DOI УДК 631.3.004.67

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА УПРОЧНЕННЫХ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И ПОСЕВНЫХ АГРЕГАТОВ

БУЙЛОВ Валерий Николаевич, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

Обоснована необходимость разработки математической модели расчетно-теоретического прогнозирования ресурса рабочего органа почвообрабатывающего агрегата. Предложена формула, представляющая собой такую математическую модель. Предложенная формула вполне адекватно прогнозирует возможный ресурс упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих и посевных агрегатов при их восстановлении.

Введение. Проведение исследовательских работ по совершенствованию технологий упрочнения деталей машин, при их восстановлении, для повышения служебных свойств их рабочих поверхностей предполагает вывод такого математического выражения, которое позволило бы прогнозировать ожидаемое значение их ресурса [1, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 16].

Оценка ресурса при эксплуатации рабочих органов почвообрабатывающего агрегата проводится с учетом стохастичности процесса их изнашивания. Ресурс оценивается количеством обработанных одним рабочим органом гектаров до достижения предельного состояния. Факторами, определяющими их ресурс, являются влажность, твердость и гранулометрический состав почвы; скорость движения агрегата и глубина обработки; форма рабочих органов, а также служебные и механические свойства материалов [2, 4–8,10, 11, 15, 16, 21].

Решение этой задачи, из-за ее многофакторности, вызывает некоторые сложности, но его можно осуществить либо имитационным моделированием, либо аналитически [1, 4, 5, 9, 14, 16, 20]. Для этого определяется критерий наступления предельного состояния. В данном случае это предельная величина износа их режущей части, в связи с чем возникает необходимость проанализировать условия их работы и процесс изнашивания.

Расчетная схема процесса культивации, осуществляющегося соответствующими рабочими органами – лапами, сводится к перемещению в почве клина с плоской поверхностью. В этом случае происходит крошение, скалывание и затем перемещение почвы по рабочей поверхности клина [1, 6, 7, 16, 17, 18].

Воздействующее при этом на клин давление зависит от следующих параметров: его формы и размеров, скорости перемещения, глубины обработки и физико-механических свойств почвы. Абразивные частицы, находящиеся в почве, при контакте с поверхностью клина, обусловливают ее изнашивание. Возрастание скорости перемещения абразива по его поверхности и давления почвы на нее ведет к увеличению величины износа.

Физико-механические свойства почвы оказывают влияние на интенсивность абразивного изнашивания рабочих органов сельскохозяйственных агрегатов. При размере абразива больше 10^{-6} м начинается процесс абразивного изнашивания. Увеличение размера абразива способствует росту интенсивности абразивного изнашивания. Интенсификации процесса изнашивания рабочего органа способствуют содержащиеся в почве в некотором количестве кислоты, щелочи и соли [2, 4, 5, 7, 10, 11, 16].

Известно, что большей износостойкостью обладает деталь с высокой твердостью поверхности и низкой пластичностью сердцевины. Значительное влияние на повышение износостойкости поверхности детали имеет наличие в ее внутренней структуре нитридных, карбидных и боридных фаз, так как они в 3–5 раз эффективнее закалки повышают износостойкость [9, 20].

Для математического описания, с учетом особенностей происходящих процессов расчетная модель должна опираться на некоторые допущения. Моделирование процесса взаимодействия почвы и рабочего органа основывается на допущении, что движется непрерывный поток почвы на неподвижный рабочий орган. Поток почвы содержит одинаковые абразивные частицы сферической формы, плотности и прочности. Встреча движущейся сплошным потоком почвы с поверхностью детали происходит под углом

(крошения) и его скорость одинакова по величине и направлению (скорость движения почвообрабатывающего агрегата) [6, 7, 9, 20].

Рассмотрение процессов абразивного изнашивания приводит к формулировке математической задачи по определению ресурса с применением методов моделирования и теории подобия. Исходными данными является информация о механических, фрикционно-усталостных, микрогеометрических и нагрузочных характеристиках эксплуатируемых почвообрабатывающих рабочих органов. С учетом того, что на поверхность рабочего органа воздействует распределенное давление, создаваемое пластом почвы, выражение для определения ресурса рабочего органа почвообрабатывающего агрегата может быть получено путем интегрального суммирования зависимостей описывающих разрушение микроскопического участка поверхности [4, 5, 7, 9, 13, 16, 20].

