



УДК 620.178.162; 631.316.022.4;004.94

**Д.В. Епифанцев, А.В. Ишков, И.Я. Федоренко**  
**D.V. Yefifantsev, A.V. Ishkov, I.Ya. Fedorenko**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА СТРЕЛЬЧАТЫХ ЛАП

### MODELING WEAR OF DUCKFOOT SWEEPS

**Ключевые слова:** стрелчатая лапа, износ, фигура износа, наработка, предельное состояние, аппроксимация, математическая модель.

В процессе эксплуатации на режущую кромку стрелчатых лап (СЛ) воздействуют различные факторы: абразивные частицы почвы и части растений, удары, вибрация и знакопеременные нагрузки, коррозия, поэтому реальная форма изношенной поверхности СЛ оказывается сложной. Износ СЛ приводит к ухудшению качества обработки почвы, повышению тягового сопротивления, увеличению расхода ГСМ, поэтому его необходимо постоянно контролировать, а реальная форма эксплуатируемой СЛ требует адекватного описания. Проведение испытаний на износ рабочих органов при большом числе влияющих факторов представляет определенные технические трудности и плохо воспроизводимо в реальных условиях, поэтому эффективным решением этой задачи может быть моделирование указанного процесса. Экспериментально исследован износ СЛ почвообрабатывающего комплекса «Кузбасс-9,7» при наработке от 5 до 35 га. Предложена математическая модель изменения координат для точек профиля режущей кромки СЛ  $(u, v)$  – фигуры износа, на основе параболической функции

$v = Y(u) = \alpha \cdot \sqrt{\beta^2 + u^2}$  с коэффициентами  $\alpha(t)$  и  $\beta(t)$ , зависящими от наработки и начальных условий. Модель реализована в среде Mathcad Prime 4.0 и адекватно описывает изменение профиля режущей кромки стрелчатых лап по мере их износа (ошибка аппроксимации не превышает 3,4 мм), а также позволяет рассчитывать основные параметры износа:  $I_l$  – линейный износ,  $I_s$  – износ по площади,  $I_m$  – износ по массе.

**Keywords:** duckfoot sweep, wear, wear figure, operating time, limiting state, approximation, mathematical model.

In the process of operation, various factors influence the cutting edge of the duckfoot sweeps (DS): abrasive particles of soil and parts of plants, impacts, vibration and alternating loads, corrosion, so the actual shape of the worn surface of the DS is difficult. Wear of DS leads to deterioration of the quality of soil cultivation, increase of traction resistance, increase of fuel consumption, therefore it should be constantly monitored, and the actual form of the operated DS requires an adequate description. Carrying out tests for the wear of working bodies with a large number of influencing factors presents certain technical difficulties and is poorly reproducible in real conditions, so an effective solution to this problem may be the simulation of this process. The wear of the soil cultivating complex "Kuzbass-9.7" was experimentally studied with a working life of 5 to 35 hectares. A mathematical model is proposed for changing the coordinates of the points of the profile of the cutting edge LP  $(u, v)$  - wear figure, on the basis of the parabolic function

$v = Y(u) = \alpha \cdot \sqrt{\beta^2 + u^2}$  with coefficients  $\alpha(t)$  and  $\beta(t)$ , depending on the operating time and initial conditions. The model is implemented in the environment of software Mathcad Prime 4.0 and adequately describes the change in the profile of the cutting edge of the duckfoot sweeps as they wear out (the approximation error does not exceed 3.4 mm), and also allows calculating the basic wear parameters:  $I_l$  - linear wear,  $I_s$  - surface wear,  $I_m$  - wear by weight.

**Епифанцев Дмитрий Викторович**, магистрант, каф. «Технология конструкционных материалов и ремонт машин», Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 20-33-13. E-mail: dmitryepifantsev@yandex.ru.

**Ишков Алексей Владимирович**, д.т.н., доцент, проф. каф. «Технология конструкционных материалов и ремонт машин», Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 20-33-13. E-mail: alekseyyishk@rambler.ru.

