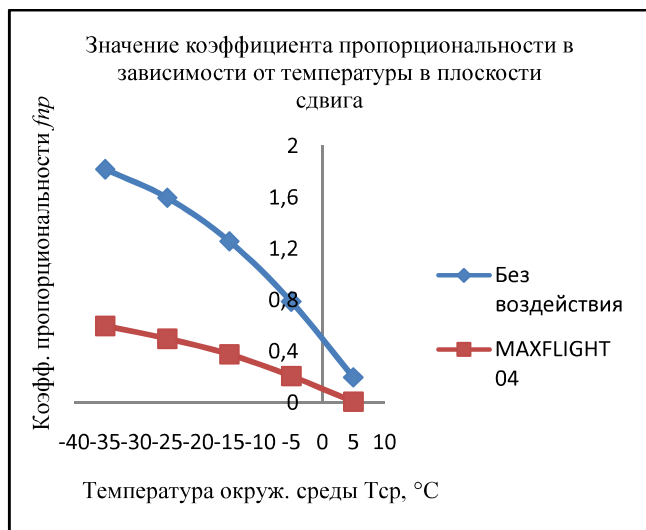


Рис. 3. Значение коэффициента пропорциональности в зависимости от температуры в плоскости сдвига

Анализ зависимостей (рис. 3) позволяет сделать вывод об эффективности использования ПОЖ «MaxFlight 04». Обусловлено это тем, что при рассмотрении значений коэффициентов пропорциональности f двух методов исследования (без воздействия на контактную зону и с использованием «MaxFlight 04») в положительной отметке температуры окружающей среды $T_{cp} = +5^{\circ}\text{C}$ значение f профилактической жидкости ниже значения f без использования ПОЖ в 2раза. Сохраняется тенденция эффективности использования противообледенительной жидкости и в диапазоне отрицательных температур $T_{cp} = -5; -15; -25; -35^{\circ}\text{C}$, где коэффициент пропорциональности f для «MaxFlight 04» в сравнении с коэффициентом пропорциональности f без применения ПОЖ в 3,8; 3,3; 3,2и 3 раза ниже соответственно отрицательным температурам.

Заключение

Анализ полученных значений коэффициента пропорциональности f позволяет сделать вывод о том, что с понижением температуры контактирующих поверхностей в диапазоне $+5...-35^{\circ}\text{C}$ коэффициент пропорциональности f возрастает при применении противообледенительной жидкости марки «MaxFlight 04», но его величина в 2...3.5 раза ниже значений коэффициентов пропорциональности без использования профилактических средств для снижения адгезии грунта.

Литература

1. Заднепровский Р.П. Теория трения скольжения. Волгоград: Ofset, 2005. 51 с.
2. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties // Journal of Terramechanics 36. 1999. P. 39-49.
3. Zenkov S.A., Balahonov N.A., Kirichenko O.P. Decrease of soil adhesion to working bodies of earth-moving machines // International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). 2018. Vol. 158. P. 468-473.
4. Вестн. МГСУ. 2014. № 2. С. 98-104.

5. Sharma V. K., Drew L. O., Nelson L. Transactions of the ASAE 20. 1977. P. 46-51.
6. Tong J., Ren L., Yan J., Ma Y. and Chen B. 1999 Int. Agricultural Eng. J.8. 1999. P. 1-22.
7. Wang X. L., Ito N., Kito K. and Garcia P. 1998 J. of Terramech. 35. 1998. P. 87-101.
8. Заднепровский Р.П. Рабочие органы земляных и мелиоративных машин и оборудования для грунтов и материалов повышенной влажности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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. I, Munich, December 18th-19th, 2012 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich- Germany. 2012. P. 251-256.
14. Зеньков С.А., Игнатьев К.А. Влияние ультразвукового воздействия на адгезию грунтов к рабочим органам землеройных машин // Системы Методы Технологии. 2012. № 2 (14). С. 43-45.
15. Зеньков С.А., Курмашев Е.В. Определение параметров вибрационного оборудования к ковшам экскаваторов для снижения адгезии грунтов // Науч.-технические ведомости С.-Петербур. гос. политехн. ун-та. 2009. № 4-2 (89). С. 90-94.
16. Зеньков С.А., Булаев К.В., Батуро А.А., Диппель Р.А. Стенд для исследования влияния интенсифицирующего воздействия на прочность смерзания грунта с металлической поверхностью рабочего органа // Механики XXI века. 2005. № 4. С. 44-49.
17. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Зеньков С.А., Журавчук С.В. Сдвиговой стенд: пат. на изобретение RUS. № 1310696 12.12.1985.
18. Зеньков С.А., Курмашев Е.В., Мунц В.В. Стенд для исследования влияния комбинированного воздействия на адгезию грунтов к землеройным машинам // Механики XXI века. 2007. № 6. С. 15-18.
19. Зеньков С.А., Балахонов Н.А., Чубыкин А.С., Кожевников А.С. Влияние жидкостного промежуточного слоя на адгезию грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Механики XXI века. 2014. № 13. С. 152-156.
20. Зеньков С.А., Курмашев Е.В. Определение производительности экскаваторов при снижении адгезии грунтов // Вестн. Иркут. регион. отд-я Акад. наук высш. школы Рос. Федерации. 2010. № 2 (17). С. 191-195.

