

УДК 624.132

Снижение адгезии грунта к машинам при применении жидкостного промежуточного слоя

С.А. Зеньков^а, Н.А. Балахонов^б, Д.С. Чубыкина^с

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

^аmf@brstu.ru, ^бbalaxon-off@mail.ru, ^сd_aria@mail.ru

Статья получена 16.09.2015, принята 25.10.2015

При разработке влажных связных грунтов происходят налипание и намерзание грунта на рабочие органы землеройных машин, что существенно снижает их производительность. Известны четыре группы методов устранения адгезии грунтов к поверхностям рабочих органов землеройных машин. По характеру и принципу действия их можно разделить на профилактические средства и средства для очистки рабочих органов землеройных машин. На специальном сдвиговом стенде, с применением математической теории планирования проведены многофакторные эксперименты по применению противообледенительной жидкости в качестве профилактического метода для создания промежуточного слоя на границе контакта с целью снижения адгезии грунта с металлическими поверхностями машин. Математическая обработка полученных результатов проводилась при помощи программы MODEL для многофакторных зависимостей с использованием метода наименьших квадратов. В результате обработки экспериментальных данных были получены уравнения регрессии без воздействия смазочного материала и с использованием противообледенительных жидкостей марок «Maxflight 04» и «Octaflo EG». Получены многофакторные зависимости напряжения сдвига. Для интерпретации результатов приведены квазиоднофакторные зависимости при фиксированных значениях двух факторов из трех, построены поверхности отклика по квазиоднофакторным зависимостям для противообледенительных жидкостей названных марок. Анализ данных зависимостей в исследованном диапазоне изменения факторов показывает, что применение противообледенительных жидкостей «Maxflight 04» и «Octaflo EG» уменьшает напряжение сдвига до 57%. Реализация полученных значений и параметров воздействия, конструктивных решений позволяет обеспечить повышение эффективности работы землеройных машин, разрабатывающих влажный грунт в условиях отрицательных температур.

Ключевые слова: адгезия; противообледенительная жидкость; «Maxflight 04»; «Octaflo EG»; грунт; сдвиговой стенд.

Soil adhesion decrease to machines when using liquid intermediate layer

S.A. Zenkov^а, N.A. Balahonov^б, D.S. Chubykina^с

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

^аmf@brstu.ru, ^бbalaxon-off@mail.ru, ^сd_aria@mail.ru

Received 16.09.2015, accepted 25.10.2015

When developing wet cohesive soils, there are sticking and freezing of the soil on the working bodies of earth-moving machines. It significantly reduces their productivity. There are four groups of methods to eliminate soil adhesion to the surface of the bodies of earth-moving machinery. The nature and the principle of action can be divided into preventive means and cleaning ones for working parts of earth-moving machines. Special shear stand demonstrates multifactorial experiments by using mathematical theory of planning. They were conducted with using deicing fluid as a preventive method for creating an intermediate layer at the interface to reduce soil adhesion to metal surfaces of machines. Mathematical processing of the results was performed by using the program MODEL for multifactorial dependencies using the least squares method. As a result of the processing the experimental data, regression equations were obtained without affecting the lubricant and deicing fluids using «Maxflight 04» and «Octaflo EG». Multifactorial dependences of shear stress have been received. For the interpretation of the results quazi-one-factor dependences are shown at fixed values for two factors of three, the response surface has been built on quazi-one-factor curves for anti-icing fluid marks «Maxflight 04» and «Octaflo EG». The analysis of data dependencies in the investigated range of factors shows that the use of de-icing fluids marks «Maxflight 04» and «Octaflo EG» reduces shear stress up to 57%. The implementation of these values and parameters impacts design solutions and allows improving the efficiency of earth-moving equipment, developing the wet ground in freezing conditions.

Key words: adhesion; anti-icing fluid; «Maxflight 04»; «Octaflo EG»; soil; shear stand.

Введение. Основной причиной снижения производительности землеройных машин является увеличение адгезии и трения при разработке влажных связных грунтов в условиях отрицательных температур. Адгезионные явле-

Таблица 1

План и результаты эксперимента

ния вызывают резкое увеличение сил трения, которые составляют 30-60 % тягового усилия [1–3].