В основе расчетной модели по определению ресурса рабочего органа почвообрабатывающего агрегата находится формализованное описание процесса его абразивного изнашивания. Это описание строится на теории усталости с учетом теории термодинамики необратимых процессов, базирующейся на использовании методов исследования механики напряженно-деформированного состояния и разрушения как сплошной, так и неоднородной (имеющего покрытие) среды [16–18].

На основе теоретического и практического изучения абразивного изнашивания поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов [9, 10, 13, 16, 17, 21] с учетом аккумулирования повреждений можно прогнозировать их ресурс при эксплуатации как после изготовления, так и после восстановления по следующей формуле:

$$S^{(T)} = \frac{k^{(\beta)} k^{(\upsilon)} n^{(\sigma)} k^{(\sigma)} k^{(\tau)} k^{(\lambda)} HV^{2,5} V_{из}^{(\tau)} \sigma_{в} k^{(\varepsilon)}}{k^{(\partial)} k_{аб}^{(p)} h_{гл}^{(p)} k^{(га)} R_{аб}^{3} (\sigma_{сж}^{аб})^{2,5} \upsilon_{k}^{п} H_{TB}^{(p)}},$$

где $S^{(T)}$ ресурс рабочего органа почвообрабатывающего агрегата (стрельчатой лапы культиватора), га; $k^{(\beta)}$ – коэффициент направления движения абразива; $k^{(\upsilon)}$ – коэффициент влияния величины скорости движения (0,1), м/с;

$$k^{(\beta)} = \frac{\sin(\beta + \psi)}{\sin(\beta)},$$

где β – угол наклона рабочей поверхности детали (крошения) к горизонту (25), град; ψ – угол отклонения траектории перемещения абразивных частиц от нормали (скалывания), восстановленной к рабочей поверхности (48), град; $n^{(\sigma)}$ – число циклов нагружения при малоцикловой усталости (140...160); $k^{(\sigma)}$ – коэффициент (упрочнения) стойкости при разрушении микрообъемов поверхности детали подвергающейся воздействию абразивных частиц (1...5); $k^{(\tau)}$ – коэффициент, учитывающий микрорезание; $k^{(\lambda)}$ – коэффициент, учитывающий вероятность попадания в одну и ту же микрозону (0,1); HV – твердость режущей части культиваторной лапы, Мпа; $V_{из}^{(\tau)}$ – величина предельного объемного износа культиваторной лапы ($1{,}53 \cdot 10^{-5}$), м^3; $\sigma_{в}$ – предел прочности стали, Мпа; $k^{(\varepsilon)}$ – коэффициент, учитывающий кинетическую энергию взаимодействия.

$$k^{(\varepsilon)} = \frac{f_{тр}^{п} + f_{тр}^{м}}{f_{тр}^{п}},$$

где $f_{тр}^{п}$ – коэффициент трения скольжения абразивных частиц внутри пласта почвы (0,72...0,76); $f_{тр}^{м}$ – коэффициент трения скольжения абразивных частиц по поверхности рабочего органа (0,64...0,67); $k^{(\partial)}$ – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств (учитывающий закрепленность абразивных частиц и давление на рабочую поверхность детали) почвы (20,0...21,0); $k_{аб}^{(p)}$ – коэффициент абразивного состава почвы ($(1{,}5...2) \cdot 10^{8}$), 1/м^3; $h_{гл}^{(p)}$ – глубина обработки почвы при культивации (0,08...0,15), м; $k^{(га)}$ – коэффициент перевода размерности (10^4), м^3/га; $R_{аб}$ – средний радиус абразивных частиц почвы ($(1{,}5...3{,}5) \cdot 10^{-4}$), м; $\sigma_{сж}^{аб}$ – предел прочности абразива на сжатие (80...145), Мпа; $\upsilon_{k}^{п}$ – поступательная скорость культиватора (1,7...3,3), м/с; $H_{TB}^{(p)}$ – твердость почвы (1,0...2,0), Мпа.

