

# ТЕХНОЛОГИИ, СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

DOI

УДК 631.51.014

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЯРУСНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ

**Ерзамаев Максим Павлович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис», ФГБОУ ВО Самарская ГСХА.

446442, Самарская обл., п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2.

E-mail: erzamaev\_mp@mail.ru

**Сазонов Дмитрий Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис», ФГБОУ ВО Самарская ГСХА.

446442, Самарская обл., п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2.

E-mail: sazonov\_ds@mail.ru

**Нестеров Евгений Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническое обеспечение АПК», ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ.

413161, Саратовская обл., с. Шумейка, ул. Степная, 13.

E-mail: nesterov21@mail.ru

**Жильцов Сергей Николаевич**, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Технический сервис», ФГБОУ ВО Самарская ГСХА.

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2.

E-mail: 3204@mail.ru

**Ключевые слова:** почва, плуг, обработка, затраты, ярусная, комбинированный, рабочий, энергетические.

*Цель исследования – снижение энергозатрат при ярусной обработке почвы путем обоснования технологических параметров рабочих органов комбинированного плуга. Для подтверждения теоретических предпосылок по определению рациональных параметров ярусной обработки почвы программой исследований предусматривалось использование теории многофакторного планирования экспериментов. Исследования влияния параметров ярусной обработки на удельные энергетические затраты обработки почвы в обрабатываемом горизонте проводили комбинированным плугом в полевых условиях. На основании результатов теоретического анализа процесса и предварительных исследований влияния параметров процесса ярусной обработки на энергозатраты на рыхление в обрабатываемом горизонте были определены факторы, оказывающие на них существенное влияние. Предварительными исследованиями установлено, что существенное влияние на удельные энергетические затраты технологического процесса ярусной обработки почвы оказывают глубина обработки основным корпусом нижнего яруса*

и глубина обработки корпусом верхнего яруса. Выявлена степень влияния на удельные энергетические затраты при ярусной обработке почвы таких факторов, как интервал смещения корпуса верхнего яруса в сторону необработанной поверхности поля, угол наклона долота и положение колеса трактора относительно края борозды. По результатам многофакторного эксперимента установлено, что наименьшие удельные энергетические затраты при работе комбинированного плуга достигаются при установке корпуса верхнего яруса на глубину обработки  $h_1 = 0,12 \dots 0,18$  м, корпуса нижнего яруса – на глубину обработки  $H_p = 0,37 \dots 0,41$  м и интервале смещения корпуса верхнего яруса в сторону необработанной поверхности  $\Delta = 0,05 \dots 0,12$  м. Наименьшая высота неразрыхленных гребней дна борозды обеспечивается при угле постановки рабочей поверхности долота в поперечно-вертикальной плоскости в пределах  $25 \dots 30^\circ$ .

Реализация в регионах РФ национального проекта «Развитие АПК» по приоритетной отрасли «Животноводство» предусматривает значительное расширение посевных площадей под кормовые культуры. Единственным реальным резервом являются выведенные из севооборотов и необрабатываемые земли. Для освоения необрабатываемых земель используются различные технологии, основной задачей которых является обеспечение благоприятной фитосанитарной обстановки в посевах, т. е. предотвращение негативных последствий многолетнего обсеменения сорняков, снижение последующих высоких затрат на ежегодные и многолетние мероприятия по борьбе с сорняками.

По фитосанитарному состоянию, в частности по характеру засоренности сорняками, необрабатываемые земли коренным образом отличается от «культурных». За годы «простоя» на необрабатываемых землях происходит резкая дифференциация слоев почвы по потенциальной засоренности: в нижних слоях почвы с каждым годом происходит снижение процента всхожести семян сорняков, а в поверхностном почвенном слое в результате многократного обсеменения сорняков накапливается огромное количество их семян. Поэтому заделка сорняков на глубину большую максимальной глубины прорастания позволила бы решить проблему засоренности сорняками верхнего слоя почвы.

Одной из операций для осуществления заделки верхнего засоренного слоя почвы является отвальная вспашка. Наиболее качественный оборот пласта обеспечивает ярусная вспашка. Однако обработка ярусным плугом имеет такой недостаток, как большие энергетические затраты операции [1, 2, 7].

Снижение энергозатрат вспашки от взаимной расстановки рабочих органов ярусного плуга впервые теоретически рассмотрены А. Д. Хорошиловым и послужили основой для новых исследований [3-7].

**Цель исследования** – снижение энергозатрат при ярусной обработке почвы путем обоснования технологических параметров рабочих органов комбинированного плуга.

**Задача исследования** – определить технологические параметры процесса ярусной обработки почвы, обеспечивающие наименьшие удельные энергетические затраты при работе комбинированного плуга.

**Материалы и методы исследований.** Исследования влияния параметров ярусной обработки почвы комбинированным плугом на удельные энергетические затраты проводили в полевых условиях [3].

На основании результатов теоретического анализа процесса и предварительных исследований влияния параметров процесса ярусной обработки на энергозатратность рыхления в обрабатываемом горизонте были определены факторы, оказывающие существенное влияние. Таким образом, за переменные были приняты следующие факторы (рис. 1):

- глубина обработки почвы корпусом верхнего яруса –  $h_1$ ;
- глубина обработки почвы корпусом нижнего яруса –  $H_p$ ;
- интервал смещения корпуса верхнего яруса в сторону необработанной поверхности –  $\Delta$ ;
- угол сдвига почвы долотом корпуса нижнего яруса –  $\beta_p$  (рис. 2);
- положение колеса трактора относительно борозды –  $l$ .

$$\Delta \geq b_w - b, \quad (1)$$

где  $b_w$  – ширина колеса трактора, м,  
 $b$  – ширина захвата корпуса верхнего яруса, м.

