

УДК 631.312.2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАХОТНЫХ АГРЕГАТОВ НА БАЗЕ ЗАГОННЫХ И ОБОРОТНЫХ ПЛУГОВ

**В.П. Чеботарев,**

*зав. каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор*

**Н.Д. Лепешкин,**

*ведуц. науч. сотр. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук, доцент*

**Д.А. Яновский,**

*ассистент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ*

**Д.Н. Бондаренко,**

*ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ*

**А.А. Зенов,**

*ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ*

*В статье представлен сравнительный технико-экономический анализ результатов испытаний загонных и оборотных плугов в реальных условиях. В качестве материала были использованы данные, полученные белорусской и российскими машиноиспытательными станциями. В ходе анализа составлено уравнение множественной регрессии с 4-мя факторами, с целью определения влияния каждого из них на моделируемые выходные показатели, такие как расход топлива и производительность пахотного агрегата.*

*Ключевые слова: плуг, производительность, удельный расход топлива, глубина вспашки, твердость почвы.*

*The article presents a comparative technical and economic analysis of the test results of corral and reverse plows in real conditions. The data obtained by the Belarusian and Russian machine testing stations were used. During the analysis, a multiple regression equation with 4 factors was compiled in order to determine the impact of each of them, as well as their interacting effects on the simulated output indicators, such as fuel consumption and plow productivity.*

*Key words: plow, productivity, specific fuel consumption, plowing depth, soil hardness.*

### Введение

Энергосберегающее производство сельскохозяйственной продукции является приоритетным направлением развития агропромышленного производства Республики Беларусь и неразрывно связано с внедрением новых и совершенствованием применяемых технологий и технических средств в сельском хозяйстве. Одной из наиболее энергозатратных операций в сельском хозяйстве является вспашка. В частности, для вспашки одного гектара пашни необходимо затратить от 14 до 30 кг дизельного топлива [1]. В Республике Беларусь в послеперестроечный период проделана большая работа по созданию отечественных плугов. На ведущих предприятиях (ОАО «Минский завод шестерен», ОАО «Минойтовский ремонтный завод», ОАО «Калинковичский ремонтно-механический завод», ОАО «Оршаагропромаш») освоено производство плугов нового поколения, которые, как показывают сравнительные испытания, по основным эксплуатационным и энергетическим показателям приближаются к лучшим зарубежным аналогам [1]. Однако, несмотря на все достоинства, выпус-

каемые в настоящее время плуги, еще не отвечают в полной мере требованиям качества вспашки для условий Республики Беларусь. Кроме того, важным вопросом эффективного применения плугов является оценка эффективности массово внедренных в последнее время оборотных плугов в сравнении с использовавшимися ранее загонными.

Целью работы является определение влияния рабочей скорости движения, ширины захвата, глубины вспашки и твердости почвы на моделируемые выходные показатели, такие как расход топлива и производительность пахотного агрегата.

### Основная часть

В странах Западной Европы, где в системе основной обработки почвы вспашка занимает весомое место, машиностроительные предприятия уделяют большое внимание совершенствованию конструкции плугов. Причина этой ситуации заключается в том, что вспашка является наиболее энергоемким технологическим процессом со значительными трудозатратами. При этом основные усилия ученых и разработчиков направлены на поиск путей снижения тягового

сопротивления, повышения качества работы и эксплуатационной надежности плугов.

