

# ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРУЖИННЫХ ЗУБЬЕВ СЕНОУБОРОЧНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

С.Ю. Элькин, В.В. Сафонов, И.Т. Полупанов

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований новой технологии восстановления пружинных зубьев сеноуборочных машин на примере сложно - профильных зубьев поперечных граблей ГП-14. Научный подход к решению поставленной задачи состоял в разработке теоретического обоснования новой технологии восстановления и экспериментальном исследовании физико-механических свойств материала и рабочих параметров восстановленных пружинных зубьев. Выявлены функциональные зависимости влияния рациональных режимов восстановления пружинных зубьев на их параметры и определен рекомендуемый режим, положенный в основу технологического процесса восстановления пружинных зубьев электромеханической обработкой.*

**Ключевые слова:** сеноуборочные машины, пружинные зубья, спираль Архимеда, логарифмическая кривая, микроструктура, упрочнение, электромеханическая обработка, планирование эксперимента, рекомендуемый режим восстановления.

## Введение

Эффективность работы сеноуборочных машин зависит от надежности основных узлов и деталей, возможности выполнения заданных функций с минимальными затратами труда и материальных средств в течение длительного времени.

Потери сена в результате снижения рабочих параметров пружинных зубьев сеноуборочных машин, затягивания агротехнических сроков сенокосения, а также нарушения условий получения высококачественного сена составляют более 25 % от возможного сбора. При наличии в нашей стране более 57,5 млн га сенокосных угодий даже минимальные нарушения в работе пружинных зубьев сеноуборочных машин приносят значительные убытки.

Цель работы – повышение эффективности сеноуборочных машин.

## Методика проведения исследования и используемое оборудование

Методика исследования включала в себя лабораторные, стендовые и эксплуатационные испытания как новых пружинных зубьев, так и восстановленных различными способами. Дефекты пружинных зубьев, отработавших ресурс, и коэффициенты их повторности определяли в ходе

исследования ремонтного фонда этих деталей.

Совершенствование технологии восстановления пружинных зубьев потребовало проведения комплекса исследований с применением методики планирования эксперимента при поиске оптимальных условий для выявления интерполяционных зависимостей параметров пружинных зубьев от режимов электромеханической обработки и определения рекомендуемого режима восстановления.

Физико-механические свойства материала восстановленных пружинных зубьев сеноуборочных машин исследовали с помощью микроструктурного и рентгенографического анализов, а также в ходе статических, динамических стендовых и эксплуатационных испытаний. Полученные результаты исследований обработаны с помощью методов математической статистики при использовании типовых программ и персональной ЭВМ.

## Теоретический анализ

Пружинные зубья являются рабочими органами многих сеноуборочных машин, к которым относятся поперечные грабли ГП-14, боковые грабли ГБУ-6,0, фронтальные колесно-пальцевые грабли-валкообрачиватели ГВ-

Ф-3,0, роторные грабли ПН-600, подборщик-полуприцеп ТП-Ф-4,5, барабанный подборщик с пружинными пальцами, подборщик с убирающимися пальцами, полотенно-пальцевый подборщик, цепочно-пальцевый подборщик, рулонные пресс-подборщики ПРП-16 и ПРФ-750 и др.

Пружинные зубья сеноуборочных машин работают в условиях асимметричного циклического нагружения. В результате длительной эксплуатации их рабочие параметры изменяются, что приводит к ухудшению качества подбора и сгребания сена; увеличению потерь сена; нарушению условий скручивания сена в валок максимальной плотности; сгуживанию сена впереди грабеля и чрезмерному загрязнению его землей; снижению скорости движения грабеля и их производительности.

Пружинные зубья сеноуборочных машин представляют собой плоские спиральные пружины. Рабочими параметрами пружин являются потенциальная энергия  $W$  и смещение свободного конца зуба  $\Delta f$  при приложении к нему усилия [1].

Зависимость потенциальной энергии  $W$  от изгибающего момента  $M$ , возникающего при приложении усилия  $P$  к свободному концу пружинного зуба, называется характеристикой спиральной пружины.

Для восстановления пружинных зубьев необходимо провести комплекс технологических операций, которые повысят их потенциальную энергию до величины, соответствующей новым зубьям. Совмещенные характеристики нового 1 и восстановленного 4 пружинных зубьев представлены на рис. 1. Для совмещения характеристик необходимо переместить характеристику 2 зуба, отработавшего ресурс, в начало координат. Такое перемещение достигается изгибом каждого участка пружинного зуба в направлении, противоположном направлению нагружения при эксплуатации, а также поворотом полученной характеристики 3 против часовой стрелки на угол  $\alpha$ . На практике поворот на угол  $\alpha$  достигается в результате технологических операций, которые улучшают физико-механические свойства материала прутка пружинного зуба.

