

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ТЯГОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЕКЦИИ ЗУБОВОЙ БОРНЫ С ПАРАЛЛЕЛОГРАММНОЙ ПОДВЕСКОЙ

Е. В. Шалонкина

Пружинные бороны – многофункциональные машины, используемые на различных агрофонах в различных системах обработки почвы. Они обладают высокой универсальностью и высокой производительностью. Качественного выполнения технологических операций в соответствии с агротребованиями, предъявляемыми к машинам данного типа, возможно добиться только в том случае, если все рабочие органы бороны одинаково воздействуют на обрабатываемую почву. Это в свою очередь может быть достигнуто при условии качественного копирования ими неровностей микрорельефа поверхности почвы. Ширина захвата пружинных борон составляет 15 м и более. Для обеспечения равномерной глубины обработки широкозахватные бороны оснащаются независимыми секциями, анализ данных технических решений показал, что такие системы не обеспечивают качественного копирования микрорельефа почвы. Разработанная конструкция секции для пружинной бороны имеет параллелограммную подвеску, она обеспечивает поступательное перемещение рамки с рабочими органами при копировании неровностей поверхности почвы, что позволяет создать условия для равномерной глубины обработки и повысит качество технологической операции. В целях изучения закономерности изменения тягового сопротивления от эксплуатационных параметров был разработан макет секции зубопружинной бороны для проведения экспериментальных исследований в лаборатории «Почвенный канал» Южно-Уральского ГАУ. Методика экспериментов предполагала определение физико-механических свойств почвы, подбор и подготовку измерительного оборудования, обработку и анализ полученных результатов. В качестве управляемых факторов были выбраны угол установки зубьев, скорость движения, усилие, развиваемое компенсирующей пружиной. На основе анализа полученных экспериментальных данных выявлено, что при увеличении угла установки пружинных зубьев с 30° до 90° и усилия компенсирующей пружины с 0,5 до 2,5 кН наблюдается рост тягового сопротивления макета секции с 0,2 до 0,8 кН. Также отмечается, что при увеличении глубины обработки почвы с 2,8 до 7,9 см тяговое сопротивление секции повышается.

Ключевые слова: пружинная борона, пружинный зуб, копирование микрорельефа, тяговое сопротивление.

Анализируя технологии обработки почвы, можно отметить, что важным их элементом являются операции, проводимые пружинными боронами. Бороны данного типа активно применяются и в традиционной, и в минимальной технологиях для поверхностного рыхления и выравнивания почвы, борьбы с сорняками, а также заделки минеральных удобрений. Пружинные бороны достаточно эффективны и при no-till, на технологических операциях, связанных с распределением пожнивных остатков по поверхности поля в целях интенсификации процессов мульчирования. Помимо универсальности пружинные бороны обладают более высокой производительностью [1, 2, 3].

Обзор и анализ актуальных научных исследований в области пружинных борон показал, что они посвящены отдельным частным вопросам. Так, в статье [4] исследуют характеристики трения и износа материала зуба шипа (сталь 65Мп) зубопружинной бороны для сбора арахиса. В работе [5] изучается экспериментальное исследование бороны с пружинными зубьями для возделывания сахарной свеклы. В статье [6] рассматривается влияние интенсивности боронования сорняков на ячменно-гороховую смесь на урожайность и микробиоту убранных зерновых с использованием зубовой бороны.

Проведенный обзор научных исследований не выявил работ, посвященных исследованию

систем копирования рельефа пружинных широкозахватных борон, что подтверждает актуальность темы исследования и работы по изучению технологических параметров секции зубопружинной бороны с параллелограммной подвеской.

Главными агротехническими показателями, определяющими качество работы пружинных борон, являются: равномерность глубины обработки, выровненность фона, степень крошения, равномерность распределения пожнивных остатков и т.д. Данные показатели могут быть обеспечены только в том случае, если все рабочие органы бороны одинаково воздействуют на обрабатываемую почву, что в свою очередь может быть достигнуто при условии качественного копирования ими неровностей микрорельефа поля. Пружинные же бороны имеют ширину захвата 15 метров и более, в связи с этим для обеспечения равномерной глубины обработки на них продолжительное время применяется размещение рабочих органов на независимых друг относительно друга секциях. Однако ранее проведенные обзоры показали многочисленные недостатки в конструктивном исполнении секций, что не позволяет обеспечить равномерную по глубине обработку почвы [7]. Принципиальным отличием разра-

ботанной секции бороны от имеющихся конструкций является параллелограммная подвеска рамки, которая обеспечивает поступательное перемещение ее полотна в вертикальной плоскости (рис. 1). Это в свою очередь создает условия для равномерного по глубине рыхления почвы всеми рядами рабочих органов при прохождении неровностей рельефа поля [8, 9, 10]. Новизна технического решения подтверждена патентом РФ на изобретение [11].