На рынке сельскохозяйственной техники широко представлены навесные, полуприцепные, прицепные загонные и оборотные плуги. Причем плуги могут иметь от 2 до 17 корпусов. Как показывает анализ рынка, использование загонных плугов существенно уменьшается, уступая место оборотным плугам. Стоимость оборотных плугов на 40 % выше, однако эти затраты, по заключениям экспертов, компенсируются лучшим качеством обработки почвы, особенно на полях небольших размеров, повышением производительности пахотных агрегатов. Кроме того, также уменьшаются затраты на техническое обслуживание плугов. Однако реальная оценка сравнительной эффективности использования загонных и оборотных плугов в известной научно-технической информации не приводится. Для проведения сравнительного тех-

нико-экономического анализа эффективности использования обоих видов плугов в агрегате с тракторами класса 1,4...8,0 семейства «БЕЛАРУС» и зарубежных аналогов, при вспашке в реальных условиях были использованы данные, полученные в результате испытаний плугов ГУ «Белорусская МИС», ФГБУ «Северо-Западная государственная зональная МИС» и ФГБУ «Государственный испытательный центр» (Российская Федерация). Из протоколов испытаний [2-9] были выбраны следующие показатели:  $n$  – количество корпусов, шт;  $W$  – часовая производительность за основное время, га/ч;  $G$  – удельный расход топлива, кг/га;  $v$  – рабочая скорость движения, м/с;  $B$  – рабочая ширина захвата плуга, м;  $h$  – глубина вспашки, м;  $P$  – твердость почвы, МПа.

Данные, полученные из протоколов испытаний пахотных агрегатов на основе загонных плугов, представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Данные, полученные из протоколов испытаний пахотных агрегатов на основе загонных плугов**

Марка плуга	Количество корпусов, шт.	Расход топлива, кг/га	Производительность за основное время, га/ч	Рабочая скорость движения, м/с	Рабочая ширина захвата, м	Глубина вспашки, м	Твердость почвы, МПа
ПЗН-3-35-01 (Республика Беларусь)	3	13,8	0,79	2,06	1,07	0,2	3,3
ПЗН-3-35-01 (Республика Беларусь)	3	13,6	0,9	2,25	1,11	0,22	3,8
RSPD3/4 -40/081 (Российская Федерация)	3	14,61	0,98	2,22	1,20	0,25	3,7
ПКМП-3-40Р (Республика Беларусь)	3	10,9	0,77	1,71	1,25	0,21	2,1
ПКМП-3-40Р (Республика Беларусь)	3	15,98	0,98	2,5	1,08	0,22	3,85
ПЗН-4-35-01 (Республика Беларусь)	4	13,8	1,15	2,17	1,47	0,2	3,3
ПЗН-4-35-01 (Республика Беларусь)	4	13,1	1,22	2,31	1,47	0,22	4,5
ПГП-4-40-2А (Республика Беларусь)	4	14,95	1,36	2,28	1,6	0,22	3,85
ПРН-4-35 (Российская Федерация)	4	12,2	1,42	2,53	1,48	0,21	4,25
ПРН-4-35-1 (Российская Федерация)	4	11,9	1,38	2,56	1,46	0,21	3,8
ПСК-4-5-6 (Российская Федерация)	4	14,22	2,06	1,69	3,06	0,23	3,15
ПЗН-5-35-01 (Республика Беларусь)	5	13,5	1,68	2,58	1,81	0,21	3,3
ПЗН-5-35-01 (Республика Беларусь)	5	13,1	1,87	2,72	1,91	0,24	3,7
ПКМ-5-40Р (Республика Беларусь)	5	13,37	1,64	2,25	2,00	0,22	3,85

Продолжение таблицы 1

Марка плуга	Количество корпусов, шт.	Расход топлива, кг/га	Производительность за основное время, га/ч	Рабочая скорость движения, м/с	Рабочая ширина захвата, м	Глубина вспашки, м	Твердость почвы, МПа
ПРН-(4+1)-35 (Российская Федерация)	5	15,1	1,65	2,33	1,89	0,21	3,0
ПРН-(4+1)-35-1 (Российская Федерация)	5	13,4	1,63	1,7	2,2	0,24	3
ПКМ-6-40Р (Республика Беларусь)	6	11,69	1,88	2,14	2,4	0,22	4,15
ПНУ-6-35ИП (Российская Федерация)	6	16,1	1,65	2,13	2,19	0,25	3,02
ППН-8-30/50 (Республика Беларусь)	8	11,1	2,91	2,55	3,32	0,21	1,4
ППН-8-30/50 (Республика Беларусь)	8	11,6	2,98	2,72	3,40	0,22	3,85
ВВ-100 (Норвегия)	8	11,6	3,3	2,81	3,2	0,22	3,85
ПНЛ-8-40С (Российская Федерация)	8	16,8	2,07	2,69	3,20	0,24	2,74
ПЛН-8-35 (Российская Федерация)	8	12,94	2,27	2,16	2,91	0,24	2,76
ПСК-8 (Российская Федерация)	8	13,16	3,18	2,08	4,05	0,25	2,75
ПУН-8-40 (Российская Федерация)	8	14,75	2,92	2,53	3,0	0,24	2,4