Расчеты проводили для деталей из стали 30 и стали 65Г, обработанных по различным технологиям предположительно работающих в одинаковых условиях (рис. 1).

Расчеты показывают, что борирование и наплавка в жидком теплоносителе должны обеспечивать более высокий ресурс рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов.

Полученные при помощи расчетно-математической модели данные необходимо проверить на соответствие реальным значениям ресурса, определенным экспериментально. В лабораторных условиях провести ресурсные исследования рабочих органов не представляется возможным, а так как ресурс этих деталей определяется их износостойкостью, то лабораторные исследования на абразивное изнашивание соответствующих образцов позволит дать предварительную оценку адекватности расчетно-математической модели.

Методика исследований. Процесс фрикционного взаимодействия рабочего органа с почвой имитируется трением скольжения об-

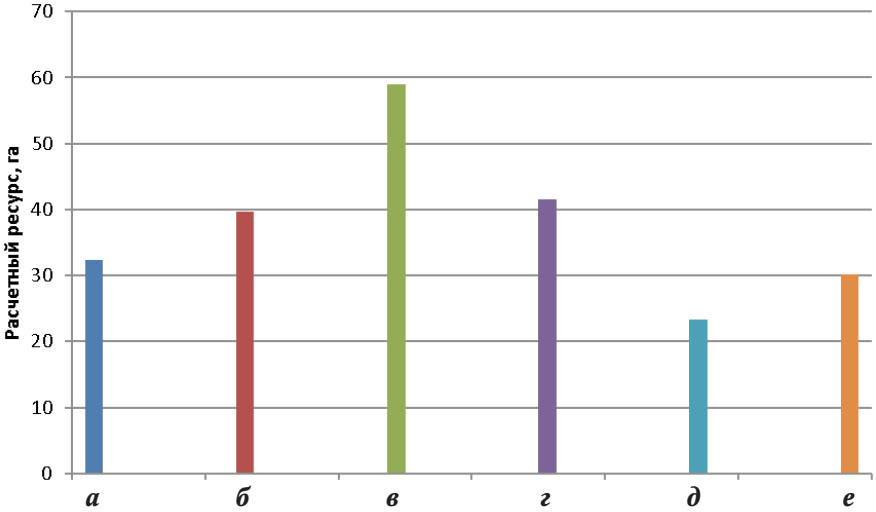


Рис. 1. Прогнозирование величины ресурса рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов упрочняемых (восстанавливаемых) по следующим технологиям: а – цементация; б – электроискровое легирование; в – борирование; г – наплавка в жидком теплоносителе; д – закалка стали 30; е – закалка стали 65Г

разца по абразивной массе. Лабораторные исследования проводили на установке (рис. 2) для испытаний на абразивное изнашивание материалов [9, 16–18, 20].

Плоский цилиндрический образец 1, закрепленный посредством вала 6 в патроне шпинделя сверлильного станка, вращается, подвергаясь определенному давлению, и при этом взаимодействует нижней частью с абразивной массой 2, которая находится в цилиндрическом стальном корпусе 3, установленном на упорном шарикоподшипнике 4.

Днище корпуса представляет собой диск большего, чем корпус, диаметра с закрепленной тягой, идущей к динамометрическому самописцу 5. Такая схема установки позволяет отслеживать и фиксировать момент трения в процессе испытания образца.