Потенциальную энергию восстановленного зуба  $W_{\text{вос}}$ , которая должна быть равна потенциальной энергии нового грабельного зуба  $W_{\text{н}}$ , определяют по формуле

$$W_{\text{вос}} = W_{\text{ост}} + \Delta W_f + \Delta W_E; \quad (1)$$

$$W_{\text{ост}} = \frac{M_{\text{ост}}^2 l}{2E_{\text{ост}} I} + \frac{N_{\text{ост}}^2 l}{2E_{\text{ост}} F}; \quad (2)$$

$$\Delta W_f = \frac{\Delta M_f^2 l}{2E_{\text{ост}} I} + \frac{\Delta N_f^2 l}{2E_{\text{ост}} F}; \quad (3)$$

$$\Delta W_E = \frac{\Delta M_E^2 l}{2\Delta E I_E} + \frac{\Delta N_E^2 l}{2\Delta E F_E}, \quad (4)$$

где  $W_{\text{ост}}$  – остаточная потенциальная энергия грабельного зуба, отработавшего ресурс, Дж;  $M_{\text{ост}}$  – остаточный изгибающий момент, возникающий в прутке зуба при его деформации после эксплуатации, Н·м;  $N_{\text{ост}}$  – остаточное продольное усилие, Н;  $l$  – длина прутка зуба, м;  $E_{\text{ост}}$  – модуль упругости 1-го рода материала прутка зуба, отработавшего ресурс, Па;  $I$  – момент инерции сечения прутка зуба, м<sup>4</sup>;  $F$  – площадь сечения прутка зуба, м<sup>2</sup>;  $\Delta W_f$  – приращение (увеличение) потенциальной энергии грабельного зуба, отработавшего ресурс в результате его деформирования изгибом в направлении, противоположном направлению нагружения при эксплуатации, Дж;  $\Delta M_f$  – приращение (увеличение) изгибающего момента грабельного зуба, отработавшего ресурс в результате пластической деформации изгиба прутка зуба на величину  $\Delta f$  в направлении, противоположном направлению нагружения при эксплуатации, Н·м;  $\Delta N_f$  – приращение (увеличение) продольного усилия, Н;  $\Delta W_E$  – приращение (увеличение) потенциальной энергии в результате воздействия на материал

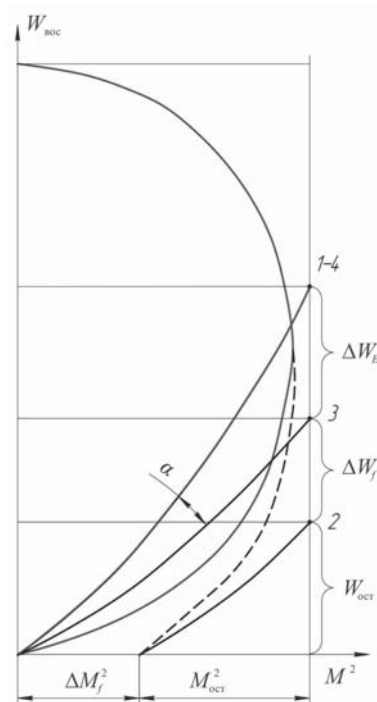


Рис. 1. Характеристика пружинного зуба

прутка зуба, отработавшего ресурс, технологическими операциями, улучшающими его физико-механические свойства, Дж;  $\Delta M_E$  – приращение (увеличение) изгибающего момента в результате воздействия на материал прутка грабельного зуба технологическими операциями, улучшающими его физико-механические свойства, Н·м;  $\Delta E$  – приращение модуля упругости кольцевого сечения прутка зуба в результате воздействия на него технологическими операциями процесса восстановления, Па;  $I_E$  – момент инерции кольцевого сечения упрочненного прутка зуба, м<sup>4</sup>;  $\Delta N_E$  – приращение (увеличение) продольного усилия в результате воздействия на материал прутка зуба технологическими операциями, улучшающими его физико-механические свойства, Н;  $F_E$  – площадь кольцевого сечения упрочненного прутка зуба, м<sup>2</sup>.

