

С.С. Жуков
ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НА МЕСТНОСТИ
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет
Княгинино, Россия

Рассмотрены условия функционирования аграрной техники в сельскохозяйственной местности. Основной объект исследования – изменение физико-механических свойств опорной поверхности в течение года. Располагая информацией о значениях механики грунта в начале периода функционирования техники на местности, можно определить степень подвижности машинно-тракторного парка. Для понимания общей картины взаимодействия внутри системы «двигатель – опорная поверхность» необходимо понимать процесс изменения физико-механических характеристик в течение необходимого диапазона времени. Информация о протекании естественных процессов внутри грунтового основания может быть использована для определения подвижности машин любого назначения.

Ключевые слова: подвижность, транспортно-технологическая машина, местность, физико-механические характеристики, модуль упругости, удельное сцепление грунта, угол внутреннего трения.

Введение

Процесс эксплуатации любой транспортно-технологической машины можно описать с позиции трех видов условий [1]: 1) технические; 2) природно-климатические; 3) дорожно-транспортные. Для нашего исследования условия погоды и климата в целом являются первостепенными, так как ни в одной из областей техники нет такой причинно-следственной связи в системе «погодно-климатические условия – машина». Специфика функционирования сельскохозяйственных машин и агрегатов заключается в том, что они жестко привязаны к переменчивым физико-механическим характеристикам опорной поверхности, что сказывается на подвижности в период посева, обработки полей и уборки урожая [2-4]. В целом свойства грунта зависят от двух параметров: пространственно-временных и природно-климатических. Пространственно-временной эффект рассматривается как самостоятельный фактор по причине того, что на определенном участке исследования, например, 1х1 км, тип почвы может не только различаться, но и меняться плотностью ввиду естественных природных процессов. Так как машины аграрного назначения перемещаются в пространстве, то сталкиваются с различными видами грунтов [5]. Характеристики природно-климатического фактора выражаются также в плотности и влажности ввиду выпадения осадков. Оба параметра напрямую влияют на механику взаимодействия двигателя и несущей поверхности [6-11].

Для выяснения дискретности опорной поверхности в сельскохозяйственной местности было проведено исследование физико-механических характеристик грунта типовых участков движения в течение сельскохозяйственного сезона. Полученные результаты актуальны только для аграрных земель, но алгоритм определения применим для всех типов почв и климата.

Местность проведения исследования

В работе [1] рассматриваются виды несущей поверхности в сельском хозяйстве. Наше исследование сосредоточено на наблюдении механической природы именно грунтовой поверхности. В 2020 г. было проведено исследование типовой местности в районе с. Белка Княгининского района Нижегородской области (рис. 1).



Рис. 1. Спутниковая карта местности исследования с сервиса Яндекс. Карты

На карте указано расположение пяти участков и двух населенных пунктов: с. Белка и д. Большие Колковницы. Участки представлены в виде двух полей, целины и грунтовой дороги. Ключевая особенность объектов в том, что они расположены на неоднородном рельефе местности и состоят из различных типов почв. Так, участок № 1 находится на склоне и представлен суглинком, а участок № 4 на равнинной части – чернозем, а на склоне – суглинок (это видно на карте). Участок № 2 – грунтовая дорога с суглинистой поверхностью, участок № 5 – часть грунтовой дороги, уплотненная кирпичом. Участок № 3 – целина, которая не используется для передвижения транспорта и к середине лета покрыта густой растительностью высотой 30-40 см.

Условия и методика проведения исследования

Перед проведением эксперимента были заданы три условия, задающие рамки исследования.

1. Период исследования: апрель – октябрь 2020 г. Данный период выбран ввиду активного проведения сельскохозяйственной деятельности.
2. Количество проведенных измерений – 1 раз в месяц. Разрешалось проводить несколько измерений, если было обильное выпадение осадков.
3. Каждой точке присваивается GPS координата для облегчения проведения последующих замеров.

Обработка результатов состояла из двух этапов [13]: первый этап проводился непосредственно в поле, второй этап – при помощи математического аппарата. Каждый участок делился на зоны, которые сформируют полную картину физико-механических характеристик: несколько зон на границах участках, остальные зоны разбросаны внутри участка. Внутри каждой зоны проводится десять замеров и переписываются показания пенетromетра. Также берется проба грунта для определения плотности и влажности. Непосредственно в поле определяется масса влажного грунта и после просушки мы получали массу сухого грунта. Разница масс позволяет определить среднюю влажность зоны. Полученные данные представлены в табл. 1. Следует заметить, что важным является указание погодных условий для получения определенных выводов о состоянии грунта. Также особое значение представляет диаметр насадки пенетromетра, так как различные поверхности обладают неодинаковой плотностью, и погружение насадки в грунт не предоставляется возможным.