**Федоренко Иван Ярославович**, д.т.н., проф., зав. каф. «Механизация производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 20-33-72. E-mail: ijfedorenko@mail.ru.

**Yepifantsev Dmitriy Viktorovich**, master's degree student, Chair of Technology of Design Materials and Machinery Repair, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 20-33-13. E-mail: dmitryepifantsev@yandex.ru.

**Ishkov Aleksey Vladimirovich**, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Prof., Chair of Technology of Design Materials and Machinery Repair, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 20-33-13. E-mail: alekseyyishk@rambler.ru.

**Fedorenko Ivan Yaroslavovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Agricultural Production Mechanization and Processing, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 20-33-72. E-mail: ijfedorenko@mail.ru.

## Введение

В современном растениеводстве широко применяются интенсивные ресурсосберегающие технологии обработки почвы, совмещающие несколько операций (вспашка, заделывание стерни, посев, внесение удобрений, культивация и пр.) [1]. На используемых для их осуществления сельскохозяйственных машинах – почвообрабатывающих посевных комплексах (ППК) установлены сошники с различными типами рабочих органов (в зависимости от используемой технологии и вида обработки почвы): долота, стрельчатые лапы, диски и пр. В 75-80% случаев при комплектовании МТА для осуществления основной обработки почвы, прямого посева и культивации на ППК устанавливаются стрельчатые лапы (СЛ) [2].

В процессе эксплуатации на режущую кромку СЛ воздействуют различные факторы: абразивные частицы почвы и части растений, удары, вибрация и знакопеременные нагрузки, коррозия. Воздействие этих факторов неравномерное, что вызывает различный износ рабочих органов, установленных на одной машине [3]. Кроме того, на характер износа СЛ влияет место их расположения на почвообрабатывающем орудии – СЛ, установленные в первом и последующих рядах ППК, всегда имеют различный износ, так как первый ряд СЛ обрабатывает недеформированную почву, а последующие ряды СЛ перемещаются уже по частично обработанной, взрыхленной почве [2, 3]. Симметричность формы СЛ несколько сглаживает эти процессы и приводит к тому, что

их износ по крыльям, как правило, оказывается одинаковым, однако в случае неправильной регулировки агрегата, а также при нарушениях размеров и формы стоек крепления, может иметь место и неравномерное изнашивание крыльев СЛ [4]. К неравномерному износу СЛ могут приводить и использованные методы, способы и приемы упрочнения и даже отдельные технологические факторы [5, 6].

Таким образом, реальная форма изношенной поверхности СЛ сложная, зависит от типа почвы, ее влажности, содержания абразивной составляющей, скорости движения МТА, количества рабочих органов на раме и удельной наработки на них и пр. Износ СЛ приводит к ухудшению качества обработки почвы, повышению тягового сопротивления, увеличению расхода ГСМ, поэтому его необходимо постоянно контролировать, а реальная форма эксплуатируемой СЛ требует адекватного описания.

В то же время проведение испытаний на износ рабочих органов при большом числе влияющих факторов представляет определенные технические трудности и плохо воспроизводимо в реальных условиях, поэтому эффективным решением этой задачи может быть моделирование указанного процесса [7]. Причем, адекватная модель износа СЛ должна достоверно описывать профиль режущей кромки этого рабочего органа вплоть до его предельного состояния, которое наступает при достижении наработки в 30-35 га на одну СЛ [8].

**Целью** работы являлась разработка математической модели, описывающей профиль режущей кромки (фигуру износа) и основные параметры износа СЛ ( $l_l$ ,  $l_s$ ,  $l_m$ ) в течение всего периода ее эксплуатации, вплоть до предельного состояния.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись СЛ для ППК «Кузбасс-9,7», производства ОАО «АНИТИМ» (г. Барнаул), со следующими характеристиками (неизношенная деталь): масса – 3,2÷3,3 кг; ширина захвата – 360÷365 мм; толщина – 6 мм; материал – сталь 65Г; способ упрочнения – объемная и ТВЧ-закалка; твердость корпуса СЛ – 55÷60, режущей кромки – 60÷65 HRCэ.