Существующие методы снижения трения и прилипания можно разделить на четыре группы. Методы первой группы включают в себя создание промежуточного слоя на границе контакта, который может служить защитным экраном для молекулярного взаимодействия фаз и должен обладать адгезионным взаимодействием [4–7]. Методы второй группы способствуют ослаблению адгезионных связей за счет внешнего воздействия [8], третьей группы — основаны на конструктивно-технологических и механических способах [9]. Четвертая группа — это комбинирование двух и более методов для снижения адгезии [10; 11].

Широко применяемым и перспективным профилактическим методом борьбы с адгезией является создание промежуточного слоя на границе контакта системы «рабочая поверхность – грунт». Этот слой играет роль экрана для сил межмолекулярного взаимодействия, т. е. обеспечивает свободу относительного перемещения фазовых поверхностей и бывает жидким, твердым и газообразным. Толщина слоя должна быть достаточной для проявления его антиадгезионных свойств.

Основная часть. Рассмотрим применение в качестве жидкостного промежуточного слоя противообледенительных жидкостей (ПОЖ).

ПОЖ «Maxflight 04» и «Octaflo EG» производится на основе пропиленгликоля [12] и предназначены для наземной противообледенительной обработки воздушных судов. Обладают очень хорошей противообледенительной характеристикой, когда используются нагретыми до +70 °С. Без каких-либо операционных ограничений. Время удержания ПОЖ на крыле (holdover time) от 3 минут до 12 часов.

Проведены эксперименты на сопротивление сдвигу влажного связного грунта относительно металлической поверхности с применением ПОЖ «Maxflight 04» и «Octaflo EG» при температурах воздуха в диапазоне от –35 до +5 °С. Эксперименты проводились на специальном сдвиговом стенде [13–15].

Для экспериментов был использован грунт суглинок при значениях влажности от 7,5 до 17,5 %, времени контакта грунта с металлом от 3 до 7 мин, что соответствует параметрам, в которых работают землеройные машины. План и результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Математическая обработка полученных результатов проводилась при помощи программы MODEL для многофакторных зависимостей с использованием метода наименьших квадратов. В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии без воздействия смазочного материала и с использованием ПОЖ «Maxflight 04» и «Octaflo EG».

План эксперимента в натуральных значениях		
Температура окружающей среды Т _{ср} , °С	Влажность грунта W, %	Время контакта системы «грунт – металл» t, мин
–35	7,5	3
	7,5	7
	12,5	5
	17,5	3
	17,5	7
–15	7,5	5
	12,5	3
	12,5	5
	12,5	7
	17,5	5
+5	7,5	3
	7,5	7
	12,5	5
	17,5	3
	17,5	7
Результаты замеров силы сдвига, Н		
Без воздействия	С применением ПОЖ «Maxflight 04»	С применением ПОЖ «Octaflo EG»
92.73	30.4	32.1
174.2	62.74	65.3
186.54	78.91	80.76
218.54	134.2	136.9
400	159.89	162.43
63.74	38.25	40.3
78.45	50.01	51.9
144.2	56.88	58.12
240.3	58.84	61.4
228.5	94.14	96.6
11.6	4.2	5.8
15.2	5.1	6.57
17.9	8.3	9.64
24.3	14.8	16.1
31.7	17.4	18.97

Без воздействия ПОЖ:

$$Y_{БВ} = 134.3 + 1.026 \cdot T_{cp} - 4.3 \cdot W - 46.08 \cdot t - 0.1 \cdot T_{cp}^2 + 0.1074 \cdot W^2 + 3.985 \cdot t^2 - 0.4 \cdot T_{cp} \cdot W - 0.8 \cdot T_{cp} \cdot t + 1.3 \cdot W \cdot t$$

С использованием ПОЖ «Maxflight 04»:

$$Y_{Maxflight} = 41.22 + 0.66 \cdot T_{cp} - 8.14 \cdot W + 4.4 \cdot t - 0.03 \cdot T_{cp}^2 + 0.43 \cdot W^2 - 0.27 \cdot t^2 - 0.22 \cdot T_{cp} \cdot W - 0.17 \cdot T_{cp} \cdot t - 0.062 \cdot W \cdot t$$

С использованием ПОЖ «Octaflo EG»:

$$Y_{Octaflo} = 45.03 + 0.64 \cdot T_{cp} - 8.4 \cdot W + 3.93 \cdot t - 0.03 \cdot T_{cp}^2 + 0.44 \cdot W^2 - 0.21 \cdot t^2 - 0.224 \cdot T_{cp} \cdot W - 0.172 \cdot T_{cp} \cdot t - 0.07 \cdot W \cdot t$$

Так как уравнения являются многофакторными (их невозможно отобразить на обычном плоскостном графике), необходимо на их основе построить квазиоднофакторные зависимости при фиксированных значениях двух факторов из трех.