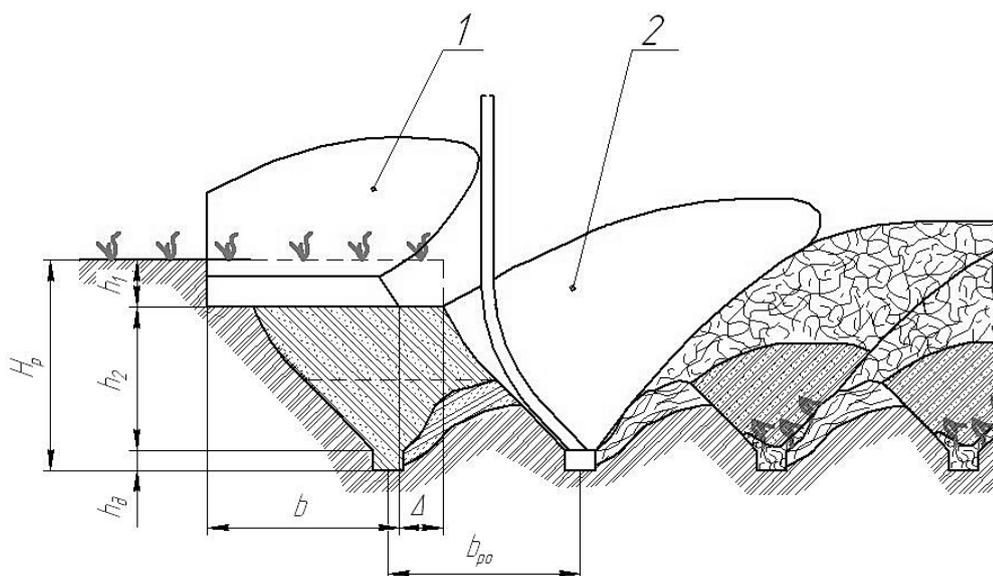


Рис. 1. Исследуемые параметры расположения рабочих органов комбинированного плуга:  
 1 – корпус верхнего яруса; 2 – корпус нижнего яруса

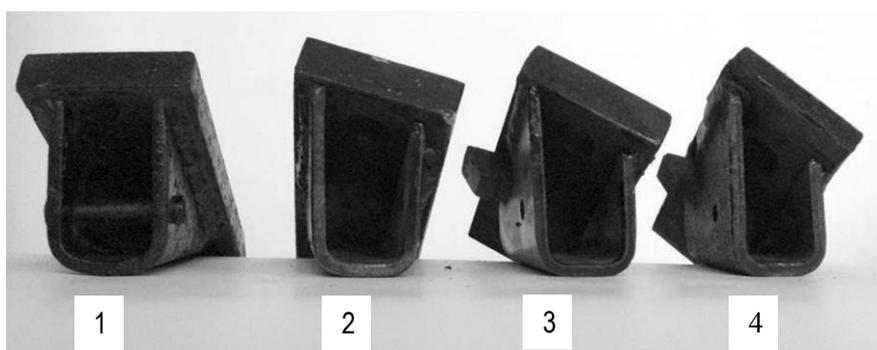


Рис. 2. Рыхлительные долота корпуса нижнего яруса с различным углом  $\beta_p$ :  
 1 –  $\beta_p = 0^\circ$ ; 2 –  $\beta_p = 15^\circ$ ; 3 –  $\beta_p = 30^\circ$ ; 4 –  $\beta_p = 45^\circ$

Серии опытов реализовывали по симметричному некомпозиционному квази-D-оптимальному плану Песочинского.

За критерий оптимизации выбраны минимальные удельные энергетические затраты на рыхление почвы в обрабатываемом горизонте.

Результаты реализации многофакторных экспериментов обрабатывали по методике, изложенной в трудах [5, 7].

Для аналитического описания влияния факторов на критерий оптимизации была выбрана квадратичная модель уравнения регрессии:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2, \quad (2)$$

где  $y$  – параметр оптимизации;

$b_0$  – свободный член, равный отклику при  $x_i=0$ ;

$b_i$  – оценка коэффициента уравнения регрессии, соответствующего  $i$ -го фактора;

$b_{ij}$  – оценка коэффициента уравнения регрессии, соответствующего взаимодействию факторов;

$x_i$  – кодированное значение факторов ( $i = 1, 2, 3 \dots$ ).

Поскольку факторы процесса неоднородны и имеют различные единицы измерения, то факторы приводили к единой системе исчисления путем перехода от действительных значений факторов к кодированным по формуле:

$$X_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (3)$$

где  $X_i$  – натуральное значение фактора;

$X_{i0}$  – натуральное значение фактора на основном уровне;

$\Delta X_i$  – натуральное значение интервала варьирования фактора.

Вводим условное обозначение верхнего, нижнего и основного уровней фактора соответственно +1; -1; 0.

Матрицу планирования составляли согласно выбранному плану многофакторного эксперимента [7].