В ходе анализа, для каждого из блоков данных (пахотные агрегаты на основе оборотных и загонных плугов) составлялось уравнение множественной регрессии с 4-мя факторами, с целью определения влияния каждого из них на моделируемые выходные показатели, такие как расход топлива и производительность пахотного агрегата.

Данные, полученные из протоколов испытаний пахотных агрегатов на основе оборотных плугов, представлены в таблице 2.

Производительность пахотного агрегата и удельный расход топлива определялись в зависимости от рабочей скорости движения, рабочей ширины захвата плуга, глубины вспашки и твердости почвы. Для определения зависимостей и последующего анализа использовались методы регрессионного анализа планирования эксперимента.

Для обработки результатов проведенных экспериментов и дальнейшего определения коэффициентов уравнений регрессии, факторы приводились к одному масштабу. Это достигалось путем кодирования переменных. Уровни варьирования факторов при кодировании для загонных плугов представлены в таблице 3, а для оборотных в таблице 4.

Обработка полученных данных позволила получить следующие регрессионные уравнения:

для пахотных агрегатов на основе загонных плугов:

$$G = 14,931 + 0,514x_1 + 0,031x_2 + 0,735x_3 + 0,694x_4 + 0,187x_1^2 - 1,564x_2^2 - 3,204x_3^2 - 5,68x_4^2 + 2,174x_1x_2 + 0,693x_1x_3 - 1,205x_1x_4 + 3,121x_2x_3 - 5,465x_2x_4 + 2,235x_3x_4; \quad (1)$$

$$W = 1,969 + 0,21x_1 + 1,017x_2 + 0,051x_3 - 0,399x_4 - 0,175x_1^2 + 0,304x_2^2 + 0,721x_3^2 + 0,674x_4^2 - 0,367x_1x_2 - 0,03x_1x_3 + 0,276x_1x_4 - 1,06x_2x_3 + 0,775x_2x_4 - 1,24x_3x_4; \quad (2)$$

для пахотных агрегатов на основе оборотных плугов:

