

УДК 631.354.2

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРУЖИННО-ПАЛЬЦЕВОГО АКТИВАТОРА СОЛОМОТРЕСА ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА
В. Ф. КОВАЛЕВСКИЙ, С. В. КУРЗЕНКОВ, А. В. КЛОЧКОВ**

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Могилевская область, Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 05.01.2017)

Современные тенденции повышения урожайности зерновых и зернобобовых культур при одновременном снижении численности комбайнового парка хозяйств Республики Беларусь приводят к необходимости интенсификации рабочего процесса комбайнов. С использованием методики планирования эксперимента обоснована конструкция и выбраны параметры пружинно-пальцевого активатора соломотреса зерноуборочного комбайна. Для повышения полноты выделения зерна из соломистого вороха определены параметры и режим работы для обеспечения максимального суммарного смещения конца пальцев. Приведены основные факторы, оказывающие влияние на максимальное суммарное смещение концов пальцев 0,3 и 0,5 м, установлены уровни их варьирования. Рассмотрены статические характеристики линейных и нелинейных моделей трехфакторного эксперимента для пальцев различной длины. Получено математическое описание задач оптимизации для пальцев пружинно-пальцевого активатора длиной 0,3 и 0,5 м.

Ключевые слова: соломотряс, активатор соломотреса, параметры активатора, анализ факторов, колебания упругих пальцев.

Modern trends in increasing yields of grain and cereal-leguminous crops, while reducing the number of combine harvesters in the Republic of Belarus, lead to the need to intensify the working process of harvesters. Using the technique of experiment planning, we have justified the construction and chosen the parameters of spring-finger activator of grain combine straw walker. To improve the completeness of grain separation from the straw heap, we have determined parameters and mode of operation to ensure maximum total displacement of the end of the fingers. We have presented the main factors affecting the maximum total displacement of the ends of the fingers – 0.3 and 0.5 m, and established the levels of their variation. We have examined static characteristics of linear and nonlinear models of a three-factor experiment for fingers of various lengths. We obtained a mathematical description of optimization problems for the fingers of a spring-finger activator with a length of 0.3 and 0.5 m.

Key words: straw walker, straw walker activator, activator parameters, factor analysis, elastic finger oscillations.

Введение

Опыт использования комбайнов классической схемы свидетельствует, что основная масса потерь при обмолоте приходится на зерно, которое не выделяется из соломистого (грубого) вороха. Это часто наблюдается при уборке высокоурожайных полей, или участков с повышенной влажностью и обилием сорняков [1]. Особенно это касается механизмов комбайна, которые сдерживают его производительность и эффективность работы. Клавишные соломотреса наиболее широко используются в конструкции комбайнов для выделения остатков зерна из соломы. Они не имеют технологических регулировок для повышения производительности и качества работы. Увеличение габаритов соломотресов технически неоправданно. Поэтому изыскание всех резервов данных устройств и исследование возможностей применения дополнительных приспособлений для активизации процесса сепарации зерна из соломистого вороха в процессе его обработки на соломотресе является актуальной задачей.

В результате проведения лабораторных исследований по определению отклонений конца пальца было установлено, что для использования целесообразно принять пальцы длиной 0,3 и 0,5 м. Новизна разрабатываемого пружинно-пальцевого активатора заключается в том, что он состоит из двух пальцев различной длины и имеет различное количество витков пружины кручения.

Анализ литературных источников [2, 3, 4, 5], а также теоретические и экспериментальные исследования позволили установить основные факторы, которые влияют на отклонения конца пальца пружинно-пальцевого активатора: число витков пружины активатора – n (шт.), угловая скорость вращения вала клавиш соломотреса – ω (c^{-1}), усилие действия соломистого вороха – $F(H)$. Усилия действия соломистого вороха обоснованы при проведении серии экспериментальных исследований по деформации соломы прутковыми элементами [6]. Число витков пружины активатора определено исходя из жесткости, длины каскада соломотреса и минимальной длины стеблей убираемой культуры [7, 8]. Скорость вращения клавиш соломотреса обоснована исходя из показателя кинематического режима и режимов работы соломотресов комбайнов [9].

Основная часть

В ходе поисковых экспериментов была определена область варьирования данных факторов (табл. 1). В качестве результирующего фактора выступало максимальное суммарное смещение конца пальца – Y (м), с увеличением которого возрастает интенсивность дополнительного протряхивания соломы. Задача эксперимента заключалась в подборе величин независимых факторов таким образом, чтобы они обеспечили максимальное значение суммарного смещения, что позволит в процессе работы клавишного соломотреса

разуплотнить солоmistую массу и тем самым повысить интенсивность выделения зерна, что приведет к уменьшению потерь зерна за клавишным соломотрясом зерноуборочного комбайна. Для поиска оптимума результирующего фактора использовали шаговый метод [10].