Принимая во внимание техническую новизну разработанной конструкции секции, актуальным является вопрос оценки энергетических показателей ее использования в зависимости от эксплуатационных режимов работы.

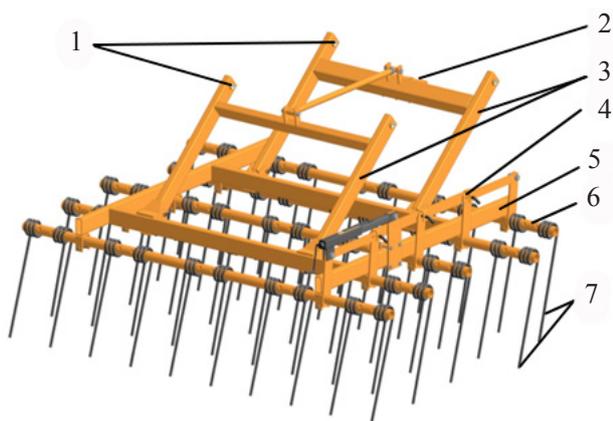
Цель исследований – определить на основании лабораторных экспериментов зависимость тягового сопротивления секции бороны от эксплуатационных режимов работы.

Методы исследования

Для достижения указанной цели было принято решение провести эксперимент в условиях лаборатории «Почвенный канал» Южно-Уральского ГАУ. Учитывая технические возможности лаборатории, составлена следующая программа экспериментальных исследований, которая включала в себя:

- разработку и изготовление лабораторной экспериментальной установки, адаптированной для условий почвенного канала;
- подбор и подготовку измерительного оборудования;
- определение физико-механических свойств почвы в почвенном канале во время проведения экспериментов;
- оценку величины тягового сопротивления макета секции бороны в зависимости эксплуатационных режимов;
- обработку и анализ полученных результатов.

Для проведения лабораторных экспериментов разработан и изготовлен макет рабочей секции бороны с параллелограммной подвеской рамки (рис. 2). Макет включает в себя опорную раму 1 для размещения на приводной тележке почвенного канала. Опорная рама соединяется при помощи двух пар наклонных тяг 2 с рамкой секции 3, на которой располагаются в три ряда опорные трубы 4 с пружинными зубьями 5. Конструкция макета имеет компенсирующую пружину 6, с возможностью регулирования



- 1 – места крепления секции к продольным опорам рамы; 2 – место крепления блока пружин; 3 – тяги параллелограммного механизма; 4 – механизм регулировки угла наклона зубьев; 5 – рамка секции; 6 – поперечная труба; 7 – зубопружинные рабочие органы

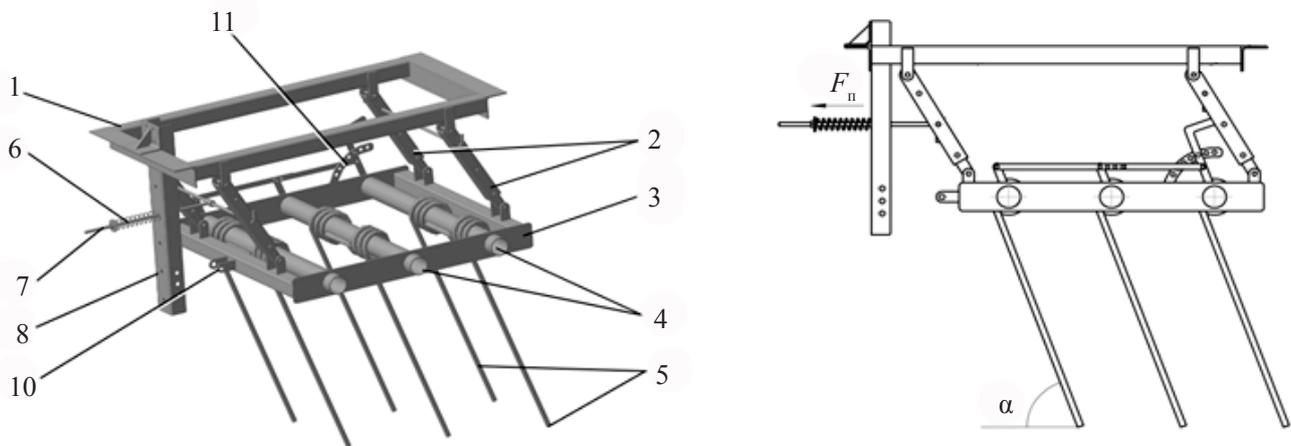
Рис. 1. Общий вид рабочей секции пружинной бороны с параллелограммной подвеской