**Таблица 2. Данные, полученные из протоколов испытаний пахотных агрегатов на основе оборотных плугов**

Марка плуга	Количество корпусов, шт.	Расход топлива, кг/га	Производительность за основное время, а/ч	Рабочая скорость движения, м/с	Рабочая ширина захвата, м	Глубина вспашки, м	Твердость почвы, МПа
ПНО-3-40/55 (Республика Беларусь)	3	16,0	1,21	2,44	1,38	0,21	2,5
ПНО-3-40/55 (Республика Беларусь)	3	16,2	1,27	2,53	1,40	0,23	2,4
ПНГ-4-43 (Республика Беларусь)	4	18,72	1,19	1,94	1,72	0,22	3,85
ПО-4А (Российская Федерация)	4	16,04	1,32	2,03	1,8	0,22	2,2
ES-95 (Норвегия)	4	14,77	1,65	2,58	1,6	0,22	4,15
ППО-5-35/50 (Республика Беларусь)	5	17,5	1,79	2,39	2,08	0,21	3,3
ППО-5-35/50 (Республика Беларусь)	5	14,9	2,32	2,53	2,55	0,23	2,0
ПО-(4+1)-40 (Республика Беларусь)	5	14,7	1,75	2,5	1,94	0,22	3,9
ПО-(4+1)-40 (Республика Беларусь)	5	15,5	1,64	2,0	1,98	0,20	3,6
ППО-5-40 (Республика Беларусь)	5	18,1	1,54	2,22	2,0	0,22	4,15
EM-85-200 (Норвегия)	5	16,55	1,35	1,87	2,0	0,19	1,35
EuroOral 7x4+1 (Германия)	5	14,97	1,88	2,52	2,0	0,22	2,0
ППО-6-35/50 (Республика Беларусь)	6	17,2	2,29	2,67	2,38	0,23	3,9
ППО-6-35/50 (Республика Беларусь)	6	15,9	2,41	2,81	2,39	0,20	1,9
PG-100-7 (Норвегия)	7	15,7	1,96	2,01	2,7	0,21	2,25
ППО-7-40К (Республика Беларусь)	7	16,6	2,05	2,03	2,8	0,20	2,55
VIS XLS 6+1 (Польша)	7	14,76	3,02	2,91	2,88	0,22	3,4
HA-160-8-8-80 (Германия)	8	14,29	3,23	2,86	3,20	0,22	4,1
ППОВ-12-40/50К (Республика Беларусь)	12	17,8	4,6	2,39	5,38	0,21	4,8
ППОВ-12-40/50К (Республика Беларусь)	12	15,8	5,6	2,72	5,74	0,22	3,8
ППРО-12-01 (Республика Беларусь)	12	16,2	4,69	2,72	5,15	0,21	4,1
ППРО-12-01 (Республика Беларусь)	12	16,5	5,2	2,53	5,31	0,21	4,5
ПО-(8+4)-40 (Республика Беларусь)	12	16,6	4,87	2,64	5,13	0,21	4,1

**Таблица 3. Уровни варьирования факторов для загонных плугов**

Наименование варьируемого фактора	$v$ , м/с	$B$ , м	$h$ , м	$P$ , МПа
Кодированное обозначение	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Основной уровень ( $x_i = 0$ )	2,25	2,56	0,23	2,95
Интервал варьирования ( $\Delta x_i$ )	0,56	1,49	0,03	1,55
Нижний уровень ( $x_i = -1$ )	1,69	1,07	0,20	1,4
Верхний уровень ( $x_i = +1$ )	2,81	4,05	0,26	4,5

**Таблица 4. Уровни варьирования факторов для оборотных плугов**

Наименование варьируемого фактора	$v$ , м/с	$B$ , м	$h$ , м	$P$ , МПа
Кодированное обозначение	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Основной уровень ( $x_i = 0$ )	2,39	3,56	0,21	3,35
Интервал варьирования ( $\Delta x_i$ )	0,52	2,18	0,02	1,45
Нижний уровень ( $x_i = -1$ )	1,87	1,38	0,19	1,9
Верхний уровень ( $x_i = +1$ )	2,91	5,74	0,23	4,8

$$G = 17,427 - 1,449x_1 + 0,195x_2 + 0,73x_3 + 0,757x_4 - 1,297x_1^2 - 1,794x_2^2 + 1,056x_3^2 - 2,322x_4^2 + 0,95x_1x_2 - 1,002x_1x_3 - 1,865x_1x_4 - 1,044x_2x_3 + 3,256x_2x_4 + 3,035x_3x_4; \quad (3)$$

$$W = 3,027 + 0,489x_1 + 1,911x_2 - 0,001x_3 + 0,07x_4 + 0,109x_1^2 + 0,196x_2^2 + 0,051x_3^2 + 0,054x_4^2 + 0,034x_1x_2 - 0,02x_1x_3 + 0,037x_1x_4 + 0,23x_2x_3 - 0,112x_2x_4 - 0,195x_3x_4. \quad (4)$$

Для упрощения проведения анализа уравнений (1) – (4) путем уменьшения количества факторов в уравнениях решено зафиксировать фактор  $x_3$  (глубина вспашки) на верхнем уровне для обоих видов плугов. Фактор  $x_4$  (твердость почвы) принят на уровне средних значений по опытам:

для загонных плугов  $x_4 = +0,242$  ( $P = 3,325$  МПа);

для оборотных  $x_4 = -0,053$  ( $P = 3,274$  МПа).