Таблица 1. Факторы, влияющие на максимальное суммарное смещение концов пальцев длиной 0,3 и 0,5 м, их условные обозначения и намеченные уровни варьирования

| Номер фактора | Факторы | Обозначения параметров | Обозначения факторов | Пределы | |
|---------------------------|--|------------------------|----------------------|---------|-------|
| | | | | (-) | (+) |
| <i>Палец длиной 0,3 м</i> | | | | | |
| 1 | Число витков пружины активатора, шт. | n | X_1 | 1 | 3 |
| 2 | Угловая скорость вращения клавиш соломотряса, c^{-1} | ω | X_2 | 15,70 | 22,50 |
| 3 | Усилие действия солоmistого вороха, Н | F | X_3 | 1,67 | 2,16 |
| <i>Палец длиной 0,5 м</i> | | | | | |
| 1 | Число витков пружины активатора, шт. | n | X_1 | 1 | 3 |
| 2 | Угловая скорость вращения клавиш соломотряса, c^{-1} | ω | X_2 | 15,70 | 22,50 |
| 3 | Усилие действия солоmistого вороха, Н | F | X_3 | 2,55 | 7,55 |

Из векторного анализа установили, что направление быстрого изменения функции определяет в основном ее вектор-градиент. На первом этапе он подразумевает, что координаты вектора-градиента в определенной точке равны коэффициентам регрессии линейной модели, записанной в кодированном виде. В связи с этим вначале определили коэффициенты b_0, b_1, b_2, b_3 линейной модели, аппроксимирующие полученные экспериментальные данные:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3. \quad (1)$$

При описании линейной модели независимые факторы, которые были приняты в табл. 1, варьировали на двух уровнях, «нижнем» и «верхнем» соответственно, «нижний» уровень обозначался знаком (-), а «верхний» (+). В результате анализа действующих факторов был реализован полнофакторный эксперимент 2^3 с матрицей планирования, имеющей 8 сочетаний уровней факторов (число проводимых опытов $N = 2^3 = 8$). Матрица планирования трехфакторного эксперимента в кодированном виде формировалась по принципу чередования знаков. В кодированном виде матрица планирования трехфакторного эксперимента для пальцев длиной 0,3 м и 0,5 м имеет стандартный вид [10]. Результаты исследований по результирующему фактору (максимальное суммарное смещение пальца активатора), согласно матрице планирования, представлены для пальцев длиной 0,3 и 0,5 м в табл. 2.

Таблица 2. Значения максимального суммарного смещения после реализации матрицы планирования

| Длина пальца, м | Результирующий фактор, м | Варианты опыта | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 0,3 | Y | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | | 8 | 4 | 2 | 75 | 7 | 8 | 9 | 1 |
| 0,5 | Y | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| | | 25 | 82 | 6 | 25 | 8 | 37 | 07 | 65 |

Согласно табл. 2, установили параметры результирующего фактора при различных вариантах проведения опытов. Однородность этих рядов данных была подтверждена на основании критерия Кохнера и по формуле (2) рассчитаны коэффициенты линейной регрессии.

При проведении расчетов использовали следующую зависимость:

$$B = (X^T X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y_j, \quad (2)$$

где X – матрица планирования эксперимента; Y_j – вектор-столбец, составленный из результатов экспериментов по каждому из параметров оптимизации; B – вектор-столбец эмпирических коэффициентов регрессии.

Анализ этих зависимостей производили по стандартным методикам, описанным в литературных источниках [11, 12]. При построении моделей и дальнейших их оценках использовали прикладную программу Microsoft Excel с уровнем значимости результатов