Удельная нагрузка на образец определяется по следующей формуле:

$$F_{уд} = M_{гр} L_{рг} / \pi R_{об}^{2} r_{ср}^{ш},$$

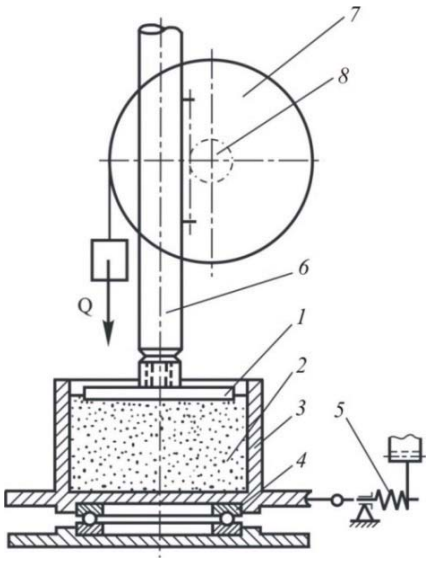
где $M_{гр}$ – масса груза, кг; $L_{рг}$ – длина плеча нагрузочного рычага 7, см; $R_{об}$ – радиус образца, см; $r_{ср}^{ш}$ – радиус средней окружности шестерни 8, см.

Абразивным материалом служил песок кварцевый фракционированный пескоструйный размером частиц 0,25...0,3 мм и влажностью 0–2 %. Большинство почв в естественном состоянии содержат наибольшее количество песчинок этого размера (18–20 %). Такой способ движения исследуемого лабораторного образца по абразиву имитирует процесс изнашивания рабочего органа в условиях эксплуатации при почворежущей обработке [2, 5, 16, 17].

Исследуемые образцы с упрочненной одной торцовой поверхностью представляли собой одинаковые по форме и размерам плоские диски (диаметром 75 толщиной 5 мм).

Образец изнашивался по нижней торцовой поверхности, которая непосредственно контактировала с абразивной массой.

При работе лап при культивации (скорость движения агрегата, давление почвы на рабочую часть) были определены условия испытаний на абразивное изнашивание упрочненных и эталонных образцов. Число оборотов шпинделя 700 мин$^{-1}$ (~ 2,7 м/с), удельная нагрузка на образец составляла ~ 22000 н/м^2 (осевое усилие передаваемое



а *б*

Рис. 2. Установка для лабораторных испытаний на износ: а – общий вид; б – схема: 1 – испытываемый образец; 2 – абразивная масса; 3 – корпус; 4 – подшипниковая опора; 5 – самописец; 6 – шток; 7 – нагрузочный блок; 8 – шестерня

штоком ~ 100 н). Продолжительность этих испытаний устанавливали, исходя из предварительных экспериментов. Для одного образца 15 повторов по 4 мин и после 5 повторов абразивную массу меняли, так как острые грани этих частиц скруглялись, и интенсивность изнашивания снижалась. Испытания повторяли для трех образцов по каждой технологии упрочнения.

Перед опытами образцы подвергали приработке в той же абразивной массе, что и при опытах, чтобы получить установившийся процесс изнашивания.

Величину износа испытываемых и эталонных образцов определяли путем взвешивания до и после испытаний на аналитических весах ВЛА-200г-М с погрешностью не более 0,1 мг. Временной промежуток между взвешиваниями выбирали из расчета, что потеря массы образца вследствие изнашивания при испытании должна составлять не менее 5 мг. Перед взвешиванием образцы промывали горячей водой и просушивали нагретым воздухом.

Результаты исследований. Результаты лабораторных испытаний, проведенных в соответствии с приведенной выше методикой, показали, что в условиях абразивного изнашивания борированный слой существенно снижает износ испытываемых образцов (в 2–3 раза) по сравнению с образцами из термообработанных сталей марок 30 и 65Г (рис. 3). По мере уменьшения толщины борированного слоя темп дальнейшего износа опытных образцов постепенно возрастает и становится таким же, как и у образцов из стали 65Г.

Высокая износостойкость борированного образца объясняется структурой упрочненного слоя, которая представляет собой матрицу из борида дижелеза, содержащего порядка 20 % включений моноборида железа, что способствует обеспечению повышенной стабильности механических свойств и уменьшению количества возможных очагов разрушения при изнашивании.

Если бы упрочненный борированием слой содержал моноборид железа в количестве 25–50 %, то он был бы менее износостойким, так как становился более хрупким из-за повышенного содержания высокобористой фазы.