Полученные однофакторные уравнения представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

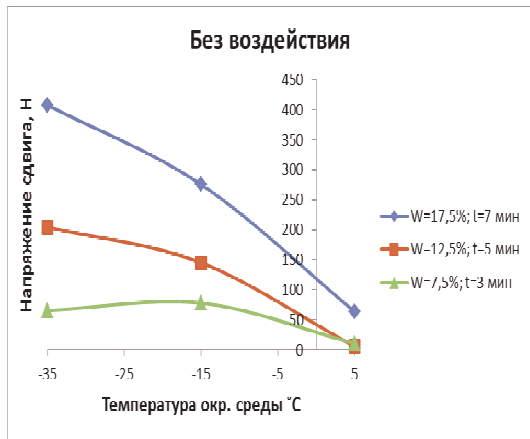
Однофакторные уравнения напряжения сдвига без применения ПОЖ

Без применения ПОЖ				
№	Натуральные значения факторов			Однофакторные уравнения
	Т _{ср} , °С	W, %	t, мин	
Напряжение сдвига, Н				
1	-	17.5	7	$Y = 123.9 - 11.6 \cdot T_{cp} - 0.1 \cdot T_{cp}^2$
	-	12.5	5	$Y = 47.81 - 7.974 \cdot T_{cp} - 0.1 \cdot T_{cp}^2$
	-	7.5	3	$Y = 34.97 - 4.374 \cdot T_{cp} - 0.1 \cdot T_{cp}^2$
2	5	-	7	$Y = -18.365 + 2.8 \cdot W + 0.1074 \cdot W^2$
	-15	-	5	$Y = 25.635 + 8.2 \cdot W + 0.1074 \cdot W^2$
	-35	-	3	$Y = -42.485 + 13.6 \cdot W + 0.1074 \cdot W^2$
3	5	17.5	-	$Y = 59.57 - 27.33 \cdot t + 3.985 \cdot t^2$
	-15	12.5	-	$Y = 134.4 - 17.83 \cdot t + 3.985 \cdot t^2$
	-35	7.5	-	$Y = 54.7 - 8.33 \cdot t + 3.985 \cdot t^2$