статистических оценок 0,05. Статистические характеристики линейных моделей трехфакторного эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3. Статистические характеристики линейных моделей трехфакторного эксперимента

| Статистические параметры | Палец длиной 0,3 м | |
|--------------------------|--|---|
| | $Y = 0,01453 + 0,00181X_1 + 0,00046X_2 - 0,00842X_3$ | |
| R^2 | 0,89 | 89 % изменений функции отклика объясняются включенными в модель факторами |
| R | 0,94 | Связь сильная |
| F_0 | 10,5 | R^2 незначим* |
| t_{b0} | 2,61 | Значим** |
| t_{b1} | 3,22 | Значим** |
| t_{b2} | 2,78 | Значим** |
| t_{b3} | -3,67 | Значим** |
| | Палец длиной 0,5 м | |
| | $Y = 0,00962 - 0,00204X_1 + 0,00049X_2 - 0,00101X_3$ | |
| R^2 | 0,99 | 99 % изменений функции отклика объясняются включенными в модель факторами |
| R | 0,99 | Связь сильная |
| F_0 | 160,0 | R^2 незначим* |
| t_{b0} | 9,07 | Значим** |
| t_{b1} | -12,25 | Значим** |
| t_{b2} | 9,99 | Значим** |
| t_{b3} | -15,26 | Значим** |

Примечание: для пальца длиной 0,300 м: *При $F_{кр}=10,5$, **При $t_{кр}=2,08$; для пальца длиной 0,500 м: *При $F_{кр}=16,0$, **При $t_{кр}=2,08$.

На основании приведенных данных был сделан вывод о том, что включенные в модели факторы являются значимыми, следовательно, выбор факторов был произведен правильно. При этом связь между факторами сильная: для пальца длиной 0,3 м – 94 %, а для пальца длиной 0,5 м – 99 %. Коэффициенты статистики превышают допустимое значение, при этом предел изменения коэффициента t – статистики для пальца длиной 0,3 м составляет 2,61–3,67. Для пальца длиной 0,5 м данный коэффициент находится в пределах 9,07–15,26. Для расчета результирующего фактора (максимальное суммарное смещение) использовали коэффициенты в раскодированном виде, которые представлены в табл. 3. В процессе анализа линейной модели оказалась, что она является неадекватной, поэтому было проведено движение по градиенту с учетом коэффициентов линейной регрессии в кодированном виде. Движение по градиенту осуществляли с помощью пропорционального изменения имеющихся факторов в зависимости от коэффициентов линейной модели. Изменение параметров при движении по градиенту начинали с нулевого уровня путем добавления к его величине соответствующего шага. Шаг по каждому фактору определяли по выражению:

$$\Delta X_i = \pm a b_i I_i, \quad (3)$$

где a – коэффициент пропорциональности; I_i – расстояние от центра плана по изучаемому фактору до любой из границ (в натуральных единицах).

При этом знак в формуле характеризует направление движения: знак (+) показывает движение к максимуму функции отклика, а знак (–) – движение к минимуму.

Коэффициент пропорциональности a рассчитывали по следующей зависимости:

$$a = 1/b_0, \quad (4)$$

где b_0 – коэффициент линейной модели.

Данное условие для расчета заданного коэффициента будет действительно только в том случае, если принять за базу $|b_i I_i| = b_0 I_0$. После того, как рассчитали расчетный шаг ΔX_i , по каждому из факторов произвели его корректировку с учетом того, что данный шаг должен быть таким, чтобы по этим данным можно было произвести повторные эксперименты. При этом незначимые факторы при движении по градиенту фиксировали на нулевом уровне. Результаты движения по градиенту для пальцев длиной 0,3 м представлены в табл. 4. По формуле (4) установили коэффициент пропорциональности 476,19 для пальца длиной 0,3 м. По результирующему фактору Y установили суженные границы варьирования факторов до следующих пределов: $X_1 \in [2; 3]$, $X_2 \in [19,1; 22,5]$, $X_3 \in [1,915; 2,16]$. При этом точка, близкая к оптимуму, имеет значение 0,0168 м по результирующему фактору (максимальное суммарное смещение), а количество витков пружины по фактору – $X_1 = 3$. Для дальнейших исследований ввиду малой границы варьирования заданного фактора, а также того факта, что данный фактор не может быть дробным числом, для дальнейшего исследования принимаем $X_1 = 3$ оптимальным

параметром. Следовательно, для пальца длиной 0,3 м число витков будет составлять $n = 3$ шт. В дальнейшем исследовании рассматривалось только два фактора: угловая скорость вращения клавиш соломотряса – X_2 и усилие действия соломистого вороха – X_3 .