Результаты лабораторных исследований образцов покрытиями, с наплавленными в жидком теплоносителе хромоникелевыми порошками (ПР-Н67Х18С5Р5), позволяют утверждать, что они обладают высокой износостойкостью. Величина их износа на 35–70 % ниже закаленных образцов из сталей 30 и 65Г. Причинами этого являются мелкозернистая структура и равномерное распределение карбидно-боридных составляющих (твердостью 16,5...18,6 ГПа) в слое, что обеспечивает стабильность физико-механических свойств и уменьшает соответственно количество очагов разрушений при трении. Положительную роль при этом играет способность покрытия образовывать вторичные структуры, выполняющие роль защитных пленок на поверхности контакта. Наплавленные покрытия обладают 3–5%-й пористостью, что не оказывает отрицательного влияния. Если бы покрытия имели пористость порядка 10–12 %, а также шлаковые включения в слое, то возникла бы склонность к образованию зародышевых микротрещин, являющихся очагами разрушения, которые развиваются в процессе трения [3, 19, 21].

Заключение. Приведенные расчетные данные по прогнозированию ресурса рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов, проверенные лабораторными исследованиями на абразивное изнашивание образцов, упрочненных по аналогичным технологиям [8, 12], позволяют утверждать, что различие составляет 10–12 %. Следовательно, представленная расчетная модель может использоваться для прогнозирования ресурса

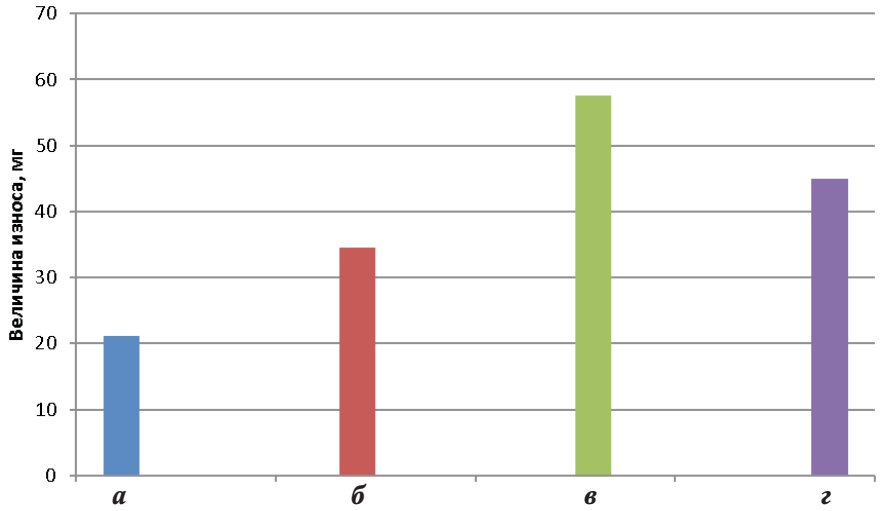


Рис. 3. Результаты сравнительных лабораторных исследований упрочненных образцов на износ: а – борированная сталь 30; б – наплавленная в жидком теплоносителе сталь 30; в – закаленная сталь 30; г – закаленная сталь 65Г

рабочих органов почвообрабатывающих и посевных агрегатов, что позволит точнее планировать ремонтно-обслуживающие мероприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахметшин Т.Ф.* Прогнозирование долговечности лезвий стрельчатых лап культиваторов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2014. – № 5 (49). – Ч. 1. – С. 70–74.

2. *Бартенев И.М., Поздняков Е.В.* Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3(11). – С. 114–123.

3. *Буйлов В.Н., Синичкн В.П.* Использование нагрева в жидких теплоносителях для наплавки, химико-термического и термического упрочнения // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК СНГ: материалы Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов, 1998. – Вып. 10. – С. 42–45.

4. *Буйлов В.Н., Люляков И.В.* Теоретические основы повышения долговечности деталей сельскохозяйственной техники// Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК: материалы Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов, 2003. – С. 107–109.