После соответствующих преобразований, уравнения (1) – (4) в окончательном виде будут иметь следующий вид:

для пахотных агрегатов на основе загонных плугов:

$$G = 12,838 + 0,915x_1 + 1,83x_2 + 0,187x_1^2 - 1,564x_2^2 + 2,174x_1x_2; \quad (5)$$

$$W = 2,383 + 0,247x_1 + 0,145x_2 - 0,175x_1^2 + 0,304x_2^2 - 0,367x_1x_2; \quad (6)$$

для пахотных агрегатов на основе оборотных плугов:

$$G = 19,01 - 2,352x_1 - 1,022x_2 - 1,297x_1^2 - 1,794x_2^2 + 0,95x_1x_2; \quad (7)$$

$$W = 3,083 + 0,467x_1 + 2,147x_2 + 0,109x_1^2 + 0,196x_2^2 + 0,034x_1x_2. \quad (8)$$

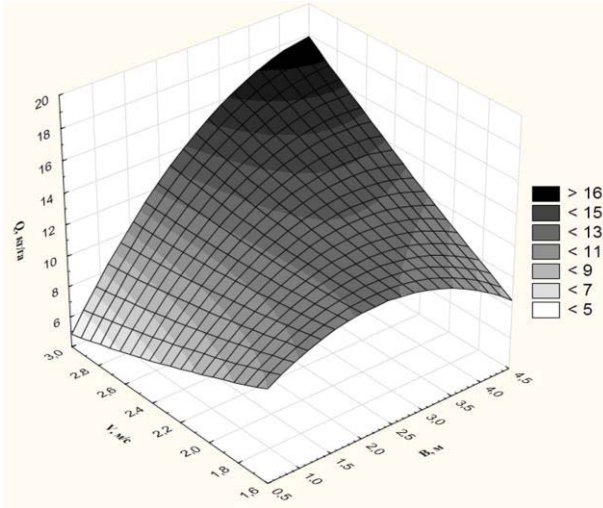
Заключительным этапом математической обработки полученных данных являлось определение изменений областей значений исследуемых факторов на основании анализа поверхностей отклика, полученных методом двухмерных сечений. Поверхности отклика и их сечения, построенные по уравнениям регрессии (5) – (8), представлены на рисунках 1 и 2.

Анализ уравнений (5) и (6), а также графических зависимостей удельного расхода топлива сравниваемых пахотных агрегатов (рис. 1) показал, что у загонных плугов максимальный расход колеблется в пределах 16...18 кг/га и существенно ниже, чем у оборотных, у которых расход составляет 20...22 кг/га.