усилия поджатия (F_n), а также механизм регулировки угла наклона (α) пружинных зубьев. Наличие проушины 10 и опорного швеллера 11 позволяет устанавливать стандартное S-образное тензовено для замера тягового сопротивления.

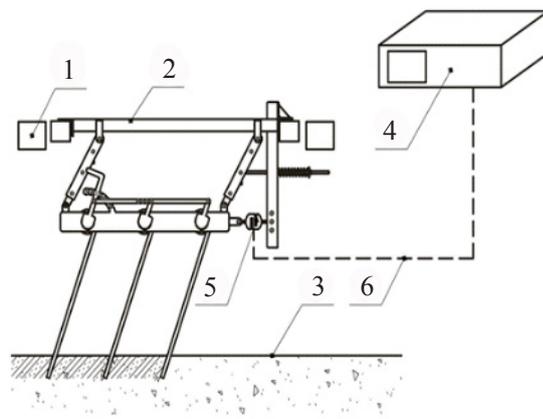
Таким образом, лабораторная установка для оценки тягового сопротивления включала в себя макет почвообрабатывающей секции бороны 2, который монтируется на приводной тележке почвенного канала 1 (рис. 3). Для оценки величины тягового сопротивления использовалось стандартное S-образное тен-

зовено с номинальным усилием 0,5 тонны (рис. 4б), которое располагалось между упорным швеллером и проушиной. Фиксация величины тягового сопротивления макета секции и обработка полученных сигналов производились при помощи измерительно-вычислительного комплекса МІС-400D (рис. 4а) с программным обеспечением для послезэкспериментальной обработки данных WinПІОС 3.2.8.31. Относительная погрешность измерения величины тягового сопротивления оттарированным тензовеном не превышала $\pm 1,5\%$.



- 1 – рама опорная; 2 – тяги параллелограммного механизма; 3 – рамка секции; 4 – трубы опорные;
 5 – зубопружинный рабочий орган; 6 – пружина компенсирующая; 7 – механизм регулировки пружины;
 8 – швеллер упорный; 9 – механизм регулировки угла установки зубопружинных рабочих органов;
 10 – проушина; 11 – механизм регулировки угла наклона зубьев

Рис. 2. Общий вид макета рабочей секции пружинной бороны для лабораторных экспериментов



- 1 – приводная тележка почвенного канала; 2 – секция бороны; 3 – почва; 4 – комплекс измерительно-вычислительный МІС-400D; 5 – тензовено 0,5 тонны; 6 – кабель измерительного канала

Рис. 3. Общий вид и схема лабораторной установки в почвенном канале

Тарирование измерительного канала комплекса МС-400D осуществлялось с использованием стенда ВИМ и образцового динамометра ТДС по методике, включающей в себя ступенчатое (пять точек) нагружение с нуля до усилия 0,5 тонны, кратковременный перегруз и ступенчатую разгрузку с 0,5 тонны до нуля.

Ориентируясь на ранее проведенные исследования и обзор литературы по теме в качестве управляемых факторов в опытах, было принято решение использовать: скорость движения v_p , м/с; угол наклона α пружинных зубьев, град.; величину усилия F_n , создаваемого компенсирующей пружиной секции, Н.