Коэффициенты регрессии с учётом констант [7] рассчитывали по формулам:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= c_1 \sum_{u=1}^N y_u - c_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u; & b_i &= c_3 \sum_{u=1}^N x_{i_u} y_u; \\ b_{ij} &= c_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u; \\ b_{ii} &= c_5 \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u + c_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u - c_2 \sum_{u=1}^N y_u; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

а их дисперсии, среднеквадратические ошибки и ковариации – по формулам:

$$\left. \begin{aligned} S_{b_0}^2 &= c_1 S_y^2; & S_{b_0} &= c_7 S_y; & S_{b_i}^2 &= c_3 S_y^2; & S_{b_i} &= c_8 S_y; \\ S_{b_{ij}}^2 &= c_4 S_y^2; & S_{b_{ij}} &= c_9 S_y; & S_{b_{ii}}^2 &= (c_5 + c_6) S_y^2; \\ S_{b_{ii}} &= c_{10} S_y; & \text{cov}_{b_0 b_{ii}} &= -c_2 S_y^2; & \text{cov}_{b_{ii} b_{jj}} &= c_6 S_y^2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Критическое значение  $t_{кр}$  определяли по таблице для рассчитанного числа степеней свободы при уровне значимости  $q = 95\%$  [7]. Если расчетное значение  $t_i$  оказывалось больше значения  $t_{кр}$ , то коэффициент  $b_i$  признавался значимым. В математическую модель технологического процесса работы комбинированного рабочего органа включали только значимые коэффициенты.

Из модели без пересчета остальных коэффициентов исключали только статистически незначимые оценки  $b_i$  и  $b_{ij}$ . Для коэффициентов  $b_0$  и  $b_{ii}$  ковариации  $\text{cov}_{b_0 b_{ii}}$  и  $\text{cov}_{b_{ii} b_{jj}}$  отличны от нуля, поэтому исключение любого из них требовало перерасчёта остальных коэффициентов в данной группе. Новые значения коэффициентов  $b_0$  и  $b_{ii}$  и их дисперсий считали по формуле:

$$B = \left( X^T X \right)^{-1} X^T Y. \quad (6)$$

Для построения математической модели в натуральных переменных величинах использовали формулы кодирования (3). После подстановки натуральных значений факторов в уравнение (2), получали уравнение регрессии в раскодированном виде. Используя такое уравнение, строили поверхности отклика и по характеру поверхностей оценивали влияние факторов на удельные энергозатраты рыхления почвы в обрабатываемом горизонте и выбирали рациональные параметры исследуемых факторов.

Эффективность предлагаемого технологического процесса ярусной обработки оценивали по результатам математической обработки зависимости энергозатрат от основных факторов процесса обработки при различных сочетаниях рабочих органов.

**Результаты исследований.** Предварительными исследованиями установлено, что существенное влияние на удельные энергетические затраты технологического процесса ярусной обработки почвы оказывают глубина обработки основным корпусом нижнего яруса и глубина обработки корпусом верхнего яруса.

По результатам предварительных исследований выявлена степень влияния на удельные энергетические затраты ярусной обработки почвы таких факторов, как интервал смещения корпуса верхнего яруса в сторону необработанной поверхности, угол наклона долота и положение колеса трактора относительно края борозды.

В результате оценки значимости факторов (по результатам предварительного эксперимента и методом априорного ранжирования (рис. 3)) на критерий оптимизации – энергозатратность ярусной обработки почвы – существенную значимость оказали следующие факторы:  $X_1$  – глубина обработки безлемешным корпусом нижнего яруса,  $X_2$  – глубина обработки лемешно-отвальным корпусом верхнего яруса и  $X_3$  – интервал смещения корпуса верхнего яруса в сторону необработанной поверхности.

Факторы  $X_4$  (угол сдвига почвы долотом корпуса нижнего яруса) и  $X_5$  (положение колеса трактора относительно борозды) оказались малозначимыми, поэтому в дальнейших исследованиях их влияние на энергозатраты при ярусной обработке почвы не оценивали.

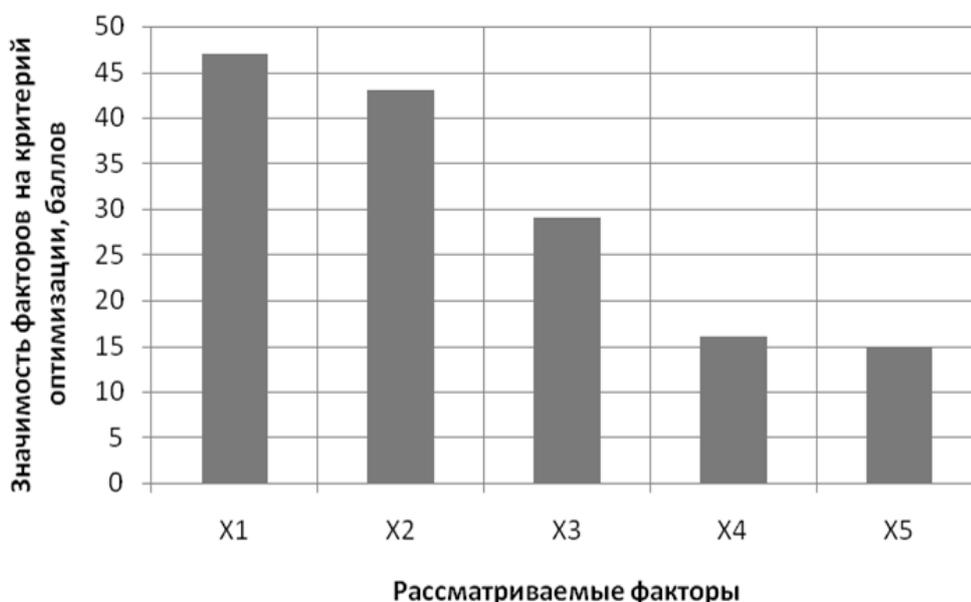


Рис. 3. Априорное ранжирование независимых факторов, влияющих на энергозатраты при ярусной обработке почвы

С целью составления математической модели влияния рассматриваемых факторов – технологических параметров предлагаемой ярусной вспашки – на удельные энергетические затраты процесса обработки почвы, реализован эксперимент по симметричному некомпозиционному квази-D-оптимальному плану Песочинского.