Полевой эксперимент проводили в с. Семёновка Кулундинского р-на Алтайского края весной 2017 г. ППК агрегатировали в составе машинно-тракторного агрегата (МТА) с трактором К-700.

Экспериментальные СЛ устанавливали на культиваторную секцию ППК во второй ряд сошников (за исключением позиций по колее трактора), после чего комплексом проводили прямой посев яровой пшеницы по стерневому фону без осенней обработки. Характеристика почвы: тип – тяжёлая каштановая среднесуглинистая песчаная, твёрдость 1,6÷1,8 МПа, плотность 1090÷1620 кг/м<sup>3</sup>, влажность 19÷21 об.%. Средняя скорость МТА составила 1,94÷2,17 м/с.

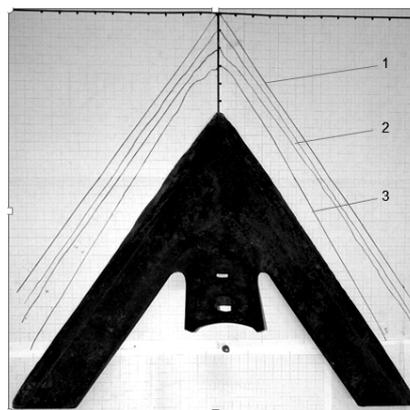
По мере достижения наработки в 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 га на одну СЛ экспериментальные рабочие органы снимали с ППК, а на их место устанавливали неизношенные. Экспериментальные СЛ очищали от почвы и остатков растений металлической щёткой, промывали в воде и сушили.

Для исследования профилей изношенных СЛ применялся метод их ручной обрисовки отточенным карандашом по режущей кромке при различной наработке 5÷35 га на планшете с закрепленной на нем масштабной координатной бумагой (миллиметровкой). Координаты точек профиля фигуры износа ( $u$ ,  $v$ ) для модели фиксировали с шагом 20 мм как в положительную (+), так и в отрицательную область (-) от «0».

Математическую модель износа СЛ реализовывали и решали численным методом в САПР Mathcad Prime 4.0 [9]. Отдельные аппроксимационные зависимости получали в ПО Microsoft Excel-2010 [10].

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 приведены примеры профилей изношенных СЛ при различных наработках. Координаты точек профиля фигуры износа СЛ приведены в таблице 1.



**Рис. 1. Профиль изношенных СЛ при наработке, га: 1 – 5; 2 – 15; 3 – 35**

Как следует из рисунка 1, профиль режущей кромки СЛ сильно изменяется по мере увеличения наработки от треугольного (новая деталь) до криволинейного параболического (изношенная деталь). Кроме того, с ростом наработки происходит укорочение носка СЛ на величину  $\beta$  и изменение угла  $\gamma$  между ее крыльями (рис. 2).

Так как свойства материала СЛ однородны по всему объему детали, то наиболее естественным при построении математической модели ее износа будет сначала моделирование изменения профиля режущей кромки (фигуры износа) с течением времени (наработки), а затем вычисление основных параметров износа ( $l_l$ ,  $l_s$ ,  $l_m$ ) по геометрическим параметрам изменяющейся фигуры износа.

Профиль неизношенной СЛ будем описывать кусочно-линейным уравнением:

$$v = Y(u) = \alpha \cdot |u|, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, определяющий угол  $\gamma$  (рис. 2).