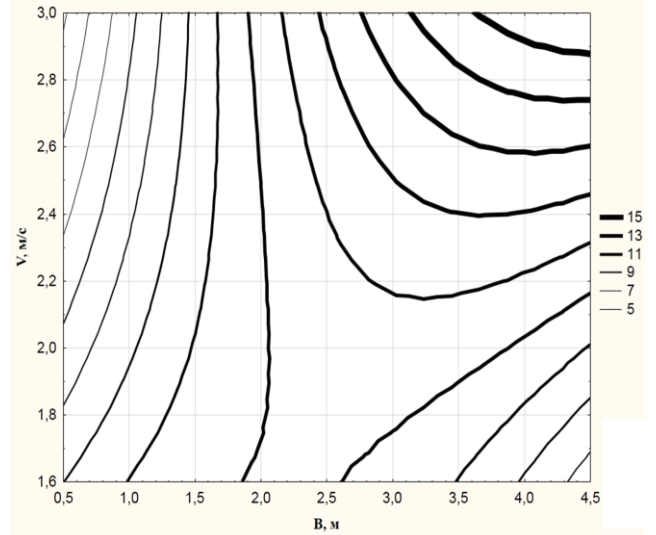
Однако при этом резкое повышение удельного расхода топлива у пахотных агрегатов на основе загонных плугов происходит с возрастанием рабочей скорости с 2,4 м/с при одновременном увеличении ширины захвата свыше 3 м (рис. 1а и 1б). Поэтому повышение рабочих скоростей и рабочей ширины захвата загонных плугов лимитируется резким возрастанием удельного расхода топлива. Работа загонного плуга на рабочих скоростях от 1,6 до 3 м/с будет лимитироваться рабочей шириной захвата до 2,0 – 2,5 м. У пахотных агрегатов на основе оборотных плугов (рис. 1в и 1г), наоборот, с повышением рабочей скорости свыше 2,5 м/с и рабочей ширине захвата более 4,0 м удельный расход топлива снижается до 14...16 кг/га.

Производительность пахотных агрегатов на основе загонных плугов не превышает 3,5 га/ч даже при наибольшей рабочей скорости 3,3 м/с и максимальной ширине захвата 4,5 м (рис. 2а и 2б) в реальных условиях с учетом твердости и влажности почвы. Кроме того, при работе загонного плуга с максимальной рабочей шириной захвата, при повышении рабочей скорости свыше 2,5 м/с производительность пахотного агрегата падает с 3,2 до 2,4 га/ч. Производительность пахотных агрегатов на базе оборотных плугов (рис. 2в и 2г) достигает 6,5...7,0 га/ч.