В таблице 1 представлены факторы, влияющие на рассматриваемую характеристику процесса обработки почвы, и уровни их варьирования, которые обосновывали на основании предварительных опытов.

При проведении исследований было определено, что наибольшее влияние оказывают следующие факторы: общая глубина обработки плугом, глубина обработки корпусом верхнего яруса почвы и интервал его смещения в сторону необработанной поверхности.

Для определения возможности проведения регрессионного анализа рассчитали однородности дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена:

$$S_{VMAX}^2 = 0,163; \sum_{V_n=1}^{N_n} S_V^2 = 0,74; G_{расч} = 0,145;$$

где  $S_{VMAX}^2$  – наибольшая дисперсия;

$$\sum_{V_n=1}^{N_n} S_V^2 – \text{сумма дисперсий опытов.}$$

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования основных факторов при регрессионном анализе

Уровни варьирования факторов	Факторы			Факторы в кодированном виде		
	$H_p$ , м	$h_1$ , м	$\Delta$ , м	x1	x2	x3
Верхний	0,45	0,18	0,20	+1	+1	+1
Нижний	0,35	0,06	0,10	-1	-1	-1
Основной	0,4	0,12	0,15	0	0	0
Интервал варьирования	0,05	0,06	0,05	1	1	1

При уровне значимости 0,05, числе опытов  $N = 13$  и числе степеней свободы  $f = n - 1 = 2$  табличное значение критерия Кохрена ( $G$ ) равно 0,373. Так как расчетное значение критерия Кохрена (0,145) меньше табличного, то гипотеза однородности параллельных опытов принимается.

Определили коэффициенты регрессии и расчетные значения критерия Стьюдента.

Коэффициенты уравнения регрессии  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$  оказались незначимыми, их можно исключить без пересчета остальных, так как  $t_{расч} < t_{кр}$ . Коэффициент  $b_{33}$  также оказался мало значимым, но из-за того, что его нельзя исключить без пересчета остальных коэффициентов, его оставили.

Уравнение регрессии принимает вид:

$$y = 13,3 + 1,8x_1 - 0,11x_2 + 1,54x_3 + 0,1x_1^2 + 1,51x_2^2 + 1,2x_3^2. \quad (7)$$

Заменив в уравнении регрессии кодовые значения факторов на натуральные по формулам:

$$x_1 = \frac{H_p - 0,40}{0,05}; x_2 = \frac{h_1 - 0,12}{0,06}; x_3 = \frac{\Delta - 0,15}{0,05}, \quad (8)$$

получим уравнение регрессии в натуральном раскодированном виде:

$$E = 233,34 + 200H_p^2 - 44H_p + 41,7h_1^2 - 2,5h_1 + 30\Delta^2 - 3,2\Delta. \quad (9)$$

Адекватность полученной модели определяли по критерию Фишера  $F$ :

$$F_{10;26}^{расч} = 2.$$

Дисперсия неадекватности  $S_{неад}^2$  при равномерном дублировании опытов составила 0,1. Табличное значение критерия Фишера  $F$  при уровне значимости 5% и числе степеней свободы  $f_{ад} = 2$ ,  $f_y = 26$  составляет  $F_{табл.} = 3,39$ , что превышает расчетное значение, поэтому полученная модель является адекватной.

После подстановки в уравнение регрессии (9) соответствующих значений основных факторов, построили факторную зависимость (рис. 4, 5 и 6) изменения энергетических затрат на обработку почвы комбинированным плугом от взаимодействия факторов  $H_p$  (глубины обработки корпусом нижнего яруса),  $h_1$  (глубины обработки корпусом верхнего яруса) и  $\Delta$  (интервала смещения корпуса верхнего яруса в сторону необработанной поверхности).

Для графического определения оптимальных технологических параметров ярусной обработки строили двумерные сечения поверхности отклика (рис. 7, 8 и 9).

Анализ двумерных сечений поверхностей отклика позволил определить рациональные параметры процесса ярусной обработки почвы предлагаемым комбинированным плугом при ее наименьших удельных энергетических затратах:

– глубина обработки корпусом нижнего яруса  $H_p = 0,37 \dots 0,41$  м;

- глубина обработки корпусом верхнего яруса  $h_1 = 0,12 \dots 0,18$  м;
- интервал смещения корпуса верхнего яруса в сторону необработанной поверхности  $\Delta = 0,05 \dots 0,12$  м.