Координаты точек (u, v) профиля режущей кромки СЛ

u, мм, +/-	v при наработке (га), мм						
	5	10	15	20	25	30	35
-20/+20	30,3/30,2	31,1/30,9	33,2/33,2	34	34,1	34,1	33,5
-18/+18	26,5/26,1	27/29,5	30,3/31,7	31,2	33/31,5	33,8	31,8/33,8
-16/+16	22,3/22,0	23,7/26	27,5/30	28,3/32	30/28,7	32,7/30,8	28,8/30,8
-14/+14	20/19,4	20,5/22,7	24,5/27	25,3/28,7	27/26	29,2/28	26,3/28
-12/+12	17,2/16,9	17,5/19,8	21,7/23,6	22,4/25,4	24/23,3	26,3/25	24/25
-10/+10	14,5/14,4	15,1/17	18,8/20,5	19,5/22,2	21/22,2	23,2/22,2	21,6/22,2
-8/+8	11,9/11,8	12,5/14,3	15,8/17,3	16,6/18,8	18/17,8	20/19,2	19,2/19,2
-6/+6	9,2/9,2	9,6/11,4	13/13,2	13,7/15,6	14,9/15,2	16,8/16,3	16,8/16,3
-4/+4	6,5/6,8	6,8/8,9	10/8,8	10,8/12,4	11,8/12,4	13,5/13,5	14,4/13,5
-2/+2	3,9/4,2	5/6,4	7,7/8	7,9/9,1	8,8/9,8	10,8/10,8	12,1/10,8
$\beta$ , мм	2	4	5,2	6,2	8	9,7	10,8

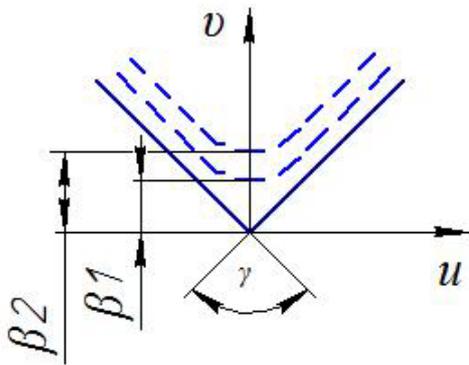


Рис. 2. Пояснения к модели изменения профиля режущей кромки СЛ

При  $\gamma = 90^\circ$ ,  $\alpha = 1$ , а профиль изношенной лапы – параболическим уравнением:

$$v=Y(u) = \alpha \cdot \sqrt{\beta^2 + u^2}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент, определяющий укорочение (износ) носка СЛ (рис. 2).

Из уравнения (2) для неизношенной СЛ имеем:

$$v=Y(u) = \alpha \cdot \sqrt{0^2 + u^2} = \alpha \cdot \sqrt{u^2} = \pm \alpha \cdot u = \alpha \cdot |u|, \quad (3)$$

то есть выбранная модель позволяет описывать профиль (координаты точек режущей кромки) СЛ во всем интервале наработки.

Примем, что эмпирические коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  зависят от времени [11], то есть  $\alpha=S_1(t)$ ,  $\beta=S_2(t)$ .

Установление всех параметров модели возможно по экспериментальным данным и координатам точек профиля СЛ в зависимости от наработки (табл. 1).

Тогда уравнение (3) примет вид:

$$v=Y(u) = S_1(t) \cdot \sqrt{S_2^2(t) + u^2}, \quad (4)$$

а математическая модель окончательно примет вид следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} v_0 = \alpha \cdot |u_0| \\ v = \alpha(t) \cdot \sqrt{\beta^2(t) + u^2} \\ \alpha(t) = -0.0009t^2 + 0.0491t + 1.173 \\ \beta(t) = 0.1661t + 1.3161 \end{cases} \quad (5)$$

Данная система уравнений характеризует изменение координат точек профиля СЛ по мере износа (фигуру износа), в зависимости от наработки при следующих граничных и начальных условиях:  $v_0 = 0$ , мм;  $|u_0| = 0$ , мм;  $t_0 = 0$ , га;  $\alpha(t_0) = 0$ ;  $\beta(t_0) = 90^\circ$ .