Таблица 4. Результаты движения по градиенту для пальца длиной 0,3 м

| Факторы | X_1 | X_2 | X_3 | Y | Примечание |
|--|-----------|-----------|----------|--------|--|
| 0–уровень | 2 | 19,1 | 1,915 | | По результирующему фактору $Y/b_i I_i = 0,0005$, т.е. $b_6 I_6 = 0,0005$ $b_6 = 0,0021$, $a = 1/0,0021 = 476,19$ |
| I_i | 1 | 3,4 | 0,245 | | |
| b_i | 0,0018 | 0,0016 | -0,0021 | | |
| $b_i I_i$ | 0,0018 | 0,0053 | -0,0005 | | |
| Расчетный шаг X | 0,8630952 | 2,5297619 | -0,24063 | | |
| Скорректированный шаг X_i | 1 | 1,7 | 0,245 | | |
| Движение по градиенту (при кругом восхождении) | | | | | |
| Движение к оптимуму | 2 | 19,1 | 1,915 | 0,0110 | Точка, близкая к оптимуму |
| | 3 | 20,8 | 2,16 | 0,0168 | |
| | 3 | 22,5 | 2,16 | 0,0160 | |

Рассмотрим движение по градиенту для пальца длиной 0,5 м. Коэффициент пропорциональности для данного пальца составляет 492,61. Также в процессе анализа результатов движения по градиенту установили суженные границы варьирования факторов до следующих пределов: $X_1 \in [1; 2]$, $X_2 \in [19,1; 22,5]$, $X_3 \in [2,55; 5,05]$. При этом оптимальное значение результирующего фактора составляет 0,0162 м, а количество витков $X_1 = 1$.

Матрица планирования при числе факторов, равном 2 (так как фактор X_1 уже определен), содержала 8 сочетаний уровней варьирования факторов. Матрицу X использовали в следующем виде:

$$X = \begin{Bmatrix} 1 & x_{21} & \dots & x_{31} & x_{21}x_{31} & \dots & x_{21}^2 & x_{31}^2 \\ 1 & x_{22} & \dots & x_{32} & x_{22}x_{32} & \dots & x_{22}^2 & x_{32}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{28} & \dots & x_{38} & x_{28}x_{38} & \dots & x_{28}^2 & x_{38}^2 \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

При последовательном исключении из моделей незначимых факторов получили коэффициенты полиномы второй степени по результирующему фактору.

Проанализировав полученные данные, установили значимость статических параметров на результирующий фактор. В связи с тем, что адекватность статической модели находится на уровне 0,05 [12], то можно сделать вывод о том, что погрешность вычислений при реализации заданных моделей не превышает 5 % в заданном диапазоне варьирования факторов, следовательно, можно их использовать для нахождения оптимальных значений результирующего фактора (максимального суммарного смещения).

С учетом полученных моделей второго порядка произвели анализ поверхностей отклика, в результате чего была поставлена цель – отыскание оптимума по параметру оптимизации. Оптимальные параметры для результирующего фактора представили зависимостями: для пальца длиной 0,3 м:

$$Y = -1,471 + 0,142\omega - 0,0047\omega F - 0,0032\omega^2 + 0,024F^2 \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$\omega \in [19,1; 22,5], F \in [1,915; 2,16];$$

для пальца длиной 0,5 м:

$$Y = 0,5360 - 0,047\omega - 0,0098F + 0,0008\omega F + 0,001\omega^2 - 0,0009F^2 \rightarrow \max, \quad (7)$$

$$\omega \in [19,1; 22,5], F \in [2,55; 5,05].$$

Оптимальное значение для пальца длиной 0,3 м попадает на границу интервала по усилию действия соломистого вороха. При усилии меньше 1,915 Н наблюдается уменьшение параметров результирующего фактора.

Оптимальное значение находится на границе угловой скорости вращения клавиш соломотряса в пределах $19,1 - 22,5 \text{ с}^{-1}$. Это приемлемо, поскольку современные зерноуборочные комбайны работают в пределах заданных частот. Однако исследования проводились в более широком диапазоне от значения частоты вращения вала соломотряса $15,7 \text{ с}^{-1}$.

В результате исследований установлено, что математическое описание задач оптимизации для пальцев ППА длиной 0,3 и 0,5 м имеет следующий вид:

для пальца длиной 0,3 м исходная целевая функция:

$$Y = -1,471 + 0,142\omega - 0,0047\omega F - 0,0032\omega^2 + 0,024F^2 \rightarrow \max,$$

с системой ограничений:

$$\begin{cases} 19,1 \leq \omega \leq 22,5 \\ 1,915 \leq F \leq 2,16; \\ \omega, F > 0 \end{cases}$$

для пальца длиной 0,5 м исходная целевая функция:

$$Y = 0,5360 - 0,047\omega - 0,0098F + 0,0008\omega F + 0,001\omega^2 - 0,0009F^3 \rightarrow \max,$$