Скорость движения v_p секции бороны варьировалась за счет изменения передаточного числа в приводной станции почвенного канала и определялась как отношение пройденного тележкой расстояния ко времени, за которое данное расстояние пройдено. При использовании рулетки и электронного секундомера погрешность измерения v_p не превышала $\pm 1,5\%$. Угол наклона α пружинных зубьев настраивался при помощи регулировочного механизма секции

и контролировался угломером с погрешность не более $\pm 0,5\%$. Величина усилия F_n изменялась при помощи регулировочного механизма компенсирующей пружины и контролировалась на установке по величине межвиткового расстояния. Погрешность F_n не превышала $\pm 5\%$.

Величины управляемых факторов и диапазоны их варьирования представлены в таблице 1.

Откликом в эксперименте являлось тяговое сопротивление секции бороны $R_{ск}$, кН.

Оценка условий проведения эксперимента включала в себя определение влажности, твердости и плотности почвы в канале. Для оценки показателей использовались стандартные методики по ГОСТ 20915-2011 и ОСТ 102.2-2002.

Результаты исследований и обсуждение

Результаты оценки условий проведения эксперимента представлены в таблице 2. Условия проведения эксперимента определялись по стандартным методикам на лабораторном оборудовании, погрешности измерений при этом составили: влажность почвы $\pm 5\%$, твердость почвы $\pm 5\%$, плотность почвы $\pm 3\%$.

Таблица 1 – Управляемые факторы и интервалы их варьирования при оценке тягового сопротивления секции

№ п/п	Фактор	Единица измерения	Уровни			Интервал
			Нижний -1	Основной 0	Верхний +1	
1	Скорость, v_p	м/с	0,6	1,2	1,8	0,6
2	Угол наклона пружинных зубьев, α	град.	30	60	90	30
3	Усилие, развиваемое компенсирующей пружиной, F_n	кН	0,5	1,5	2,5	1,0

Таблица 2 – Условия проведения лабораторных экспериментов

Показатель	Значение
Влажность почвы, %, по слоям	
0...5	1,81
5...10	3,34
10...15	5,45
Твердость почвы, МПа, по слоям	
0...5	0,56
5...10	0,99
10...15	1,25
Плотность почвы, г/см ³ , по слоям	
0...10	1,21
10...20	1,37



Лабораторный эксперимент был реализован по плану однофакторного эксперимента, путем последовательного перебора всех управляемых факторов (табл. 1).

Эксперимент осуществлялся в следующей последовательности: после установки необходимых величин управляемых факторов (угла установки зубьев α , усилия натяжение пружины $F_{\text{п}}$) макет секции бороны протягивался при помощи приводной тележки по почвенному каналу с определенной скоростью $v_{\text{р}}$, при этом комплекс MIC-400D фиксировал величину тягового сопротивления $R_{\text{ск}}$. Результаты предварительной обработки экспериментальных данных получены в виде серии осциллограмм для каждого сочетания управляемых факторов. Пример обработанной осциллограммы представлен на рисунке 4.

Для статистической обработки полученных осциллограмм использовался пакет после экспериментальной обработки информации WinПОС 3.2.8.31. При помощи данной программы обрабатывался участок установившегося движения секции, вычислялись основные статистические характеристики случайной величины: математическое ожидание, стандартное отклонение, асимметрия, эксцесс, амплитуда и пр. Таким образом, в каждом опыте величина тягового сопротивления усреднялась

и принималась как математическое ожидание случайной величины.

Окончательно результаты эксперимента представлены в табличном (табл. 3) и графическом виде (рис. 5–7).

В результате экспериментальных исследований установлено, что наибольшее влияние на тяговое сопротивление макета секции оказывает глубина обработки почвы, a , которая зависит от угла наклона пружинных зубьев α , также значимое влияние на тяговое сопротивление оказывает усилие $F_{\text{п}}$ компенсирующей пружины.

Можно отметить, что при увеличении угла установки пружинных зубьев с 30 до 90° наблюдается последовательное возрастание тягового сопротивления $R_{\text{ск}}$ макета секции с $0,2$ до $0,8$ кН. Рост тягового сопротивления в данном случае обусловлен повышением глубины обработки с $2,8$ до $7,9$ см (рис. 6). Скорость перемещения секции при всех значениях углов α не оказывает существенного влияния на величину $R_{\text{ск}}$. Последний факт можно объяснить наличием в конструкции компенсирующей пружины, которая при одной и той же величине $F_{\text{п}}$, но при разных значениях скорости $v_{\text{р}}$ деформируется на различную величину. По этой причине имеется возможность некоторого выглабления рабочих органов из почвы с ростом скорости.