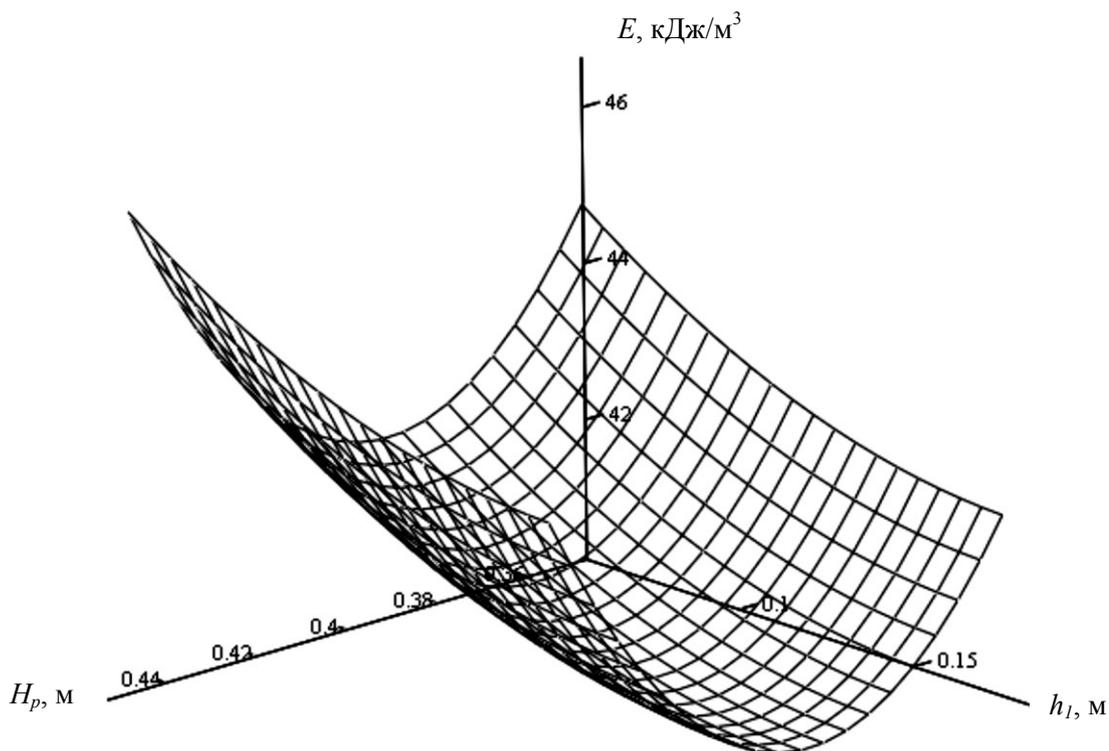


Рис. 4. Зависимость удельных энергетических затрат на ярусную обработку почвы комбинированным плугом от  $H_p$  и  $h_1$ , при  $\Delta = 0,15$  м

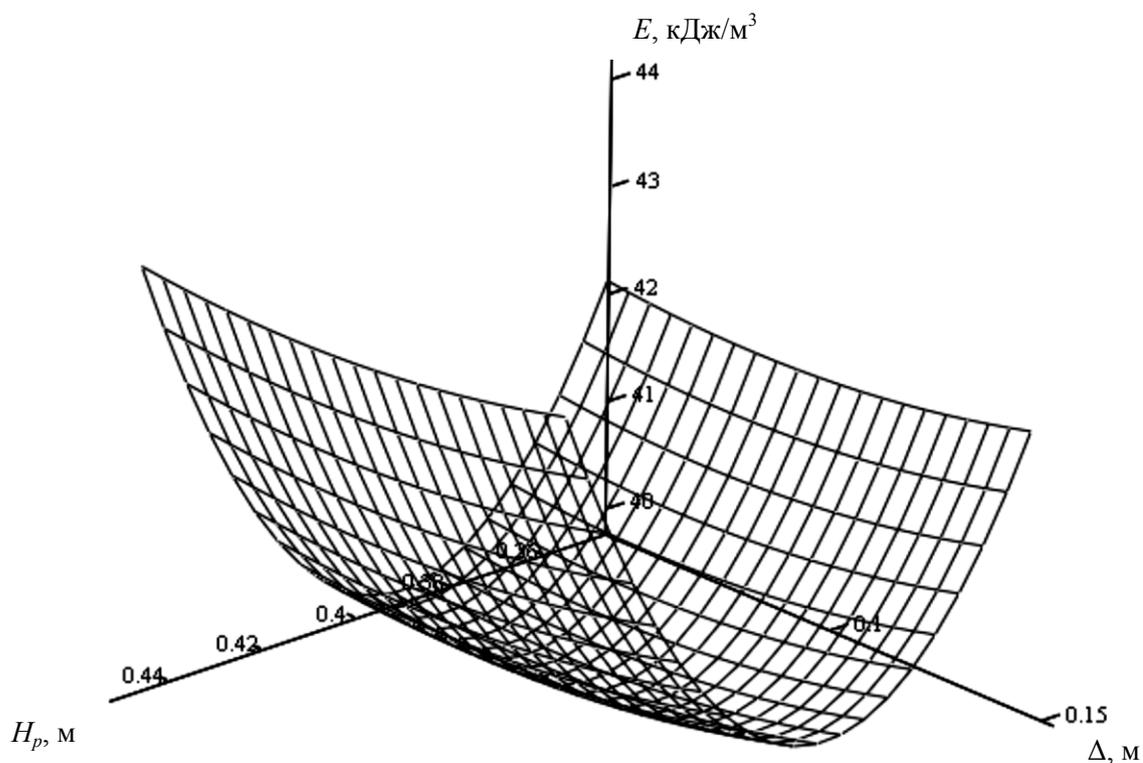


Рис. 5. Зависимость удельных энергетических затрат на ярусную обработку почвы комбинированным плугом от  $H_p$  и  $\Delta$ , при  $h_1 = 0,12$  м

