

УДК 631.354.2

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ УБОРКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО АГРЕГАТА

Г. Г. МАСЛОВ, А. В. ПАЛАПИН, Н. А. РИНАС

Кубанский государственный аграрный университет,
Российская Федерация

В Кубанском ГАУ предложен многофункциональный агрегат (МФА), предназначенный для уборки зерновых культур с одновременным прессованием соломы. Он базируется на использовании серийного энергосредства «Полессе» УЭС-2-280А, навесного зерноуборочного комбайна КЗР-10 и пресс-подборщика соломы ПРП-1,6 (рис. 1). Как видно из рис. 1, комбайн КЗР-10 модернизирован: от него отсоединили устройство для очистки и сбора чистого зерна в бункер, а на его место присоединили пресс-подборщик с приводом от ВОМ энергосредства. Зерновой ворох, выгружаемый в сопровождающее комбайн транспортное средство, перевозится на стационар, где очищается теми же серийными очистителями-накопителями зерна или специальными очистителями по типу канадских МН 230 [1]. Солома укладывается в валок между колесами УЭС-2-280А и прессуется ПРП-1,6 в рулоны.

Предлагаемая технология имеет много преимуществ: экономия топлива 1 кг на 1 т зерна [1], сбор ценной половы без всяких дополнительных приспособлений к комбайну, увеличение производительности комбайна, что очень важно для своевременной уборки урожая, снижение потерь зерна и др.

Цель работы – обосновать методом планирования трехфакторного эксперимента для предлагаемой технологии оптимальную продолжительность уборки, а также оптимальную ширину захвата жатки зерноуборочного комбайна. В качестве отклика использовали минимум функции затрат на уборку урожая и потерь зерна, связанных с увеличением продолжительности уборки [2].

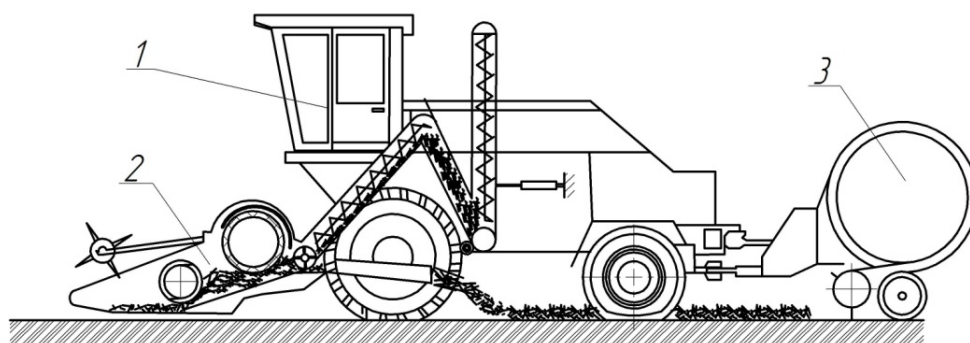


Рис. 1. Многофункциональный агрегат (МФА):
1 – универсальное энергосредство УЭС-2-280А;
2 – навесной зерноуборочный комбайн КЗР-10;
3 – пресс-подборщик соломы ПРП-1,6

При оптимизации функции затрат и потерь $C_{з.п}$ учитывали ширину B_p захвата жатки МФА, урожайность U и количество рабочих дней $n_{р.д.}$

Для оптимизации параметров МФА использовали симметричный композиционный план типа B_k второго порядка, звездные точки которого равны ± 1 [3]–[6]. Изучали влияние трех факторов (U , B_p , $n_{p,d}$) и фиксировали их значения на оптимальных уровнях. Факторы, интервалы и уровни варьирования представлены в таблице.

Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Кодированные обозначения факторов	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Урожайность зерна U , т/га	x_1	5	2	7	12
Ширина захвата жатки B_p , м	x_2	4	2	6	10
Количество рабочих дней $n_{p,d}$, дн	x_3	5	3	8	13

Уровни факторов выбрали таким образом, чтобы оптимальные их значения, рассчитанные теоретически или учитывающие существующие ограничения, попадали в центр интервала варьирования [3]–[6].

Для первого фактора x_1 (урожайность зерна) интервал варьирования составляет от $U_{\min} = 2$ т/га до $U_{\max} = 12$ т/га (см. таблицу).