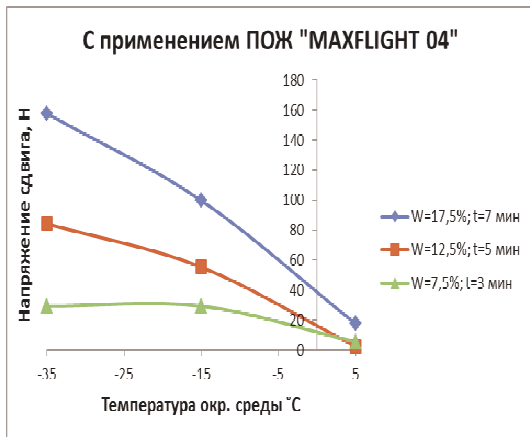
Таблица 3

Однофакторные уравнения напряжения сдвига с применением ПОЖ

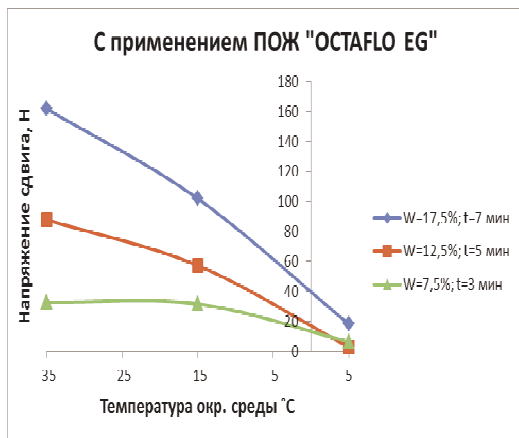
С применением противоблуденительных жидкостей				
№	Натуральные значения факторов			Однофакторные уравнения
	Т _{ср} , °С	W, %	t, мин	
ПОЖ «Maxflight 04»				
Напряжение сдвига, Н				
1	-	17.5	7	$Y = 40.43 - 4.4 \cdot T_{cp} - 0.03 \cdot T_{cp}^2$
	-	12.5	5	$Y = 18 - 2.94 \cdot T_{cp} - 0.03 \cdot T_{cp}^2$
	-	7.5	3	$Y = 13.7 - 1.5 \cdot T_{cp} - 0.03 \cdot T_{cp}^2$
2	5	-	7	$Y = 55.39 - 9.7 \cdot W + 0.43 \cdot W^2$
	-15	-	5	$Y = 52.57 - 5.15 \cdot W + 0.43 \cdot W^2$
	-35	-	3	$Y = 9.99 - 0.626 \cdot W + 0.43 \cdot W^2$
3	5	17.5	-	$Y = 13.8 + 2.465 \cdot t - 0.27 \cdot t^2$
	-15	12.5	-	$Y = 31.26 + 6.2 \cdot t - 0.27 \cdot t^2$
	-35	7.5	-	$Y = 2.26 + 9.9 \cdot t - 0.27 \cdot t^2$
ПОЖ «Octaflo EG»				
1	-	17.5	7	$Y = 41.425 - 4.484 \cdot T_{cp} - 0.03 \cdot T_{cp}^2$
	-	12.5	5	$Y = 18.805 - 3.02 \cdot T_{cp} - 0.03 \cdot T_{cp}^2$
	-	7.5	3	$Y = 15.105 - 1.556 \cdot T_{cp} - 0.03 \cdot T_{cp}^2$
2	5	-	7	$Y = 58.68 - 10.01 \cdot W + 0.44 \cdot W^2$
	-15	-	5	$Y = 55.98 - 5.39 \cdot W + 0.44 \cdot W^2$
	-35	-	3	$Y = 13.84 - 0.77 \cdot W + 0.44 \cdot W^2$
3	5	17.5	-	$Y = 15.63 + 1.845 \cdot t - 0.21 \cdot t^2$
	-15	12.5	-	$Y = 34.43 + 5.635 \cdot t - 0.21 \cdot t^2$
	-35	7.5	-	$Y = 6.43 + 9.425 \cdot t - 0.21 \cdot t^2$



а)



б)

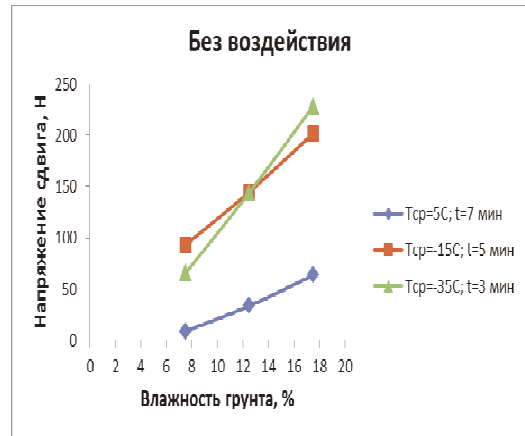


в)

Рис. 1. Зависимости напряжения сдвига от температуры окружающей среды в натуральных значениях: а) без воздействия на контактную зону; б) с применением ПОЖ «Maxflight 04»; в) с применением ПОЖ «Octaflo EG»

Анализ данных зависимостей в исследованном диапазоне изменения факторов показывает, что с понижением температуры окружающей среды напряжение сдвига увеличивается как с воздействием ПОЖ, так и без ее воздействия. С применением ПОЖ «Maxflight 04» напряжение сдвига уменьшается: при влажности грунта $W = 17,5\%$ и времени контакта $t = 7$ мин — на 55 %; при влажности грунта $W = 12,5\%$ и времени контакта $t = 5$ мин — на 59%; при влажности грунта

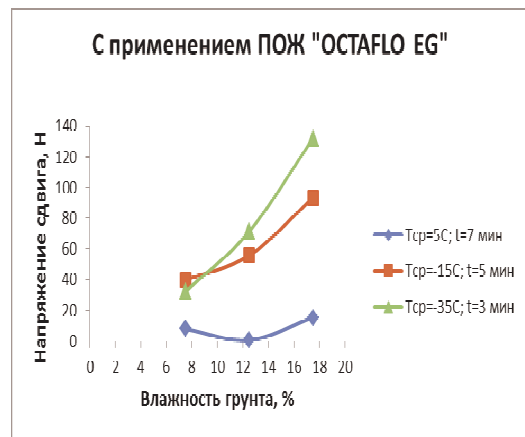
$W = 7,5\%$ и времени контакта $t = 3$ мин — на 51 %. С применением противообледенительной жидкости «Octaflo EG» напряжение сдвига также уменьшается: при влажности грунта $W = 17,5\%$ и времени контакта $t = 7$ мин — на 53%; при влажности грунта $W = 12,5\%$ и времени контакта $t = 5$ мин — на 57 %; при влажности грунта $W = 7,5\%$ и времени контакта $t = 3$ мин — на 49 %.