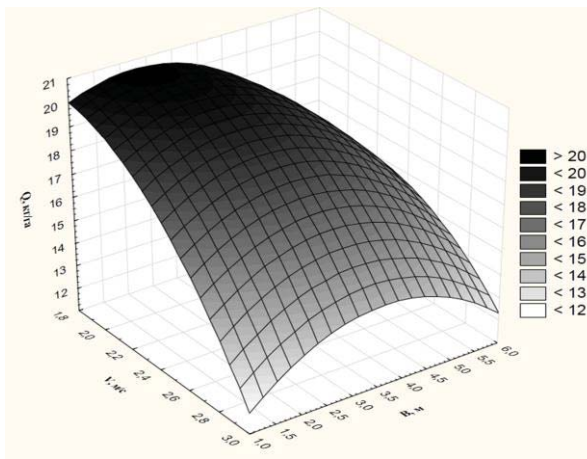




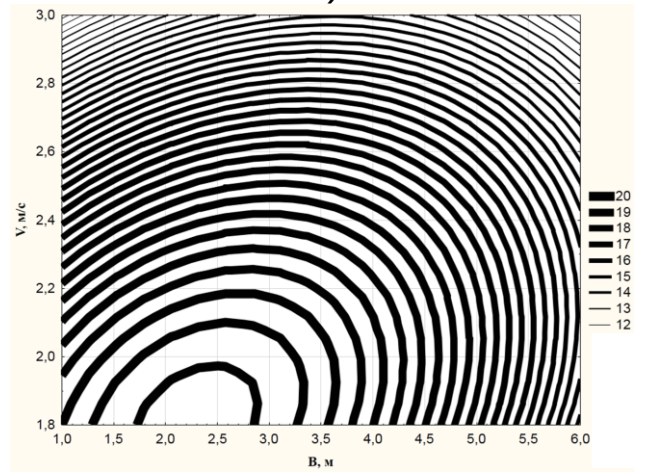
**а)**



**б)**

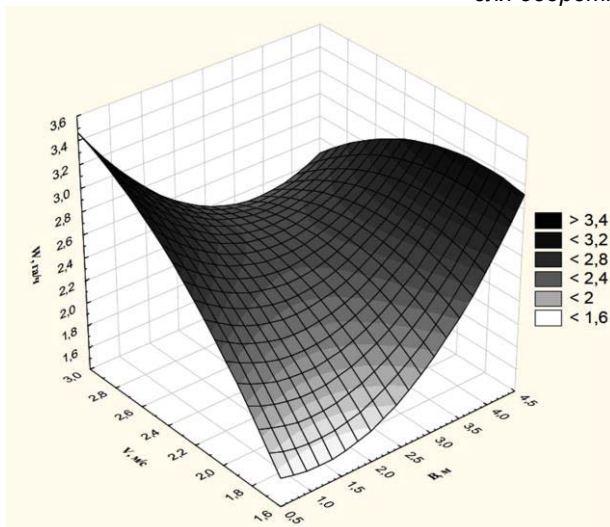


**в)**

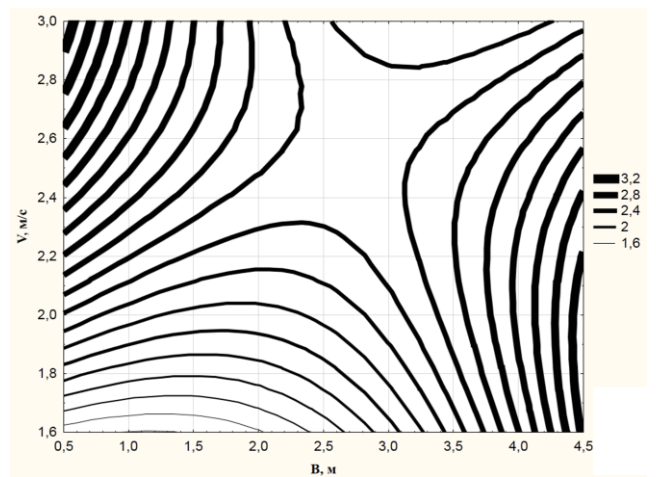


**г)**

*Рисунок 1. Поверхности отклика и их двумерные сечения зависимостей удельного расхода топлива пахотных агрегатов от рабочей скорости и рабочей ширины захвата: для загонного (а, б); для оборотного плугов (в, г)*