Для второго фактора x_2 (ширина захвата жатки) интервал варьирования принят от $B_{p \min} = 2$ м до $B_{p \max} = 10$ м.

Для третьего фактора x_3 (количество рабочих дней) принят интервал варьирования от минимального $n_{p,d} = 3$ дня до максимального $n_{p,d} = 13$ дней.

Используя планирование эксперимента, применили уравнение регрессии второго порядка [3]:

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

где Y – величина отклика (значение функции затрат и потерь), тыс. р.; b_0 , b_j , b_{ij} , b_{ii} – значения коэффициентов уравнения; x_i , x_j – факторы; k – количество факторов.

Важный фактор при оптимизации параметров МФА – рабочая скорость движения агрегата принята постоянной (5 км/ч). Согласно рекомендациям КубНИИТиМ реализация оптимальной пропускной способности комбайна выполняется изменением ширины захвата жатки B_p (2–10 м).

После математической обработки экспериментальных данных получили следующие уравнения регрессии функции $C_{3,п}$ затрат и потерь с мнимыми коэффициентами, связанными с действительными следующими зависимостями.

Уравнение регрессии 2-го порядка имеет вид:

$$Y = 2784,274 + 1635,2516x_1 - 96,3403x_2 + 1390,0916x_3 - 847,7625x_1x_2 + 2770,8395x_1x_3 - 391,173x_2x_3 + 779,0165X_2^2 + 570,398X_2^2 + 1084,1315X_3^2; \quad (2)$$

$$x_1 = \frac{X_1 - X_{10}}{D_1}; \quad x_2 = \frac{X_2 - X_{20}}{D_2}; \quad x_3 = \frac{X_3 - X_{30}}{D_3},$$

где x_1 , x_2 , x_3 – мнимые значения 1-го, 2-го, 3-го факторов, соответственно; X_1 , X_2 , X_3 – действительные значения факторов; X_{10} , X_{20} , X_{30} – действительные значения факторов в центре плана; D_1 , D_2 , D_3 – интервалы варьирования факторов.

Проанализировать уравнение (2) в таком виде сложно. Поэтому преобразуем его к так называемому каноническому (стандартному) виду.

Каноническое преобразование заключается в выборе новой системы координат, в которой значительно облегчается геометрический анализ уравнения. Для этого определим центр поверхности второго порядка. Перенесем начало координат в новый центр, при этом в уравнении (2) исчезнут линейные члены x_i . Произведем поворот координатных осей на угол α , при этом в уравнении (2) исчезнут члены x_{ij} [4].

Продифференцировав уравнение по каждой из переменных и приравняв производные нулю, получили систему линейных уравнений.

Решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика: $x_1 = -0,0434$, $x_2 = -0,1584$, $x_3 = -0,6142$.

Подставив в исходное уравнение (2) значения x_1 , x_2 , x_3 , нашли значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика Y_s , которое равно 2329,5 тыс. р. Это значение критерия оптимизации в оптимальной точке (свободный член канонического уравнения).

Определили угол поворота α осей координат поверхности отклика (старых осей) до совмещения с главными осями фигуры, который равен $18,64^\circ$ (рис. 2).

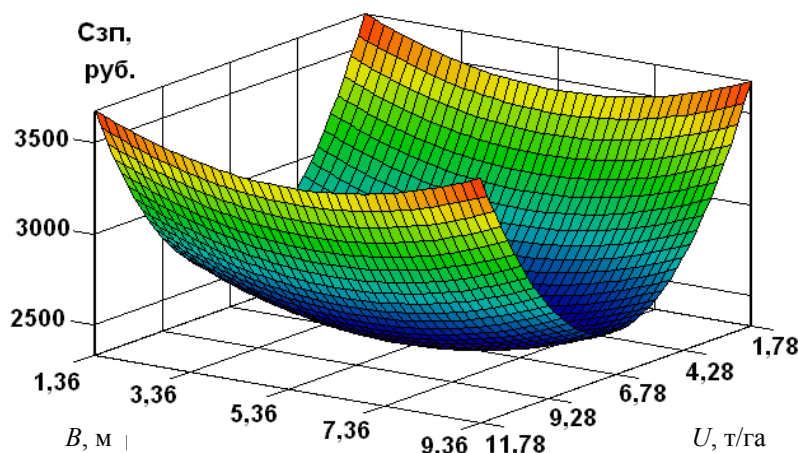


Рис. 2. Поверхность отклика функции $C_{3.n}$ затрат и потерь в зависимости от урожайности и ширины захвата жатки