а)



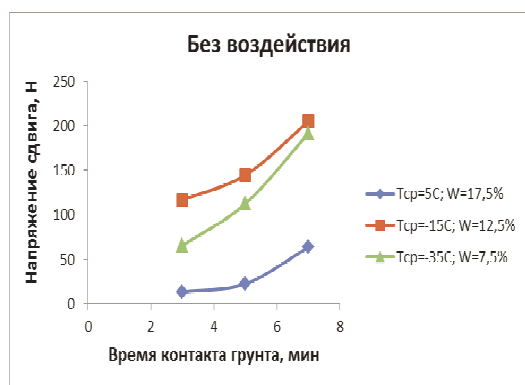
б)



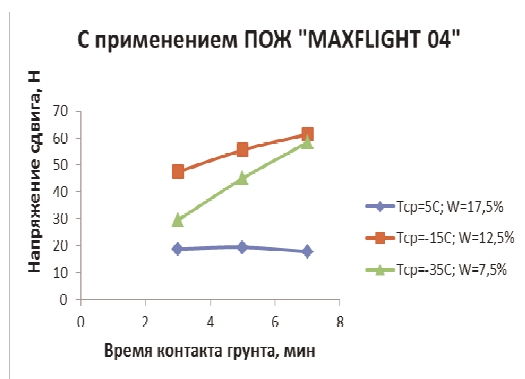
в)

Рис. 2. Зависимости напряжения сдвига от влажности грунта в натуральных значениях: а) без воздействия на контактную зону; б) с применением ПОЖ «Maxflight 04»; в) с применением ПОЖ «Octaflo EG»

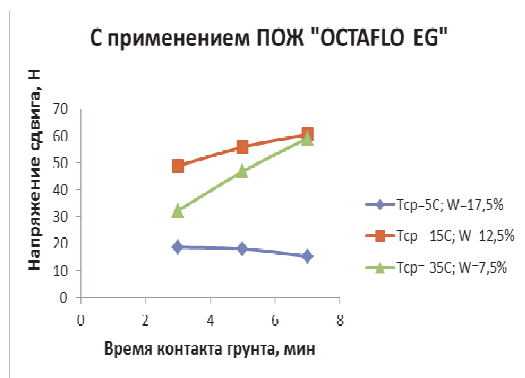
Анализ данных зависимостей показывает, что с увеличением влажности грунта напряжение сдвига увеличивается. С применением противообледенительной жидкости «Maxflight 04» напряжение сдвига уменьшается: при температуре окружающей среды $T_{cp} = 5^{\circ}C$ и времени контакта $t = 7$ мин — на 43 %; при температуре окружающей среды $T_{cp} = -15^{\circ}C$ и времени контакта $t = 5$ мин — на 48 %; при температуре окружающей среды $T_{cp} = -35^{\circ}C$ и времени контакта $t = 3$ мин — на 45 %. С применением противообледенительной жидкости «Octaflo EG» напряжение сдвига также уменьшается: при температуре окружающей среды $T_{cp} = 5^{\circ}C$ и времени контакта $t = 7$ мин — на 41 %; при температуре окружающей среды $T_{cp} = -15^{\circ}C$ и времени контакта $t = 5$ мин — на 46 %; при температуре окружающей среды $T_{cp} = -35^{\circ}C$ и времени контакта $t = 3$ мин — на 43 %.