Так как коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  зависят от времени, а профили СЛ при различной наработке отличаются, решение системы уравнений (5) проведем численным методом в системе автоматизированного проектирования Mathcad Prime 4.0 (рис. 3).

Уравнения зависимостей  $\alpha=S_1(t)$ ,  $\beta=S_2(t)$  получим в Microsoft Excel-2010, так как это ПО имеет более широкие возможности по аппроксимации и визуализации полученных временных зависимостей [10].

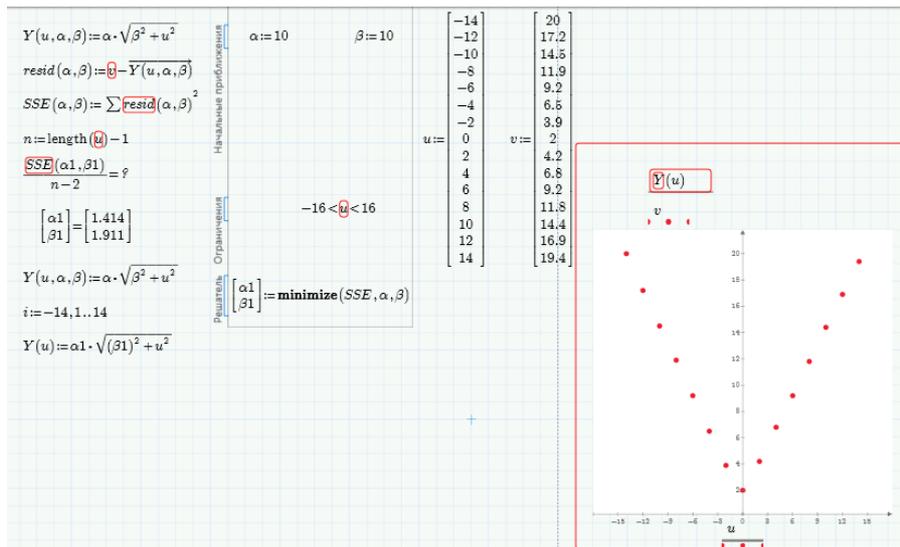


Рис. 3. Скрин-шот модели фигуры износа СЛ, реализованной в MathcadPrime 4.0

Таблица 2

Значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  в зависимости от наработки

Наработка, га	5	10	15	20	25	30	35
$\alpha$	1,414	1,532	1,717	1,784	1,743	1,886	1,691
$\beta$	1,911	3,026	4,037	4,815	5,566	5,834	7,282

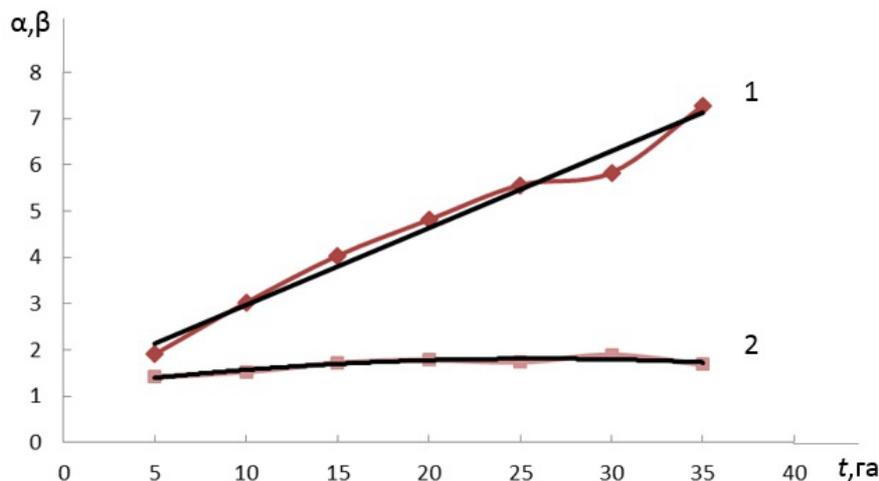


Рис. 4. Аппроксимация зависимостей коэффициентов  $\alpha$  (2) и  $\beta$  (1) от наработки в Microsoft Excel-2010

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ , зависящие от времени (наработки), находим аппроксимацией графиков их зависимостей от наработки в интервале от 5 до 35 га в ПО Microsoft Excel-2010 (табл. 2, рис. 4).