Уравнение регрессии в канонической форме имеет вид [4]:

$$Y - Y_s = B_1 X_1^2 + B_2 X_2^2 + B_3 X_3^3. \quad (3)$$

В нашем случае

$$Y - 2329,5 = 779,01 X_1^2 + 504,41 X_2^2 + 1150,12 X_3^2. \quad (4)$$

Для более детального представления о поверхности отклика ее изучали с помощью двумерных сечений (рис. 3).

Рассмотрим сечение плоскостью $X_1 S X_2$.

Для этого в исходное уравнение (2) подставим $x_3 = -0,6142$. Тогда

$$\begin{aligned} Y = & 2784,274 + 1635,2516x_1 - 96,3403x_2 + 1390,0916(-0,6142) - 847,7625x_1x_2 + \\ & + 2770,8395x_1(-0,6142) - 391,173x_2(-0,6142) + 779,0165X_1^2 + \\ & + 570,398X_2^2 + 1084,1315(-6142); \end{aligned}$$

$$Y_{1,2} = 3107,875 - 66,598x_1 + 143,92x_2 - 847,7625x_1x_2 + 779,0165x_1^2 + 570,398x_2^2,$$

где $Y_{1,2}$ – функция затрат и потерь при взаимодействии 1-го и 2-го фактора, 3-й фактор в центре плана.

Выполняя каноническое преобразование и решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика: $x_1 = -0,0434$, $x_2 = -0,1584$.

Подставляя найденные значения x_1 , x_2 в уравнение (2), определяем значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика. При этом величина отклика составила $Y_{1,2} = 2329,5$ тыс. р. Угол поворота новых осей α в факторном пространстве относительно начальных равен $38,09^\circ$, а коэффициенты уравнения в канонической форме равны: $B_{11} = 1111,23$, $B_{22} = 238,18$.

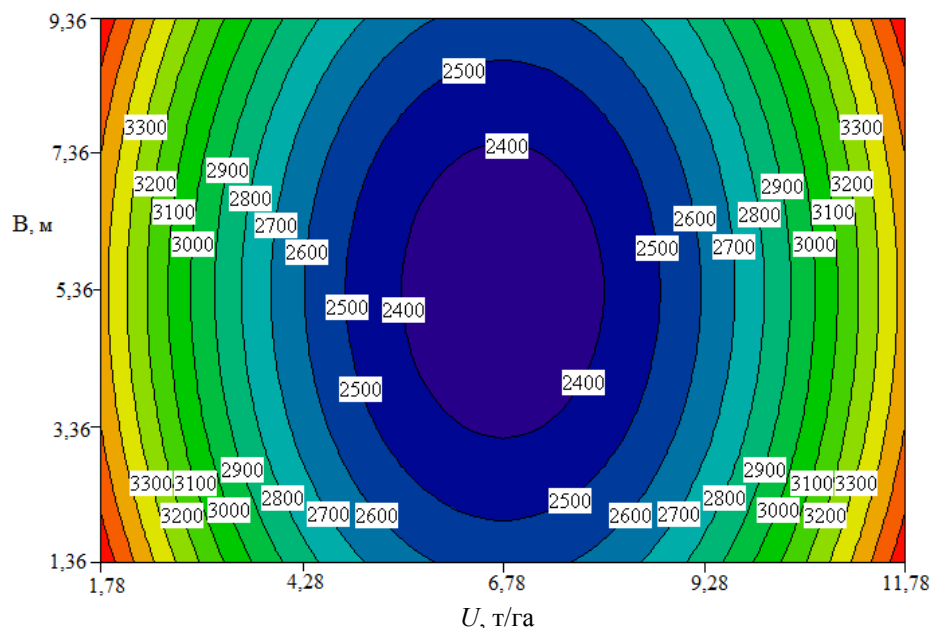


Рис. 3. Двумерное сечение поверхности отклика функции $C_{з.п}$ затрат и потерь в зависимости от урожайности и ширины захвата жатки