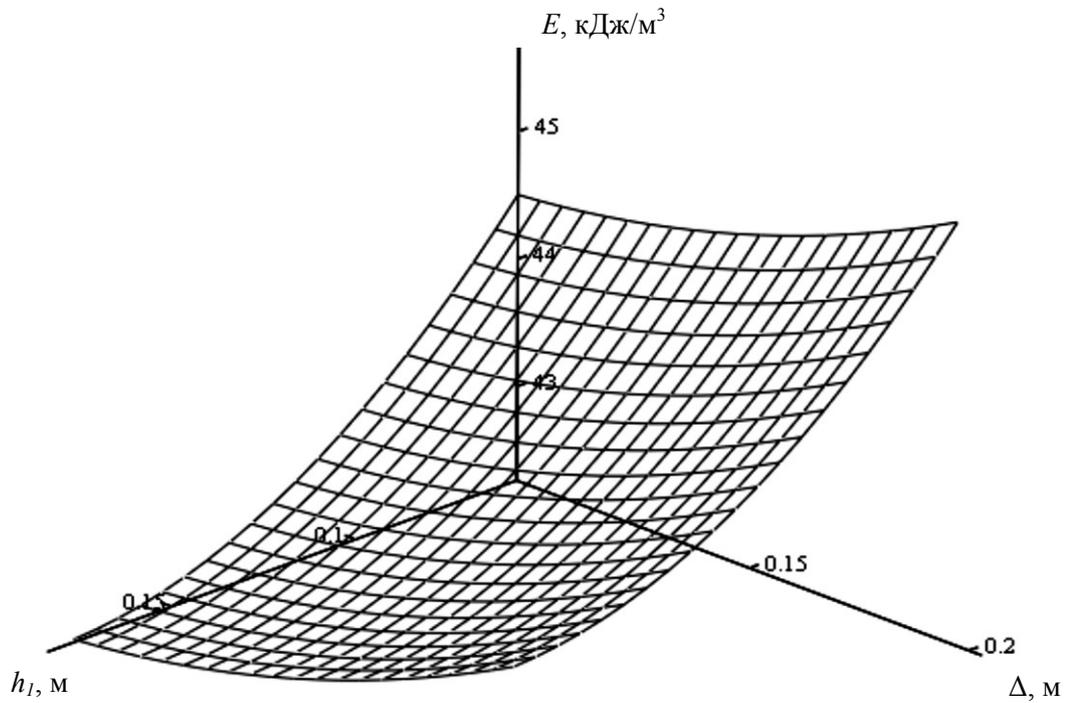


Рис. 6. Зависимость удельных энергетических затрат на ярусную обработку почвы комбинированным плугом от  $h_1$  и  $\Delta$ , при  $H_p=0,45$  м

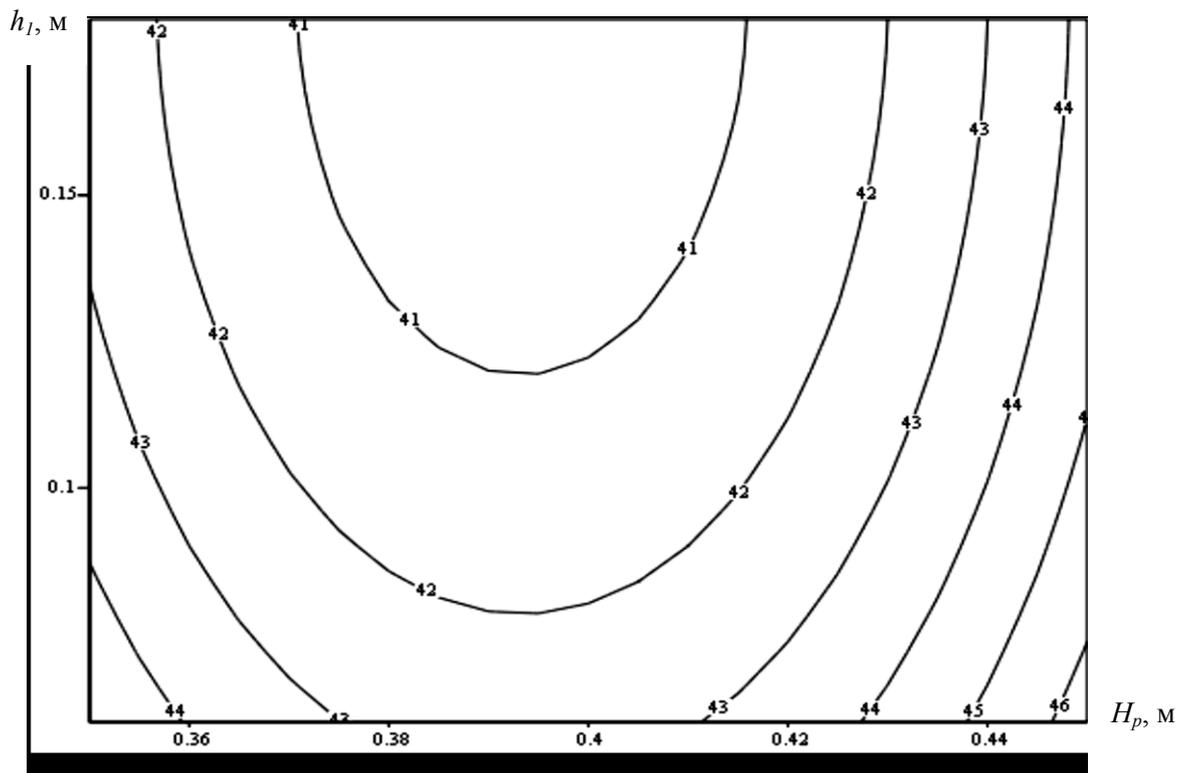


Рис. 7. Зависимость удельных энергетических затрат на ярусную обработку почвы комбинированным плугом от  $H_p$  и  $h_1$ , при  $\Delta=0,15$  м

Установленные рациональные интервалы технологических параметров ярусной обработки почвы предлагаемым плугом-рыхлителем обеспечат энергетически эффективную обработку почвы в соответствии с агротехническими требованиями.