Как видно из рисунка 4, коэффициент  $\alpha$  лучше описывается квадратичной зависимостью (полином 2-й степени, коэффициент корреляции 0,89), с уравнением вида:

$$\alpha(t) = -0.0009t^2 + 0.0491t + 1.173. \quad (6)$$

Аналогичная зависимость для коэффициента  $\beta$  лучше описывается линейной зависимостью (коэффициент корреляции 0,98), с уравнением следующего вида:

$$\beta(t) = 0.1661t + 1.3161. \quad (7)$$

Для того чтобы удостовериться в правильности данной математической модели, проверим ее

на адекватность по критерию Фишера [12]:  $F_{расч} > F_{табл}$ .

$F_{расч}$  находим по известной формуле [12]:

$$F_{расч} = \frac{\sum(u_{расч} - u_{сред,расч})^2}{m} \cdot \frac{n-m-1}{(u_{экспер} - u_{расч})^2} \quad (8)$$

где  $m$  – количество факторов  $u$ , которое влияет на  $Y(u)$ ;

$n$  – количество наблюдений.

Проверим модель (5) по крайним экспериментальным значениям наработки. Находим  $F_{расч}$  – для наработки, равной 5 га:

$$F_{расч} = \frac{484,132089}{1} \cdot \frac{15 - 1 - 1}{1,616588216} = 3893,21$$

Замечаем, что  $F_{табл} = 2,144786688$ , то есть  $F_{расч} > F_{табл}$ .

Находим  $F_{расч}$  – для наработки равной 35 га:

$$F_{расч} = \frac{1093,250735}{1} \cdot \frac{20 - 1 - 1}{25,21712218} = 780,363.$$

Замечаем, что  $F_{табл} = 2,093024054$ , то есть  $F_{расч} > F_{табл}$ .

Расчет для остальных наработок в 10, 15, 20 и 25 га аналогичен.

Как видно из проведенных расчетов (табл. 3), условие критерия Фишера выполняется для всех исследованных наработок, значит, данная математическая модель адекватна, а ее ошибка аппроксимации ( $\sigma$ ) не превышает 3,4 мм.

Таблица 3

Проверка математической модели на адекватность и правильность

Наработка, га	5	10	15	20	25	30	35
$F_{расч}$	3893,21	958,11	1013,07	427,61	1048,85	1063,21	780,36
$F_{табл}$	2,14	2,10	2,09	2,10	2,09	2,11	2,09
Адекватность, +/-	+	+	+	+	+	+	+
Ошибка аппроксимации $\sigma$ , мм	0,135	1,277	1,837	3,389	1,379	1,076	1,483

Полученные выше результаты моделирования фигуры износа СЛ позволяют окончательно рассчитать также и временные зависимости – модели для основных параметров износа:  $l_l$  – линейный износ (по носку СЛ),  $l_s$  – износ по площади,  $l_m$  – износ по массе [13].

Тогда износ по носку будет описываться следующим уравнением:

$$I_l = \left[ 1 - \left( \frac{l_0 - l(t)}{l_0} \right) \right] \cdot 100\% = \left[ 1 - \left( \frac{l_0 - \beta(t)}{l_0} \right) \right] \cdot 100\%,$$

где  $l_0$  – криволинейное расстояние от первого отверстия крепления до носка у неизношенной СЛ, равное 200 мм.