Уравнение регрессии в канонической форме [1]–[3]:

$$Y_{1,2} - 2329,5 = 1111,23X_1^2 + 238,18X_2^2. \quad (5)$$

Полученная поверхность отклика представляет собой эллиптический параболоид, а ее центр – экстремум. Так как в уравнении (5) коэффициенты $B_{11} = 1111,23$, $B_{22} = 238,18$ имеют положительные знаки, то центр поверхности отклика является минимумом. Эллипсоид вытянут по той оси, которой соответствует меньшее значение по абсолютной величине коэффициента канонического уравнения (5), в нашем случае по оси X_2 , так как $B_{22} > B_{11}$. Следовательно, в данной паре взаимодействия факторов более существенное влияние на отклик оказывает урожайность.

Рассмотрим сечение поверхности отклика X_2SX_3 , т. е. влияние интервалов варьирования факторов X_2 (ширина захвата) и X_3 (количество рабочих дней) на величину отклика при постоянном факторе X_1 (урожайность). Для этого в исходное уравнение (2) подставим $x_1 = -0,0434$.

Уравнение принимает вид:

$$Y = 2784,274 + 1635,2516(-0,0434) - 96,3403x_2 + 1390,0916x_3 - 847,7625(-0,0434)x_2 + \\ + 2770,8395(-0,0434)x_3 - 391,173x_2x_3 + 779,0165(-0,0434)^2 + 570,398X_2^2 + 1084,1315X_3^2; \\ Y = 2714,784 - 59,55x_2 + 1269,87x_3 - 391,173x_2x_3 + 570,398x_2^2 + 1084,1315x_3^2. \quad (6)$$

Выполнив канонические преобразования и решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика: $x_2 = -0,1584$; $x_3 = -0,6142$ (рис. 4).

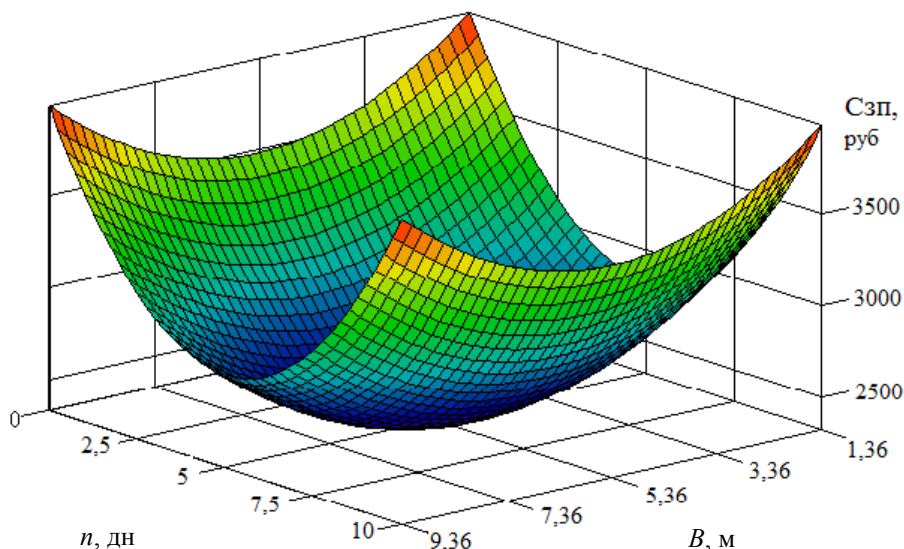


Рис. 4. Поверхность отклика функции $C_{3,n}$ затрат и потерь в зависимости от ширины захвата жатки и количества рабочих дней

Подставили найденные значения x_2 и x_3 в уравнение (6) и определили значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, когда остальные факторы фиксированы, соответственно, в точках центра поверхности отклика ($x_2 = -0,1584$; $x_3 = -0,6142$). Получили значение отклика $Y_{2,3}$ равное 2329,5 тыс. р.

Угол поворота новых осей, α в факторном пространстве относительно начальных, равен $-41,86^\circ$, а коэффициенты регрессии в канонической форме равны: $B_{22} = 504,41$, $B_{33} = 1150,12$.