5. *Буйлов В.Н., Люляков И.В., Еременко В.С.* К вопросу об условиях работы и изнашивания стрельчатых лап культиваторов // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сб. науч. статей / под общ. ред. А.Т. Лебедева. – Ставрополь: АГРУС Ставропольского государственного аграрного университета, 2017. – С. 3–5.

6. *Буйлов В.Н., Люляков И.В., Русинов А.В.* Причины нарушения работоспособности рабочих органов культиваторов // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 3. – С. 61–64.

7. *Горячкин В.П.* Собрание сочинений. – М.: Колос, 1968. – Т. 2. – 445 с.

8. Исследование твердости и износостойкости рабочих органов машин, упрочнённых вибродуговой наплавкой с применением металлокерамических материалов / Н.В. Титов [и др.] // Сварочное производство. – 2014. – № 9. – С. 33–36.

9. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчета на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 357с.

10. *Лебедев К.А., Лебедев А.Л.* Повышение ресурса культиваторных лап // Научное обозрение. – 2015. – № 3. – С. 50–55.

11. *Лялякин В.П., Соловьев С.А., Аулов А.В.* Состояние и перспективы упрочнения и восстановление деталей почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами // Сварочное производство. – 2014. – № 7. – С. 32–36.

12. *Михальченков А.М., Якушенко Н.А.* Восстановление стрельчатых лап // Сельский механизатор. – 2014. – № 3. – С. 24–25.

13. *Новиков В.С., Петровский Д.И.* Повышение долговечности стрельчатых лап культиваторов // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. – 2017. – №4. – С. 49–55.

14. Патент 2114184 Российская Федерация, МКП[6] С 21 D 1/34, В 23 К 35/362. Шлак для нагрева и наплавки металлов и сплавов / В.Н. Буйлов, Б.П. Загородских, В.П. Синичкин, В.К. Петряков, В.В. Сафонов, С.А. Богатырев, А.Л. Нестеров. – № 97115191/02; заявл. 12.09.1997; опубл. 27.06.98. Бюл. № 18.

15. *Русинов А.В., Слюсаренко В.В.* Изменение физико-механических свойств мелиоративных почв в результате механического воздействия // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2015. – С. 30–33.

16. *Севернев М.М., Каплун Г.П.* Износ деталей с.-х. машин. – Л.: Колос, 1972. – 288 с.

17. *Тененбаум М.М., Шамшетов С.Н.* Износостойкость и долговечность сельскохозяйственных машин. – Нукус: Каракалпакстан, 1986. – 149 с.

18. *Ткачев В.Н., Казинцев Н.В., Загребин А.В.* Повышение долговечности почвообрабатывающих рабочих органов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1991. – № 12. – С. 46.

19. *Хасуи А., Моригаки О.* Наплавка и напыление. – М.: Машиностроение, 1985. – 231 с.

20. *Хрущов М.М.* Закономерности абразивного изнашивания // Износостойкость. – М.: Наука, 1975. – С. 5–27.

21. Целесообразность восстановления и пути повышения ресурса режущего инструмента промышленных мясорубок / Ф.Я. Рудик [и др.] // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 115. – С. 128–133.

Буйлов Валерий Николаевич, *канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническое обеспечение АПК», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

410056, г. Саратов, ул. Советская, 60.

Тел.: (8452) 74-96-29.

Ключевые слова: *рабочий орган; ресурс; абразив; почва; изнашивание; упрочнение; наплавка; закалка; борирование.*

DESIGN EVALUATION OF PREDICTION OF THE RESOURCE OF STRENGTHENED IN THE RESTORATION OF WORKING BODIES OF TILLAGE AND SOWING UNITS

Builov Valeriy Nikolaevich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Technical Support of AIC", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vailov. Russia.*

Keywords: *working body; resource; abrasive; soil; wear; hardening; surfacing; quenching; boration.*

The necessity of developing a mathematical model of design and theoretical prediction of the resource of the working body of a soil-cultivating unit is substantiated. A formula that represents such a mathematical model is proposed. It adequately predicts the possible resource of strengthened working bodies of tillage and sowing units when they are restored.