Reference

1. Zadneprovskiy R.P. Theory of sliding friction (Volgograd: Ofset). 2005. 51 p.
2. Rajaram G. and Erbach D.C. Journal of Terramechanics 36. 1999. P. 39-49.
3. Zenkov S.A., Balahonov N.A., Kirichenko O.P. International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018) Decrease of soil adhesion to working bodies of earth-moving machines. 2018. volume 158. P. 468-473.
4. Zenkov S.A., Balahonov N.A. and Ignatyev K.A. Vestnik MGSU. 2014. № 2. P. 98-104.
5. Sharma V.K., Drew L.O., Nelson L. 1977 Transactions of the ASAE 20. 1977. P. 46-51.
6. Tong J., Ren L., Yan J., Ma Y. and Chen B. 1999 Int. Agricultural Eng. J.8. 1999. P. 1-22.
7. Wang X.L., Ito N., Kito K. and Garcia P. P. 1998 J. of Terramech.35. 1998. P. 87-101.
8. Zadneprovsky R.P. 1992 Working bodies earthwork and reclamation machines and equipment for soil and high humidity materials (Moscow: Mashinostroenie). 1992. 176 p.
9. 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). P. 539-545. China Machine Press, Beijing, China.
10. Azadegan B., Massah J. Effect of temperature on adhesion of clay soil to steel // Cercetări Agronomice în Moldova Vol. XLV, №. 2 (150). 2012. P. 21-27.
11. 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.
12. 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.
13. 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. I, Munich, December 18th-19th, 2012 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg Munich Germany. 2012. P. 251-256.
14. Zenkov S.A., Ignatiev K.A. Effect of ultrasound effects on soil adhesion to working bodies earthmoving machinery // Systems Methods Technology. 2012. № 2 (14). P. 43-45.
15. Zenkov S.A., Kurmashev E.V. Parameter Definition vibratory equipment to excavator buckets to reduce the adhesion of soils // Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. 2009. № 4-2 (89). P. 90-94.
16. Zenkov S.A., Bulaev K.V., Baturo A.A., Dippel R.A. Stand to study the effect of intensifying impact on the strength of freezing ground with metal surface of the working body // Mechanics of the XXI century. 2005. № 4. P. 44-49.
17. Balovnev V.I., Bakatin Yu.P., Zenkov S.A., Zhuravchuk S.V. Shift stand // patent for invention RUS 1310696 12/12/1985.
18. Zenkov S.A., Kurmashev E.V., Munts V.V. Stand for impact studies on the adhesion of soils to earthmoving machines // Mechanics of the XXI century. 2007. № 6. P. 15-18.
19. Zenkov S.A., Balakhonov N.A., Chubykin A.S., Kozhevnikov A.S. Influence of liquid intermediate layer on the adhesion of the soil to metal surfaces of the working bodies earthmoving machines // Mechanics of the XXI century. 2014. № 13. P. 152-156.
20. Zenkov S.A., Kurmashev E.V. Definition excavator performance while reducing soil adhesion // Bulletin of the Irkutsk Regional Branch of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation. 2010. № 2 (17). P. 191-195.