Уравнение регрессии в канонической форме примет вид:

$$Y_{2,3} - 2329,5 = 504,42x_2^2 + 1150,12x_3^2. \quad (7)$$

Полученная поверхность отклика представляет собой эллиптический параболоид (рис. 5), а ее центр – экстремум. Так как в уравнении (7) коэффициенты $B_{22} = 504,41$, $B_{33} = 1150,12$ имеют положительные знаки, то центр поверхности отклика является минимумом. Эллипсоид вытянут по той оси, которой соответствует меньшее значение по абсолютной величине коэффициента канонического уравнения (7). В нашем случае по оси X_3 , так как $B_{22} < B_{33}$. Следовательно, в данной паре взаимодействия факторов более существенное влияние на отклик оказывает количество рабочих дней.

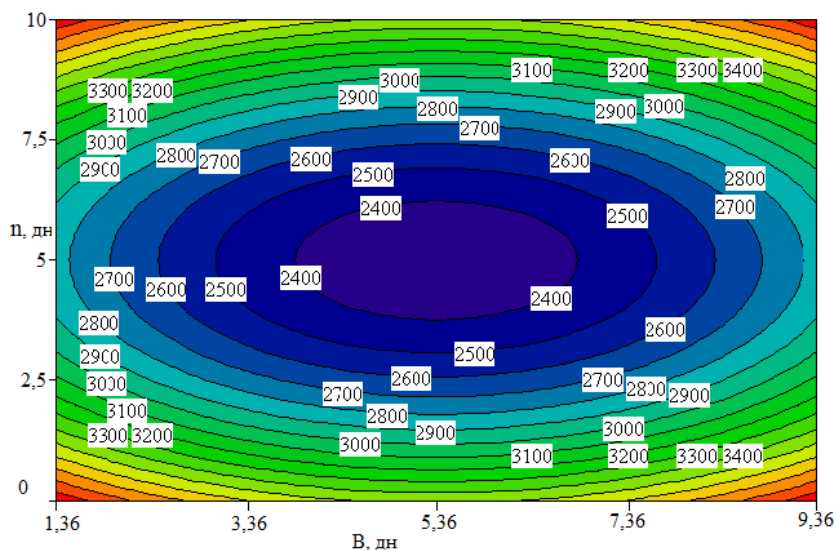


Рис. 5. Двумерное сечение поверхности отклика функции $C_{з.п}$ затрат и потерь в зависимости от ширины захвата жатки и количества рабочих дней

Каноническое преобразование экспериментальной модели, полученной с применением симметричного композиционного плана типа B_k , показало, что середины интервалов варьирования исследуемых факторов имеют новые значения в кодированном виде: $x_1 = -0,0434$, $x_2 = -0,1584$, $x_3 = -0,6142$ и переведены в натуральный вид. Их значения составили:

Урожайность $U = 6,78$ т/га, ширина захвата $B = 5,36$ м, количество рабочих дней $n_{р.д} = 5$ дней.

Таким образом, с помощью планирования трехфакторного эксперимента нами установлены оптимальная продолжительность уборки зерновых культур по предлагаемой технологии – 5 рабочих дней, ширина захвата жатки комбайна 5,4 м при оптимальной урожайности зерна 6,8 т/га.

Литература

1. Гейдебрехт, И. П. Канадская технология уборки сельскохозяйственных культур / И. П. Гейдебрехт // Техника и оборудование для села. – 2006. – № 4. – С. 39.
2. Абаев, В. В. Рациональный типаж комбайнового парка для условий Краснодарского края / В. В. Абаев, Г. Г. Маслов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 12. – С. 52.
3. Адлер, В. А. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / В. А. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1971. – С. 221.
4. Маслов, Г. Г. Оптимизация параметров и режимов работы машин методами планирования эксперимента / Г. Г. Маслов, О. Н. Дидманидзе, В. В. Цыбулевский. – М. : Триада, 2007. – С. 291.
5. Новиков, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новиков, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение, 1980. – С. 304.
6. Маслов, Г. Г. Методика комплексной оценки эффективности сравниваемых машин / Г. Г. Маслов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 10. – С. 31–33.

Получено 24.04.2014 г.