с системой ограничений:

$$\begin{cases} 19,1 \leq \omega \leq 22,5 \\ 2,55 \leq F \leq 5,05. \\ \omega, F > 0 \end{cases}$$

В результате решения заданных моделей в Microsoft Excel были получены следующие оптимальные решения:

для пальца длиной 0,3 м

$$Y = 0,0172 \text{ м}; \omega = 21,04 \text{ с}^{-1}; F = 1,915 \text{ Н};$$

для пальца длиной 0,5 м

$$Y = 0,022 \text{ м}; \omega = 19,1 \text{ с}^{-1}; F = 2,936 \text{ Н}.$$

Заключение

В результате проведенных исследований, направленных на обеспечение максимальных суммарных отклонений пальцев и определение оптимальных параметров пружинно-пальцевого активатора, были сделаны следующие выводы:

1. Проведенные исследования позволили установить рациональные интервалы варьирования факторов при работе пружинно-пальцевого активатора: число витков пружины активатора – $n = 1-3$ шт., угловая скорость вращения клавиш соломотряса – $\omega = 15,70 - 22,5 \text{ с}^{-1}$, усилия действия соломистого вороха – $F = 1,67 - 7,55 \text{ Н}$ на максимальное суммарное смещение пальца активатора.
2. Параметры пружинно-пальцевого активатора, в частности количество витков $n = 3$ шт. для пальца длиной 0,3 м, а для пальца длиной 0,5 м – $n = 1$ шт. При этом для пальца длиной 0,3 м данные параметры равны: $\omega = 21,04 \text{ с}^{-1}$; $F = 1,915 \text{ Н}$ и максимальное суммарное смещение при заданных параметрах составляет $Y = 0,0172 \text{ м}$. Для пальца длиной 0,5 м установили следующие оптимальные значения: $\omega = 19,1 \text{ с}^{-1}$; $F = 2,936 \text{ Н}$, при этом максимальное суммарное смещение достигает значения $Y = 0,022 \text{ м}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалевский, В. Ф. Применение соломоотделителей на современных зерноуборочных комбайнах / В. Ф. Ковалевский // Специалист XXI века: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 10-летию со дня образования ун-та, 4-5 июня 2014 г., г. Барановичи, Респ. Беларусь / редкол.: А. В. Никишова (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи: РИО БарГУ, 2014. – С. 177-178.
2. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машин: Элементы теории рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы / Н. И. Кленин, В. А. Сакун. – М.: Колос, 1980. – 671 с.
3. Василенко, И. Ф. Зерновые комбайны СССР и зарубежных стран. Теория и анализ конструкций / И. Ф. Василенко, Н. Е. Авдеев, А. Ф. Морозов, В. М. Соловьев. – М., 1958. – 295 с.
4. Василенко, И. Ф. Теория соломотряса. Труды по земледельческой механике / И. Ф. Василенко. – том VI. – М., 1961.
5. Хайлис, Г. А. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин / Г. А. Хайлис. – Киев, 1992. – 240 с.
6. Ковалевский, В. Ф. Определение усилий на деформацию соломы прутковыми элементами / В. Ф. Ковалевский, А. В. Клочков // Агропанорама. – 2016. – № 1. – С. 9-13.
7. Клочков, А. В. Новый активатор соломотряса зерноуборочного комбайна / А. В. Клочков, В. Ф. Ковалевский // Наше сельское хозяйство. – 2016. – № 13. – С. 14-17.
8. Клочков, А. В. Характеристика технологического процесса пружинно-пальцевого активатора соломотряса / А. В. Клочков, В. Ф. Ковалевский // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса АПК: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 9 июня 2016 г. / М-во с. х. и прод. Респ. Беларусь, РО «Белгроссервис», УО «Белорус. гос. аграр. техн. ун-т»; редкол.: Н. К. Лисай и [др.]. – Минск: БГАТУ, 2016. – С. 210-216.
9. Клочков, А. В. Закономерности выделения зерна из слоя соломы различной плотности при изменении режимов встряхивания / А. В. Клочков, В. Ф. Ковалевский // Инновационные технологии в производстве сельскохозяйственной продукции: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2-3 июня 2015 г. / под ред. В. Б. Ловкиса. – Минск: БГАТУ, 2015. – С. 188-193.
10. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер. – 2-е изд. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
11. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – М.: Колос, 1972. – 200 с.
12. Митков, А. Л. Статические методы в сельхозмашиностроении / А. Л. Митков, С. В. Кардашевский. – М.: Машиностроение, 1978. – 360 с.