Таблица 1.
Пример сводки данных

Дата, время	Погодные условия	Прямоугольная зона №	Замер №	Координаты	Диаметр насадки пенетрометра, мм	Значение индикатора пенетрометра, мкм	Влажность, %	Плотность, г/см ³
14.04.20 12.00-14.00	Солнце, +13-14 °С	1	1	55,759579 45,147590	11	75	16,50%	1,11 г/см ³
			2	55,7595712 45,1490487		17		
			3	55,759571 45,149049		15		
			4	55,758759 45,147522		25		
			5	55,759558 45,147883		26		
			6	55,759604 45,148567		25		
			7	55,759030 45,148835		17		
			8	55,759008 45,148107		20		
			9	55,759181 45,148598		20		
			10	55,759306 45,148223		35		

Второй этап заключался в обработке полученных данных эмпирическим методом. По значениям показания пенетрометра вычислялись такие величины, как: модуль упругости E ($\frac{H}{cm^2}$), удельное сцепление грунта, C (МПа) и угол внутреннего трения, ϕ . Алгоритм расчета представлен на рис. 3. Таким образом было обработано свыше полторы тысячи данных, что позволяет получить определенные результаты эксперимента.

По итогам проведенных расчетов получены величины, которые в совокупности представляют общую картину взаимодействия движителя и опорной поверхности.

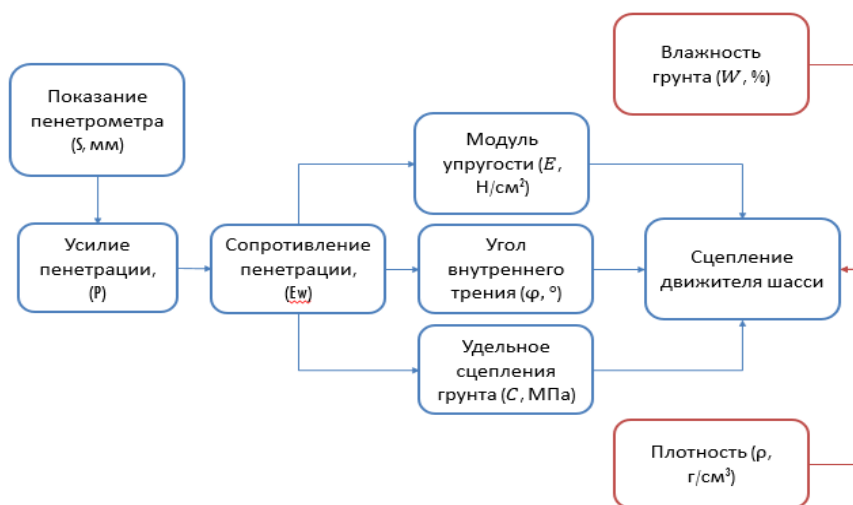


Рис. 2. Алгоритм расчета

Результаты

После получения необходимых данных был проведен анализ изменения физико-механических характеристик в течение проведения всего исследования. Далее представлены значения величин (рис. 3-7) в начале и конце исследования, так же приведены промежуточные значения для некоторых параметров.

а)

Участок №1		Апрель	Август	Октябрь	↑
Низкая влажность					
Плотность		$1,1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$1,38 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$1,25 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	56,57%
Влажность		0,35%		4,02%	
Модуль упругости, $E \left(\frac{\text{Н}}{\text{см}^2}\right)$		$15,6 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$		$65,85 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	
Удельное сцепление грунта, С (МПа)		13,9 МПа		34,4 МПа	
Угол внутреннего трения, φ		14,8		26,27	

б)

Участок №1		Апрель	Май	↑
Средняя влажность				
Плотность		$1,14 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$1,15 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	16,88 %
Влажность		9,9 %	10,46 %	
Модуль упругости, $E \left(\frac{\text{Н}}{\text{см}^2}\right)$		$15,5 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	$26,1 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	
Удельное сцепление грунта, С (МПа)		13,9 МПа	18,2 МПа	
Угол внутреннего трения, φ		14,8	17,2	

в)