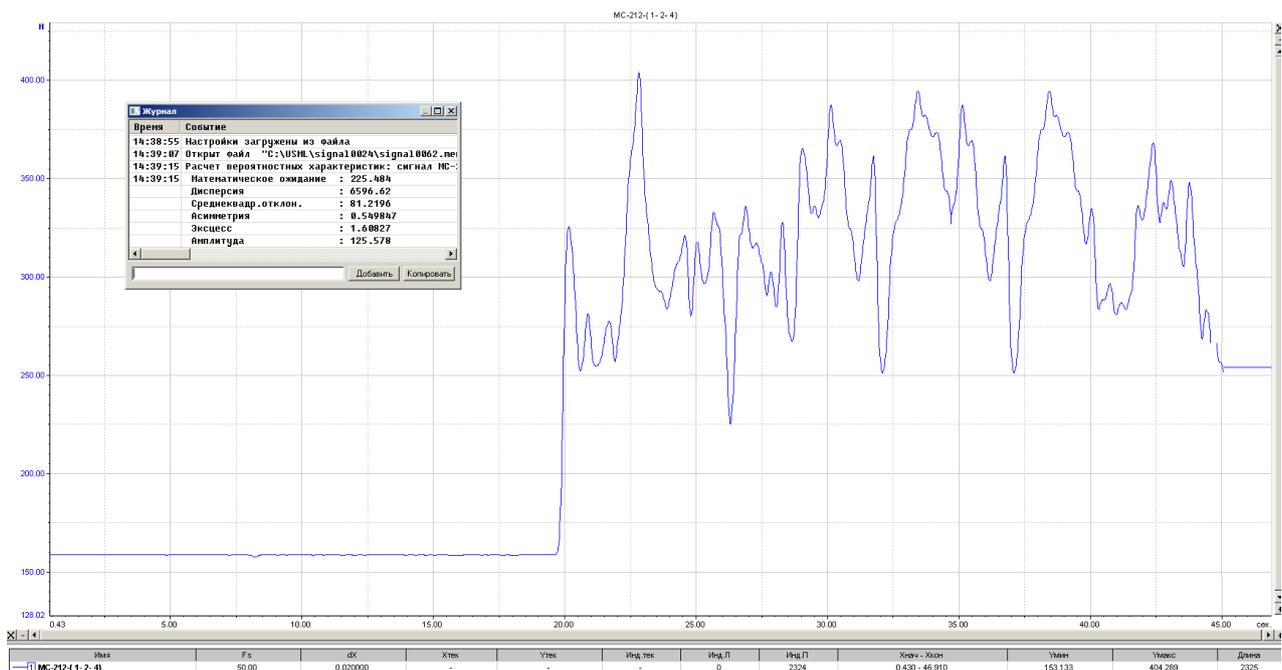


Рис. 4. Осциллограмма тягового сопротивления макета секции

Таблица 3 – Результаты оценки величины тягового сопротивления макета секции бороны в лабораторных условиях

Фактор	Величина	Тяговое сопротивление, $R_{ск}$, Н	Фактор	Величина	Тяговое сопротивление, $R_{ск}$, Н
Скорость v_p , м/с	0,5	215,48	Скорость v_p , м/с	1,5	842,44
Угол α , град.	30		Угол α , град.	90	
Усилие F_n , кН	0,5		Усилие F_n , кН	0,5	
Скорость v_p , м/с	1,0	202,64	Скорость v_p , м/с	1,5	263,04
Угол α , град.	30		Угол α , град.	30	
Усилие F_n , кН	0,5		Усилие F_n , кН	1,5	
Скорость v_p , м/с	1,5	194,01	Скорость v_p , м/с	1,5	266,60
Угол α , град.	90		Угол α , град.	30	
Усилие F_n , кН	0,5		Усилие F_n , кН	2,5	
Скорость v_p , м/с	0,5	515,20	Скорость v_p , м/с	1,5	576,40
Угол α , град.	60		Угол α , град.	60	
Усилие F_n , кН	0,5		Усилие F_n , кН	1,5	
Скорость v_p , м/с	1,0	519,30	Скорость v_p , м/с	1,5	622,12
Угол α , град.	60		Угол α , град.	60	
Усилие F_n , кН	0,5		Усилие F_n , кН	2,5	
Скорость v_p , м/с	1,5	545,14	Скорость v_p , м/с	1,5	823,53
Угол α , град.	60		Угол α , град.	90	
Усилие F_n , кН	0,5		Усилие F_n , кН	1,5	
Скорость v_p , м/с	0,5	809,99	Скорость v_p , м/с	1,5	864,94
Угол α , град.	60		Угол α , град.	90	
Усилие F_n , кН	0,5		Усилие F_n , кН	2,5	
Скорость v_p , м/с	1,0	798,99	Скорость v_p , м/с	1,5	279,60
Угол α , град.	90		Угол α , град.	30	
Усилие F_n , кН	0,5		Усилие F_n , кН	1,5	