а)



б)



в)

Рис. 3. Зависимости напряжения сдвига от времени контакта грунта в натуральных значениях: а) без воздействия на контактную зону; б) с применением ПОЖ «Maxflight 04»; в) с применением ПОЖ «Octaflo EG»

Анализ данных зависимостей показывает, что с увеличением времени контакта грунта с металлической поверхностью напряжение сдвига увеличивается. С применением противообледенительной жидкости «Maxflight 04» напряжение сдвига уменьшается: при температуре окружающей среды $T_{cp} = 5^{\circ}C$ и влажности грунта $W = 17,5\%$ — на 28 %; при температуре окружающей среды $T_{cp} = -15^{\circ}C$ и влажности грунта $W = 12,5\%$ — на 36 %; при температуре окружающей среды $T_{cp} = -35^{\circ}C$ и влажности грунта $W = 7,5\%$ — на 32 %. С применением противообледенительной жидкости «Octaflo EG» напряжение сдвига также уменьшается: при температуре окружающей среды $T_{cp} = 5^{\circ}C$ и влажности грунта $W = 17,5\%$ — на 26 %; при температуре окружающей среды $T_{cp} = -15^{\circ}C$ и влажности грунта $W = 12,5\%$ — на 34 %; при температуре окружающей среды $T_{cp} = -35^{\circ}C$ и влажности грунта $W = 7,5\%$ — на 30 %.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований влияния профилактического действия на адгезию грунтов к металлической поверхности при отрицательной температуре позволяют сделать ряд выводов и практических рекомендаций. Проведен эксперимент по использованию противообледенительной жидкости в качестве профилактического метода для создания промежуточного слоя на границе контакта для снижения адгезии грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин. Произведена математическая обработка многофакторных зависимостей по результатам экспериментальных данных для получения уравнений регрессии. Построены квазиоднофакторные зависимости.

Реализация выявленных методов и конструктивных решений позволяет обеспечить повышение эффективности землеройных машин, разрабатывающих влажный грунт в условиях отрицательных температур.

Литература

1. Зеньков С.А., Балахонов Н.А., Игнатъев К.А. Анализ возможного повышения производительности экскаваторов при устранении адгезии грунта к ковшу // Вестн. МГСУ. 2014. № 2. С. 98-104.
2. Зеньков С.А., Игнатъев К.А., Филонов А.С. Применение пьезокерамических трансдюсеров для снижения адгезии при разработке связных грунтов // Вестн. Тадж. техн. ун-та. 2013. № 4 (24). С. 17-22.
3. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties // Journal of Terramechanics. 1999. № 36. P. 39-49.
4. Зеньков С.А., Балахонов Н.А., Игнатъев К.А., Кожевников А.С. Неметаллические покрытия как профилактическое средство снижения адгезии на отвальных рабочих органах землеройных машин // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 2. С. 30-35.
5. Зеньков С.А., Булаев К.В., Батуро А.А. Планирование эксперимента для определения влияния жидкостного слоя на сопротивление сдвигу грунта по металлической поверхности при отрицательной температуре // Механика XXI века. 2006. № 5. С. 84-87.
6. Зеньков С.А., Жидовкин В.В., Нечаев А.Н. Снижение адгезии грунтов с помощью ремонтно-восстановительных составов // Труды Братского государственного

университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2010. Т. 2. С. 127-131.

7. Зеньков С.А., Козик А.С., Буйлов О.А. Применение полимерных противоналипающих листов для снижения адгезии грунтов к рабочим органам землеройных машин // Механики XXI века. 2010. № 9. С. 112-114.

8. Зеньков С.А., Игнатъев К.А., Филонов А.С., Балахонов Н.А. Определение рациональных параметров оборудования теплового действия к рабочим органам землеройных машин для разработки связных грунтов // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. 2013. Т. 2, № 2. С. 124-129.

9. Зеньков С.А., Кобзов Д.Ю., Батуру А.А., Булаев К.В. Кош экскаватора: пат. 22287640 Рос. Федерация; 24.05.05.

10. Зеньков С.А., Игнатъев К.А. Влияние ультразвукового воздействия на адгезию грунтов к рабочим органам землеройных машин // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 2. С. 43-45.

11. Зеньков С.А., Курмашев Е.В., Красавин О.Ю. Анализ повышения производительности экскаваторов при использовании пьезокерамических трансдюсеров // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 4. С. 38-41.

12. Противообледенительные жидкости // Octafluid: сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <http://octafluid.com/products/pozh/> (дата обращения: 23.09.2015).

13. Зеньков С.А., Кобзов Д.Ю., Курмашев Е.В. Стенд сдвиговый: пат. 2460989. Рос. Федерация; 28.09.10.

14. Зеньков С.А., Булаев К.В., Батуру 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.

15. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Зеньков С.А., Журавчук С.В. Сдвиговой стенд: пат. 1310696. Рос. Федерация 12.12.85.

16. Зеньков С.А., Игнатъев К.А., Филонов А.С., Балахонов Н.А. Устранение налипания грунта на рабочие органы землеройных машин с использованием пьезокерамических излучателей // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2013. Т. 1. С. 64-72.

17. Зеньков С.А., Диппель Р.А., Булаев К.В., Батуру А.А. Планирование эксперимента по исследованию влияния параметров теплового воздействия на сопротивление сдвигу грунта // Механики XXI века. 2005. № 4. С. 52-56.

References

1. Zen'kov S.A., Balakhonov N.A., Ignat'ev K.A. Analysis of the possible increase of the excavators productivity after removing soil adhesion to the scoop // Vestn. MGSU. 2014. № 2. P. 98-104.

2. Zen'kov S.A., Ignat'ev K.A., Filonov A.S. Application of piezoceramic transducers to reduce the adhesion when developing coherent soil // Vestn. Tadzh. tekhn. un-ta. 2013. № 4 (24). P. 17-22.

3. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties // Journal of Terramechanics. 1999. № 36. P. 39-49.

4. Zen'kov S.A., Balakhonov N.A., Ignat'ev K.A., Kozhevnikov A.S. Nonmetallic coverings as a prophylactic of decrease in adhesion on dump working bodies of earth-moving machines // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2013. Т. 2. P. 30-35.

5. Zen'kov S.A., Bulaev K.V., Batur A.A. Design of Experiments for determining the influence of the liquid layer on the shear resistance of the soil along the metal surface at temperatures below freezing // Mekhaniki XXI veku. 2006. № 5. P. 84-87.

6. Zen'kov S.A., Zhidovkin V.V., Nechaev A.N. Decrease in adhesion of soil by means of repair and recovery structures // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2010. Т. 2. P. 127-131.

7. Zen'kov S.A., Kozik A.S., Builov O.A. Application of anti-sticking sheets for reduction of soil adhesion with work surface of digging machines // Mekhaniki XXI veku. 2010. № 9. P. 112-114.

8. Zen'kov S.A., Ignat'ev K.A., Filonov A.S., Balakhonov N.A. Definition of rational parameters of thermal equipment to working bodies moving machines for a cohesive soil // Vestnik Saratov State Technical University. 2013. Т. 2, № 2. P. 124-129.

9. Zen'kov S.A., Kobzov D.Yu., Batur A.A., Bulaev K.V. Excavator bucket: pat. 22287640 Ros. Federatsiya; 24.05.05.

10. Zen'kov S.A., Ignat'ev K.A. Ultrasonic impact effect on the soil adhesion against work tools of earth-moving machines // Systems. Methods. Technologies. 2012. № 2. P. 43-45.

11. Zen'kov S.A., Kurmashev E.V., Krasavin O.Yu. Analysis of efficiency increase of excavators while using piezoelectric transducer // Systems. Methods. Technologies. 2009. № 4. P. 38-41.

12. Deicing fluid [Elektronnyi resurs] // URL: [http:// Octafluid.com: the site of the company /products/pozh/](http://Octafluid.com: the site of the company /products/pozh/) (data obrashcheniya: 23.09.2015).

13. Zen'kov S.A., Kobzov D.Yu., Kurmashev E.V. Stand shift: pat. 2460989. Ros. Federatsiya; 28.09.10.

14. Zen'kov S.A., Bulaev K.V., Batur A.A., Dippel' R.A. Stand for investigation of the effect of intensifying the strength of the impact of freezing the ground with a metal surface of the working body // Mekhaniki XXI veku. 2005. № 4. P. 44-49.

15. Balovnev V.I., Bakatin Yu.P., Zen'kov S.A., Zhuravchuk S.V. Stand shift: pat. 1310696. Ros. Federatsiya 12.12.85.

16. Zen'kov S.A., Ignat'ev K.A., Filonov A.S., Balakhonov N.A. Removing soil sticking to the working bodies of earthmoving machines with piezoceramic transducers // Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse. 2013. Т. 1. P. 64-72.

17. Zen'kov S.A., Dippel' R.A., Bulaev K.V., Batur A.A. Planning an experiment to study the influence of parameters of thermal effects on shear strength of soil // Mekhaniki XXI veku. 2005. № 4. P. 52-56.