Участок №1		Апрель	Октябрь	↑
Высокая влажность				
Плотность		$1,09 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$1,36 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	7,28 %
Влажность		16,9 %	16,65 %	
Модуль упругости, $E \left(\frac{\text{Н}}{\text{см}^2}\right)$		$22,4 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	$67,25 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	
Удельное сцепление грунта, С (МПа)		16,7 МПа	35 МПа	
Угол внутреннего трения, φ		16,4	26,59	

Рис. 3. Значения физико-механических характеристик участка № 1

- а) характеристики по зонам с низкой влажностью;
 б) характеристики по зонам со средней влажностью;
 в) характеристики по зонам с высокой влажностью

Необходимость группирования зон на области низкой, средней и высокой влажности появилась ввиду четкой границы между значениями. Области низкой влажности присущи зонам, расположенными ниже остальных зон, области высокой влажности – наоборот. По значениям и указателю можно определить рост всех показателей от апреля к октябрю. Также поле было прокультивировано и засеяно, что влияет на плотность и влажность. Стоит заметить, что увеличение значений зоны низкой влажности составляет больше 50 %. Такое увеличение происходит по причине разворота техники на границах участка.

Участок №2	Апрель	Октябрь	
Плотность	$2,26 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$2,71 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	↑ 9,83%
Влажность	10,4 %	13,28 %	
Модуль упругости, $E \left(\frac{\text{Н}}{\text{см}^2}\right)$	$13,1 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	$14,1 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	
Удельное сцепление грунта, С (МПа)	13 МПа	13,1 МПа	
Угол внутреннего трения, φ	14,24	14,46	

Рис. 4. Характеристики участка № 2

Рост физико-механических характеристик участка № 2 составляет 9,83 %. Основная причина этого состоит в том, что дорога постоянно укатывается различной техникой и полностью состоит из суглинка. Плотность дороги изначально принимает высокое значение, поэтому изменение ее плотности происходит незначительно.

Участок №3	Апрель	Октябрь	
Плотность	$1,27 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$1,5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	↑ 36,26%
Влажность	6 %	3,96 %	
Модуль упругости, $E \left(\frac{\text{Н}}{\text{см}^2}\right)$	$12,34 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	$74,17 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	
Удельное сцепление грунта, С (МПа)	12,6 МПа	37,8 МПа	
Угол внутреннего трения, φ	14,1	28,16	

Рис. 5. Характеристики участка № 3

Аналогичный рост наблюдается у целинного участка. Основная причина – развитие корневой системы растений, которые увеличивают плотность, а влага является питательной базой и потребляется растениями в период вегетационного процесса.

Из всех показателей наблюдается рост плотности по причине неоднократного выезда аграрных ТТМ в поле: культивация, посев, обработка и уборка урожая. В период вегетационного процесса влажность грунта потребляется самими растениями и ее значение уменьшается. Так как участок частично состоит из суглинка и находится на склоне, механические значения снижаются из-за смыва грунта вниз по течению.

Данный участок был уплотнен искусственным путем и в течение сезона механические значения не менялись. Величины плотности и влажности менялись под влиянием погодных-климатических условий. Значительный рост плотности зафиксирован в октябре после значительного передвижения техники, так и повышение влажности было следствием обильных осадков. Произведя несложный расчет общего процента роста всех показателей, мы получили значение +20,5 %, т.е. осенние значения отличаются от весенних.

Участок №4	Апрель	Октябрь	
Плотность	$1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$1,54 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	
Влажность	5,1 %	4,52 %	
Модуль упругости, $E \left(\frac{\text{Н}}{\text{см}^2} \right)$	$23 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	$22,52 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	
Удельное сцепление грунта, C (МПа)	17,2 МПа	16,73 МПа	
Угол внутреннего трения, φ	16,6	16,38	
			- 4,38 %

Рис. 6. Характеристики участка № 4

Участок №5	Апрель	Октябрь	
Плотность	$1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$1,85 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	+ 85%
Влажность	0 %	2,1 %	+ 100%
Модуль упругости, $E \left(\frac{\text{Н}}{\text{см}^2} \right)$	$28,3 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	$28,23 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$	- 0,25%
Удельное сцепление грунта, C (МПа)	19,1 МПа	19,1 МПа	0 %
Угол внутреннего трения, φ	17,7	17,7	0 %

Рис. 7. Характеристики участка № 5

На основании полученных результатов относительно транспортно-технологических машин по аналогии можно говорить о варьировании подвижности машин. По окончании расчетов сделаны четыре основных заключения.