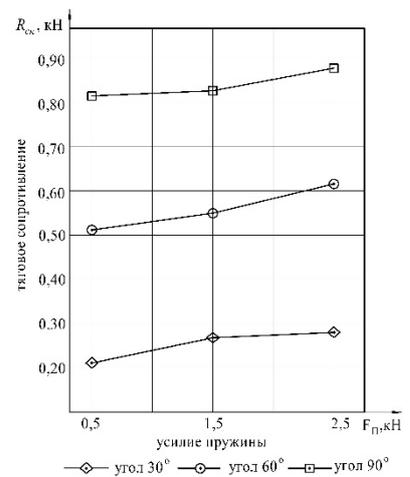
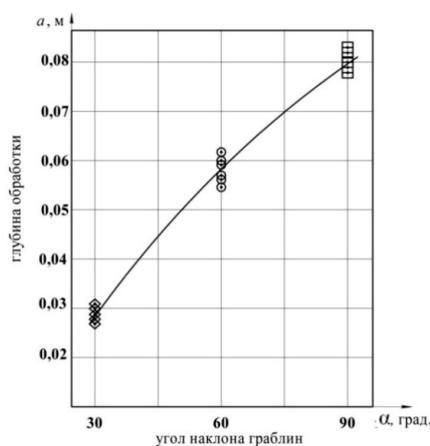
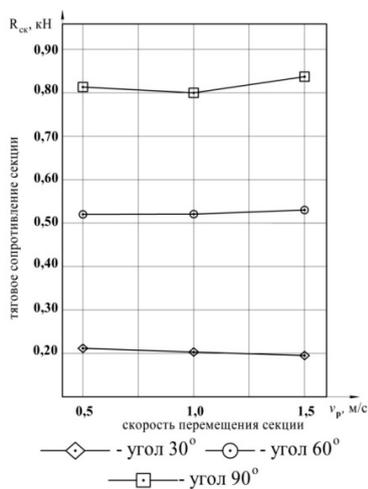


Рис. 5. Законмерность изменения тягового сопротивления макета секции в зависимости от угла установки пружинных зубьев и скорости перемещения (при $F_n = 0,5$ кН)

Рис. 6. Глубина обработки при различных углах пружинных зубьев

Рис. 7. Законмерность изменения тягового сопротивления макета секции в зависимости от угла установки граблей и усилия пружины



Отдельно следует отметить определенное влияние на $R_{ск}$ величины усилия $F_{п}$. Экспериментально установлено, что с увеличением $F_{п}$ от 0,5 до 2,5 кН тяговое сопротивление макета возрастает в среднем на 0,1 кН в независимости от угла α установки зубьев. Данная закономерность обусловлена повышением усилий, с которыми действуют рабочие органы на почву при росте $F_{п}$, в некоторой степени это аналогично процессу балластирования секции дополнительными грузами. Таким образом, на практике при использовании широкозахватной бороны возникает технологическая возможность индивидуальной подстройки секций для обеспечения необходимой глубины обработки в зависимости от свойств почвы и агрофона за счет регулировки усилия $F_{п}$.

Учитывая диапазоны изменения величины тягового сопротивления макета секции, полученные в ходе экспериментов ($R_{ск} = 0,2 \dots 0,8$ кН), имеется возможность с некоторыми допущениями определить тяговое сопротивление широкозахватной пружинной бороны, имеющей при ширине захвата 21 м 350 пружинных зубьев. Диапазон величин тягового сопротивления в данном случае будет варьироваться от 12,0 до 46,6 кН, при углах установки зубьев 30 и 90° соответственно.