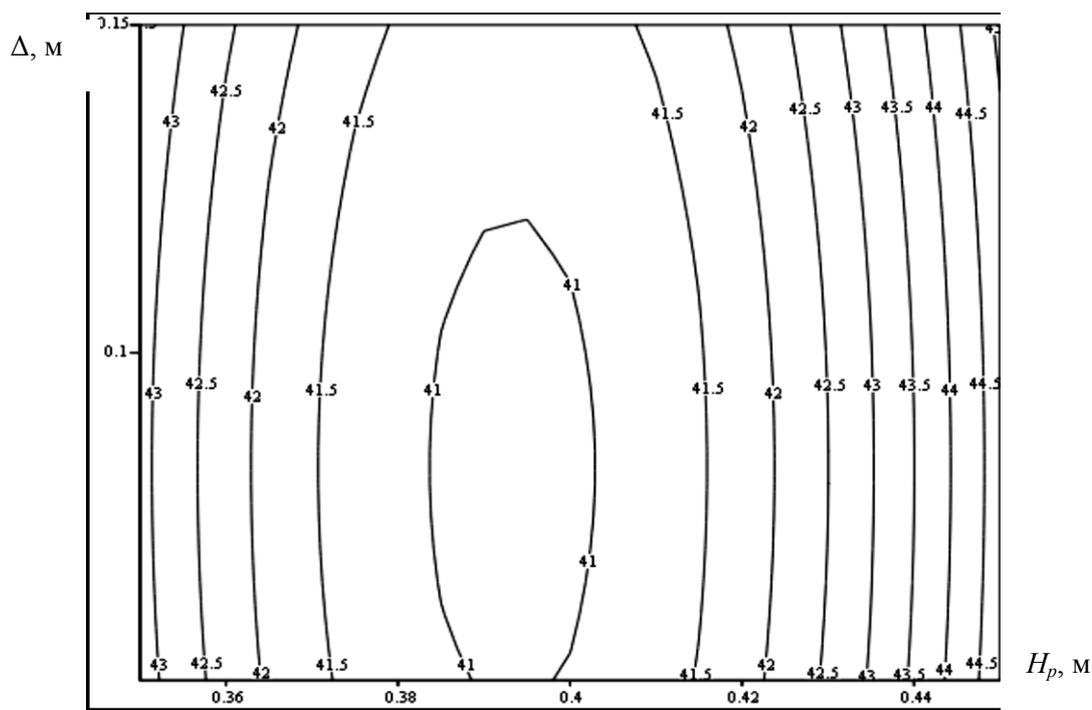


Рис. 8. Зависимость удельных энергетических затрат на ярусную обработку почвы комбинированным плугом от  $H_p$  и  $\Delta$ , при  $h_1=0,12$  м

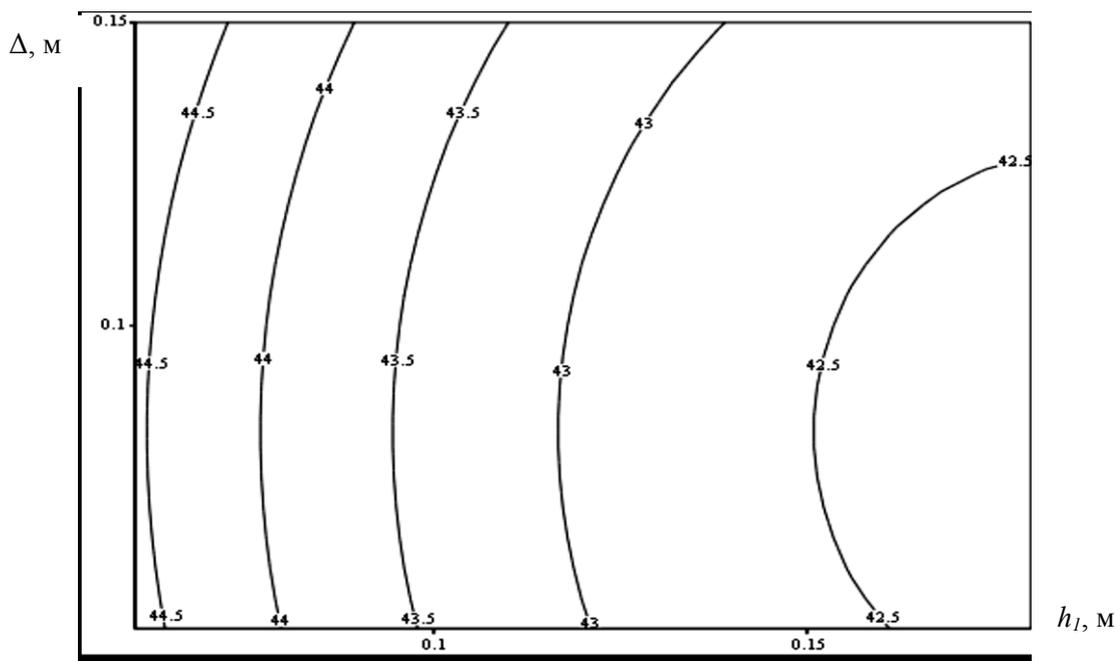


Рис. 9. Зависимость удельных энергетических затрат на ярусную обработку почвы комбинированным плугом от  $h_1$  и  $\Delta$ , при  $H_p=0,45$  м

Отмечено, что малозначимые факторы  $X_4$  (угол сдвига почвы долотом корпуса нижнего яруса) и  $X_5$  (положение колеса трактора относительно борозды) оказывали значительное влияние на агротехнические показатели работы пахотного агрегата.

Полученные данные по профилированию дна обработанного горизонта почвы позволили построить теоретическую и экспериментальные зависимости гребнистости дна от угла постановки рабочей поверхности долота в поперечно-вертикальной плоскости корпуса нижнего яруса (рис. 10).