Износ по площади:

$$I_s = \left[ 1 - \left( \frac{S_0 - S(t)}{S_0} \right) \right] \cdot 100\% = \left[ 1 - \frac{S_0 - \int_{-u(t)}^{+u(t)} [\alpha(t) \cdot \sqrt{\beta^2(t) + u^2(t)}] du}{S_0} \right],$$

где  $S_0$  – площадь фигуры (перекрытия) неизношенной СЛ, мм<sup>2</sup>.

А износ по массе будет рассчитываться по следующей формуле:

$$I_m = \left[ 1 - \frac{m_0 - m(t)}{m_0} \right] = \left[ 1 - \frac{m_0 - S(t) \cdot h \cdot \rho}{m_0} \right] = \left[ 1 - \frac{m_0 - h \cdot \rho \cdot \int_{-u(t)}^{+u(t)} [\alpha(t) \cdot \sqrt{\beta^2(t) + u^2(t)}] du}{m_0} \right],$$

где  $m_0$  – масса неизношенной СЛ, г;

$h$  – толщина проката, мм;

$\rho$  – плотность материала СЛ, г/мм<sup>3</sup>.

### Выводы

1. Экспериментально исследован износ стрелчатых лап почвообрабатывающего комплекса «Кузбасс-9,7» при наработках от 5 до 35 га и получены координаты ( $u$ ,  $v$ ) точек профиля режущей кромки (фигуры износа).

2. Предложена, реализована и численно решена (в САПР Mathcad Prime 4.0) математическая модель фигуры износа на основе параболической функции с эмпирическими коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$ , зависящими от наработки.

3. Модель адекватно описывает изменение профиля режущей кромки стрелчатых лап по мере их износа (ошибка аппроксимации не превышает 3,4 мм) и позволяет рассчитывать основные параметры износа:  $l_l$  – линейный износ,  $l_s$  – износ по площади,  $l_m$  – износ по массе.

### Библиографический список

1. Фирсов И.П., Соловьев А.М., Трифонова М.Ф. Технология растениеводства: учеб. издание. – М.: КолосС, 2006.

2. Кривочуров Н.Т., Шайхутдинов А.С. Стрелчатые лапы посевных машин. Износ и эффективность применения: монография. – Saarbrücken: LAP Publ., 2011.

3. Епифанцев Д.В., Ишков А.В. Современные способы восстановления стрелчатых лап импортного производства // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2018. – Кн. 2. – С. 162-163.

4. Соловьев С.А. Влияние расположения стрелчатых лап культиваторов посевных комплексов на их износ // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 11. – С. 40-42.

5. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В., и др. Разработка конструкции упрочняющего покрытия пальцев гусениц сельскохозяйственных тракторов // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 124. – № 3. – С. 53-61.

6. Ишков А.В., Кривочуров Н.Т., Мишустин Н.М. и др. Влияние технологических факторов на износ поверхностно-упрочненных стрелчатых лап // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 10 (72). – С. 92-96.

7. Гордеев А.С. Моделирование в агроинженерии: учеб. пособие. – Мичуринск: Изд-во МичГАУ, 2007.

8. ОСТ 23.2.164-87 Лапы и стойки культиваторов. Общие технические условия.

9. Кирьянов Д.В. Mathcad 15/MathcadPrime 1.0: справочник. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012.

10. Айзек М.П. Вычисления, графики и анализ данных в Excel 2010: справочник. – СПб.: Наука и техника, 2013.

11. Федоренко И.Я., Морозова С.В. Оптимизация и принятие решений в агроинженерных задачах: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2016.

12. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. – М.: Юрайт, 2014.

13. Ишков А.В., Иванайский В.В., Кривочуров Н.Т. и др. Применение вариационных рядов в исследованиях по технологии сельскохозяйственного машиностроения и триботехнике: учеб. пособие. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2017. – 50 с.

### References

1. Firsov I.P., Solovjev A.M., Trifonova M.F. Tekhnologiya rastenievodstva: ucheb. izdanie. – M.: KolosS, 2006.

2. Krivochurov N.T., Shaykhutdinov A.S. Strelchatye lapy posevnykh mashin. Iznos i effektivnost primeneniya: monografiya. – Saarbrücken: LAP Publ., 2011.