**а)**



**б)**

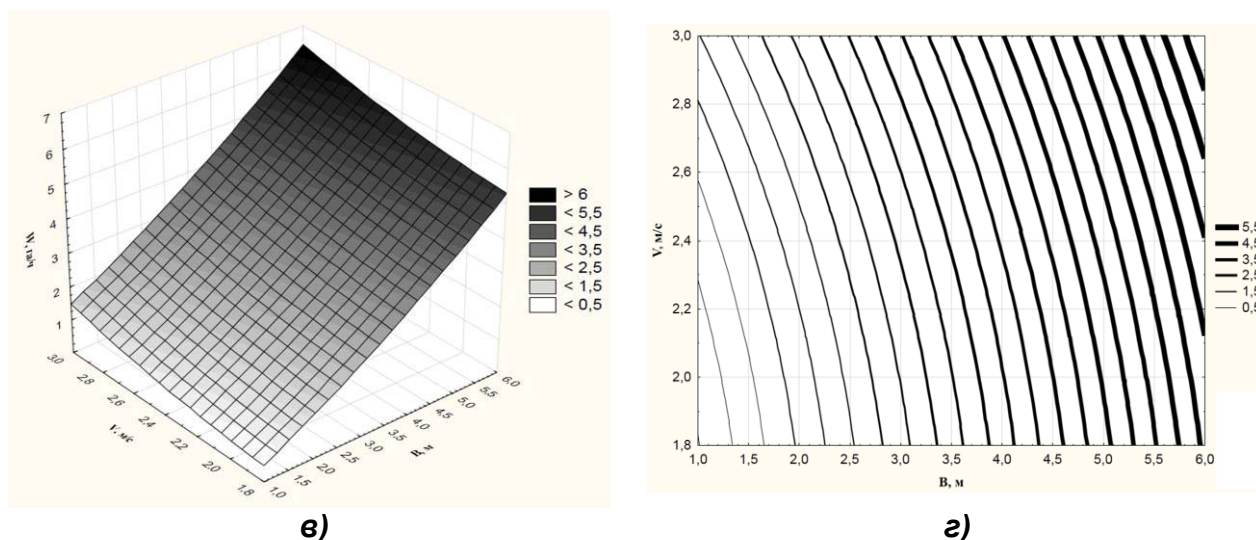


Рисунок 2. Поверхности отклика и их двухмерные сечения зависимостей производительности пахотных агрегатов от рабочей скорости и рабочей ширины захвата: для загонного (а, б); для оборотного плугов (в, г)

### Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что удельный расход топлива пахотного агрегата на базе загонного плуга составляет в среднем 15...18 кг/га, что несколько ниже, чем у оборотного плуга – 18...20 кг/га. Однако с повышением рабочей скорости свыше 2,5 м/с и рабочей ширины захвата более 4 м удельный расход топлива пахотного агрегата на базе оборотного плуга снижается до уровня показателей загонного и составляет 14...16 кг/га. Производительность пахотных агрегатов на базе оборотных плугов достигает 6,5...7 г/ч, что почти в два раза выше, чем у загонных. При этом увеличение производительности агрегата на базе оборотного плуга увеличивается прямо пропорционально увеличению рабочей скорости и рабочей ширины захвата.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Точицкий, А.А. Чем пахать родную. Сравнительная оценка плугов отечественного и зарубежного производства / А.А. Точицкий, Н.Д. Лепешкин, Е.Я. Грек // Белорусское сельское хозяйство. – 2004. – №9. – С. 5-8.
2. Протокол № 026 Б 3/2-2020ИЦ (от 24 июля 2020 г.) квалификационных испытаний плуга оборотного навесного ППОВ-12-40/50К / Бел. МИС. – Пос. Привольный, 2020.
3. Протокол № 129 Д 2/2-2018ИЦ (от 21 декабря 2018 г.) периодических испытаний плуга навесного

оборотного ПНО-3-40/55 / Бел. МИС. – Пос. Привольный, 2018.

4. Протокол № 093 Б 1/2-2016ИЦ (от 27 декабря 2016 г.) приемочных испытаний опытного плуга 12-корпусного оборотного ПО-(8+4)-40 / Бел. МИС. – Пос. Привольный, 2016.

5. Протокол № 112 Б 3/2-2018ИЦ (от 7 декабря 2018 г.) квалификационных испытаний плуга прицепного оборотного 12-корпусного ППРО-12-01 / Бел. МИС. – Пос. Привольный, 2018.

6. Протокол № Б 1/2-2016 ИЦ (от 16 декабря) приемочных испытаний плуга загонного навесного ПЗН-5-35-1 / Бел. МИС. – Пос. Привольный, 2016.

7. Протокол № 014 Д 2/2-2016ИЦ (от 11 марта 2016 г.) периодических испытаний плуга четырех-пятикорпусного оборотного полунавесного ПО-(4+1)-40 / Бел. МИС. – Пос. Привольный, 2016.

8. Обзор результатов испытаний и особенностей конструкции плугов [Электронный ресурс] / ФГБУ «Северо-Западная государственная зональная МИС» (Российская Федерация). – Режим доступа: <https://szmis.ru/obzor-rezultatov-ispytanij-i-osobennostej-konstrukcii-plugov/> – Дата доступа: 06.12.2021.

9. Сравнительный анализ технического уровня плугов по результатам испытаний на МИС [Электронный ресурс] / ФГБУ «Государственный испытательный центр» (Российская Федерация). – Режим доступа: <http://www.sistemamam.ru/protocols/> – Дата доступа: 06.12.2021.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 08.12.2021