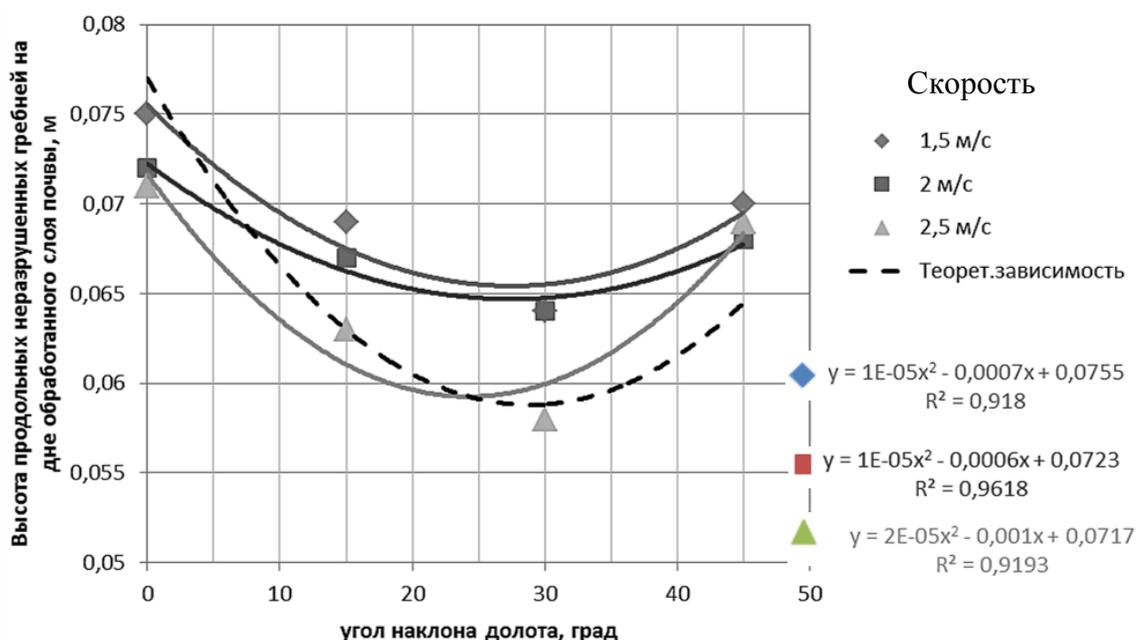


Рис. 10. Зависимость высоты неразрушенных гребней от угла постановки долота

Графические зависимости указывают, что оптимальный угол наклона долота корпуса нижнего яруса составляет 25...30° на скоростных режимах (1,5...2,5 м/с) работы пахотного агрегата. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных на различных скоростных режимах позволяет сделать вывод: сходимость результатов возрастает с увеличением скорости агрегата, и на скорости 2,5 м/с экспериментальные и теоретические распределения значений параметров по критерию  $\chi^2$  согласуются с 5% уровнем значимости. Движение колеса трактора по открытой борозде верхнего яруса почвы оказывало благоприятное влияние на агротехнические показатели работы пахотного агрегата. Колесо контактировало с уплотненным нижним ярусом почвы, что позволило снизить отрицательное действие уплотнения почвы движителями трактора, не снижая крошащие способности отвальной поверхности корпуса нижнего яруса.

**Заключение.** Наименьшие удельные энергетические затраты при работе комбинированного плуга достигаются при установке корпуса верхнего яруса на глубину обработки  $h_1=0,12...0,18$  м, корпуса нижнего яруса на глубину обработки  $H_p=0,37...0,41$  м и при интервале смещения корпуса верхнего яруса в сторону необработанной поверхности  $\Delta=0,05...0,12$  м. Наименьшая высота неразрушенных гребней дна борозды обеспечивается при угле постановки рабочей поверхности долота в поперечно-вертикальной плоскости в пределах 25...30°.

#### Библиографический список

1. Гниломедов, В. Г. Комбинированный ярусный плуг / В. Г. Гниломедов, М. П. Ерзамаев, Д. С. Сазонов // Сельский механизатор. – 2014. – № 10. – С. 20-21.
2. Ерзамаев, М. П. Технологические особенности введения в севооборот временно необрабатываемых земель / В. Г. Гниломедов, М. П. Ерзамаев, Т.Н. Сазонова // Достижения науки агропромышленному комплексу : сб. науч. трудов. – Самара : РИЦ СГСХА, 2014. – С. 252-256.
3. Гниломедов, В. Г. Обоснование тягового сопротивления комбинированного плуга для ярусной обработки почвы / В. Г. Гниломедов, Д. С. Сазонов, М.П. Ерзамаев // Известия Самарской ГСХА. – 2013. – № 3. – С. 8-13.
4. Нестеров, Е. С. Тяговое сопротивление чизельного рабочего органа / В. М. Бойков, Е. С. Нестеров, С. В. Старцев, К. К. Окас // Научное обозрение. – 2017. – № 5. – С. 72-77.
5. Нестеров, Е. С. Разработка технологического процесса и почвообрабатывающего орудия для основной обработки почвы : дисс. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Нестеров Евгений Сергеевич. – Саратов, 2011. – 197 с.
6. Артамонов, Е. И. Перспективы и опыт возделывания амаранта с применением нового высевочного устройства / В. Ф. Казарин, И. Ю. Галенко, Е. И. Артамонов // Известия Самарская ГСХА. – 2013. – № 4. – С. 41-44.
7. Ерзамаев, М. П. Повышение эффективности вспашки разработкой и применением способа ярусной обработки почвы и комбинированного плуга : дисс. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Ерзамаев Максим Павлович. – Пенза, 2012. – 169 с.