1. На большинстве участков зафиксирован рост физико-механических характеристик ввиду следующих факторов:

- различная глубина залегания грунтовых вод;
- механическое воздействие на грунт транспортно-технологических машин;
- обилие осадков было умеренным, поэтому суглинок не смывало вниз по склону;
- наличие лесополосы рядом с участком ухудшает испарение влажности, значит, ее концентрация в почве высокая.

2. Рост механических характеристик происходит вследствие интенсивного движения транспортно-технологических машин.

3. Влажность в грунте в начальный период исследования выше, чем в окончательный. Созревание растений в вегетационный период потребляет определенное количество влаги из почвы.
4. Лето 2020 г. было умеренным, жара чередовалась с дождями, не было ни затяжной засухи, ни сезона дождей.

Выводы

По окончании обработки результатов исследования физико-механических характеристик типовых опорных поверхностей мы получили определенные выводы, описывающие взаимодействие полотна пути и машины.

1. Транспортно-технологические машины сельскохозяйственного назначения в значительной степени подвержены влиянию состояния полотна пути и наоборот, т.е. наблюдается обратное взаимодействие системы.
2. Полотно пути на сельскохозяйственных территориях неоднородно по своему составу и физико-механическим характеристикам в пространственно-временном векторе, изменение двух точек на одном грунте также происходит неравномерно.
3. В течение сельскохозяйственного сезона физико-механические характеристики полотна пути непостоянны ввиду природно-климатических особенностей местности. Также следует заметить, что за последние 5-6 лет весенне-летний-осенний периоды каждый год разные и встречаются либо засушливые, либо дождливые года;
4. В процессе проектирования конструкции движителя необходимо учитывать дискретный характер параметров грунта на определенной траектории движения и местности в целом.
5. Проведенное нами исследование является частью полноценного обследования полотна пути любой местности. Наиболее полное представление движения будет только после составления математической модели микропрофиля местности.

Полученные результаты демонстрируют природу изменчивости и непостоянства дорожно-грунтового основания на сельскохозяйственных территориях и на любых несущих поверхностях в целом. Взяв данные наблюдения за точку отсчета расчета конструкции, они предоставляют картину обобщенной функции сцепления движителя с полотном пути Φ_ϕ , которая в свою очередь формирует критерий по запасу тягового усилия (проходимость), что в целом описывает подвижность транспортно-технологической машины любого назначения.

Библиографический список

1. Беляков, В.В. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин [Текст] / В.В. Беляков и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100) С. 145-175.
2. Барахтанов, Л.В. Пройодимость автомобиля [Текст] / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 1996. – 200 с.
3. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения. Научно-техническое издание [Текст] / Под. общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2004. – 961 с.
4. Wong, J.Y. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering [Текст] / J.Y Wong. – Elsevier, 2010. – 463 p.
5. Полотно пути транспортно-технологических машин. Учебник [Текст] / под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2014. – 447 с.
6. Макаров, В.С. Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон. Дисс.... докт. техн. наук: 05.05.03 М: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, 2017.
7. Вольская, Н.С. Оценка проходимости колесных машин при движении по неровной грунтовой поверхности [Текст] / Н.С. Вольская. – М.: МГИУ, 2007. – 215 с.
8. Вольская, Н.С. Разработка методов опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. – 485 с.

9. Беляев, А.М. Исследование движения шасси мобильного робототехнического комплекса с гусенично-модульным движителем по песчаному опорному основанию [Текст] / А.М. Беляев и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 2 (129). С. 94-106
10. Belyaev, A. Experimental Theoretical Study of the Mobile Robotic System Movement with Caterpillar-modular Propulsion on the Beach Line Terrain [Текст] / A. Belyaev [et al.] // Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VENITS 2020). P. 567-572.
11. Makarov, V. Study of trafficability conditions of typical soils of coastal zones of sakhalin island (Russian Federation) [Текст] / V. Makarov [et al.] // Paper presented at the 19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 2017.
12. Жуков, С. С. Взаимодействие движителя роботизированных сельскохозяйственных машин с полотном пути [Текст] / С. С. Жуков, В. В. Беляков, В. С. Макаров // Транспортные системы. 2018. № 3 (9). С. 25-33
13. Беляков, В.В. Подвижность наземных транспортно-технологических машин [Текст] / В.В. Беляков и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №4(101) С. 72-77
14. Bekker, M. Theory of land locomotion [Текст] / M. Bekker. – University of Michigan Press, 1960. – 520 р.
15. Вонг, Дж. Теория наземных транспортных средств [Текст] / Дж. Вонг. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.
16. Агейкин, Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. Теория и расчет [Текст] / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
17. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей [Текст] / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.