3. Yepifantsev D.V., Ishkov A.V. Sovremennye sposoby vosstanovleniya strelchatykh lap importnogo proizvodstva // Agrarnaya nauka – selskomu khozyaystvu: sbornik materialov: v 2 kn. / XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (15-16 fevralya 2018 g.). – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2018. – Kn. 2. – S. 162-163.

4. Solovjev S.A. Vliyanie raspolozheniya strelchatykh lap kultivatorov posevnykh kompleksov na ikh iznos // Traktory i selkhoz mashiny. – 2015. – № 11. – S. 40-42.

5. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., i dr. Razrabotka konstruktsii uprochnyayushchego pokrytiya paltsev gusenits selskokhozyaystvennykh traktorov // Trudy GOSNITI. – 2016. – T. 124. – № 3. – S. 53-61.

6. Ishkov A.V., Krivochurov N.T., Mishustin N.M. i dr. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na iznos poverkhnostno-uprochnennykh strelchatykh lap //

Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2010. – № 10 (72). – S. 92-96.

7. Gordeev A.S. Modelirovanie v agroinzhenerii: ucheb. posobie. – Michurinsk: Izd-vo MichGAU, 2007.

8. OST 23.2.164-87 Lapy i stoyki kultivatorov. Obshchie tekhnicheskie usloviya.

9. Kiryanov D.V. Mathcad 15/MathcadPrime 1.0: spravochnik. – SPb.: BKhV-Peterburg, 2012.

10. Ayzek M.P. Vychisleniya, grafiki i analiz dannykh v Excel 2010: spravochnik. – SPb.: Nauka i Tekhnika, 2013.

11. Fedorenko I.Ya., Morozova S.V. Optimizatsiya i prinyatie resheniy v agroinzhenernykh zadachakh: ucheb. posobie. – SPb.: Lan, 2016.

12. Gmurman V.Ye. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebn. – M.: Yurayt, 2014.

13. Ishkov A.V., Ivanayskiy V.V., Krivochurov N.T. i dr. Primenenie variatsionnykh ryadov v issledovaniyakh po tekhnologii selskokhozyaystvennogo mashinostroeniya i tribotekhnike: ucheb. posobie. – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2017. – 50 s.



УДК 621.365.5

**А.А. Багаев, С.О. Бобровский**  
A.A. Bagayev, S.O. Bobrovskiy

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА В ИНДУКТОРЕ ТВЧ-УСТАНОВКИ

### BASIC PROVISIONS OF INDIRECT CURRENT MEASUREMENT PROCEDURE IN THE INDUCTOR OF HFC INSTALLATION

**Ключевые слова:** ТВЧ-установка, индукционный нагрев, индуктор, колебательный RLC-контур, параметры индуктора, система измерения, калибровка амперметра.

Для технологических процессов поверхностной закалки рабочих органов почвообрабатывающих и режущих орудий сельскохозяйственных машин широко используются установки индукционного нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) ЭЛСИТ 100/40-70. Контроль параметров режима индукционного нагрева, как показала практика, является затруднительным. Проблема заключается в том, что ток в индукторе контролируется в процентах от максимального тока. Измерение тока в процен-

тах не позволяет проводить оптимизационные исследования, посвященные получению максимальной твердости поверхности почвообрабатывающих и режущих рабочих органов сельскохозяйственных машин. Требуется оценивать ток в индукторе в амперах. Сложность заключается в том, что ток в индукторе составляет порядка 2000 А. Прямое измерение тока подобной величины известными техническими средствами является затруднительным. Стандартные сердечники трансформаторов тока из листовой электротехнической стали подвержены значительному нагреву. Предложена методика косвенного измерения тока индуктора ТВЧ-установки. Исследования проведены на примере индуктора, предназначенного для нагрева рабочих органов типа «стрельчатая лапа».