Выводы

1. Описана методика лабораторных экспериментальных исследований, позволяющая оценить величину тягового сопротивления макета секции бороны с параллелограммной подвеской в зависимости от технологических параметров.

2. Экспериментально установлено увеличение тягового сопротивления $R_{ск}$ бороны в зависимости от углов α установки пружинных зубьев. Так, при увеличении α с 30 до 90° $R_{ск}$ повышается в среднем с 0,2 до 0,8 кН.

3. Экспериментально выявлена зависимость тягового сопротивления макета секции бороны от усилия $F_{п}$, развиваемого компенсирующей пружиной.

Так, увеличение усилия $F_{п}$ с 0,5 до 2,0 кН вызывает прирост тягового сопротивления в среднем на 0,10 кН вне зависимости от угла α .

Список литературы

1. Курач, А. А. Техничко-эксплуатационные показатели орудий для ранневесеннего бороно-

вания / А. А. Курач // Современное состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса : матер. Междунар. науч.-практ. конференции. – Курган : Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т. С. Мальцева, 2016. – С. 447–451.

2. Разработка технологии и изготовление импортозамещающего комплекса машин для возделывания сельскохозяйственных культур / Р. С. Рахимов, И. Р. Рахимов, Д. А. Ялалетдинов [и др.] // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2020. – Т. 21. – № 1. – С. 86–96.

3. Эффективность модернизированной влагоаккумулирующей технологии обработки почвы / Р. С. Рахимов, Н. К. Мазитов, Н. Т. Хлызов [и др.] // Вестник ЧГАА. – 2013. – Т. 64. – С. 66–70.

4. Wear and friction characteristics of 65mm steel for spike-tooth harrow / Z. Lu, C. Du, Q. Chen [et al.] // Coatings. – 2021. – № 11(3). – С. 319.

5. Experimental investigation of harrow with spring teeth for cultivation of sugar beets / V. Bulgakov, S. Ivanovs, V. Bandura, Y. Ichnatiev // Engineering for Rural Development. – 2018. – № 17. – С. 215–220.

6. Ogórek, R. Effect of the intensity of weed harrowing with spike-tooth harrow in barley-pea mixture on yield and mycobiota of harvested grains / R. Ogórek, A. Lejman, P. Sobkowicz // Agronomy. – 2019. – № 9(2). – С. 103.

7. Исследование конструкционных и эксплуатационных параметров рабочей секции пружинной бороны / С. Д. Шепелёв, М. В. Пятаев, А. П. Зырянов, Е. В. Шалонкина // АПК России. – 2022. – Т. 29. – № 3. – С. 336–342.

8. Шепелёв С. Д. Анализ сил, действующих на посевную секцию сеялки ПК-12,7 / С. Д. Шепелёв, М. В. Пятаев, Е. Н. Кравченко // Актуальные вопросы агроинженерных и агрономических наук : матер. Нац. (Всероссийской) научной конференции Института агроинженерии, Института агроэкологии. – Челябинск : ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2021. – С. 153–161.

9. Theoretical and experimental studies of following the soil microrelief contour by the seeder section / S. D. Shepelev, M. V. Pyataev, A. P. Zyryanov, E. N. Kravchenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Practical Conference: Development of the Agro-Industrial Complex in the Context of Robotization and Digitalization of Production in Russia and Abroad (DAICRA 2021). – 2022. – P. 012132.

10. Influence of parameters of a pneumatic grain seeder distributor on the uniform distribution of seeds / I. I. Ognev, A. P. Zyryanov, M. V. Pyataev, A. A. Gulyarenko // E3S Web of Conferences. Ser. : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020. – 2020. – P. 01031.

11. Патент № 2779178 Российская Федерация, МПК А01В 19/04 (2006.01), А01В 23/04

(2006.01), А01В 63/26 (2006.01). Борона пружинная : № 2021134126 : заявл. 22.11.2021 : опубл. 05.09.2022 / С. Д. Шепелёв, Е. Н. Кравченко, Н. А. Теличкина, М. В. Пятаев, Е. В. Шалонкина ; заявитель ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, Институт агроинженерии.

Шалонкина Евгения Владимировна, аспирант кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка, и технология и механизация животноводства», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет.

E-mail: vatolinazhenya@gmail.com.

* * *