Подставляя формулы (2) – (4) в формулу (1), получим

$$W_{\text{вос}} = \frac{M_{\text{ост}}^2 l}{2E_{\text{ост}} I} + \frac{N_{\text{ост}}^2 l}{2E_{\text{ост}} F} + \frac{\Delta M_f^2 l}{2E_{\text{ост}} I} + \frac{\Delta N_f^2 l}{2E_{\text{ост}} F} + \frac{\Delta M_E^2 l}{2\Delta E I_{\#}} + \frac{\Delta N_E^2 l}{2\Delta E F} \quad (5)$$

Задачу поиска комплекса технологических операций, обеспечивающих восстановление пружинных зубьев грабель, решали с позиции выбора технологических операций, позволяющих восстановить рабочие параметры зубьев и снизить скорость релаксационных процессов, протекающих в пружинных сталях при эксплуатации.

На основании изложенного выдвинута гипотеза о возможности восстановления рабочих параметров пружинных зубьев в результате непрерывно-последовательного изгиба каждого участка зуба в направлении, противоположном направлению нагружения при эксплуатации; нагрева; поверхностного пластического деформирования; закалки и отпуска.

Выполнение указанных технологических операций обеспечивается при высокотемпературной термомеханической обработке, являющейся эффективным средством создания барьеров для перемещения дислокаций при релаксации напряжений в пружинных сталях. По технологическим, экономическим и конструктивным показателям проведение высокотемпературной термомеханической обработки электромеханическим способом является наиболее целесообразным.

Сечение прутка зуба, упрочненного электромеханической обработкой (ЭМО), показано на рис. 2.

Момент инерции упрочненного кольцевого сечения прутка зуба можно представить в виде

$$I_E = \pi r^3 \delta, \quad (6)$$

где  $r$  – средний радиус кольцевого сечения прутка зуба, упрочненного ЭМО, м;  $\delta$  – толщина кольцевого сечения прутка зуба, упрочненного ЭМО, м.

Толщину  $\delta$  можно определить по формуле

$$\delta = \frac{I_T U K \mu \eta}{c \nu p r T_{\phi}}, \quad (7)$$

где  $I_T$  – сила тока, А;  $U$  – напряжение во вторичной цепи трансформатора, В;  $K$  – коэффициент, учитывающий часть теплоты на разогрев металла в зоне контакта роликов и прутка зуба ( $K = 0,8$ );  $\mu$  – коэффициент, учитывающий часть теплоты в зоне контакта, которая отводится с охлаждающей средой ( $\mu = 0,2$ );  $\eta$  – коэффициент, учитывающий потери во вторичной цепи трансформатора ( $\eta = 0,41043$ );  $c$  – удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·°C);  $\nu$  – скорость обработки, м/с;  $p$  – периметр поверхности контакта приводных роликов, м;  $\rho$  – плотность материала прутка зуба, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{\phi}$  – температура фазового превращения металла, °C.

Площадь кольцевого сечения  $F_E$  прутка зуба ЭМО определяли по формуле

$$F_E = \pi d \delta. \quad (8)$$

Подставляя формулы (6) – (8) в уравнение (5), получим полную потенциальную энергию восстановленного зуба с учетом теоретических режимов ЭМО:

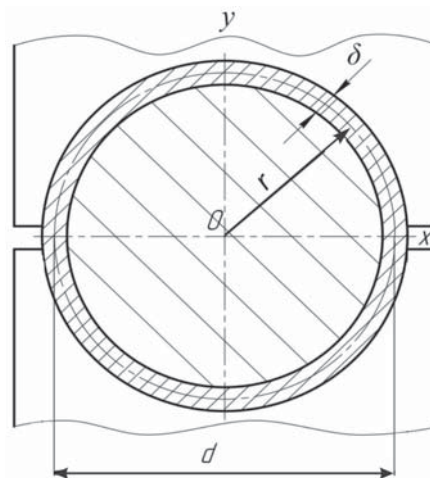


Рис. 2. Сечение прутка пружинного зуба, упрочненного ЭМО:

$d$  – диаметр прутка

$$W_{\text{вос}} = W_{\text{н}} = \frac{M_{\text{ост}}^2 l}{2E_{\text{ост}} I_{\text{т}}} + \frac{N_{\text{ост}}^2 l}{2E_{\text{ост}} F} + \frac{\Delta M_f^2 l}{2E_{\text{ост}} I_{\text{т}}} + \frac{\Delta N_f^2 l}{2E_{\text{ост}} F} + \frac{\Delta M_E^2 l c v p p T_{\text{ф}}}{2\Delta E \pi r^3 I_{\text{т}} U K \mu \eta} + \frac{\Delta N_E^2 l}{2\Delta E \pi d \delta}. \quad (9)$$

### Способ восстановления зубьев

Изложенные теоретические предпосылки позволили разработать способ восстановления пружинных зубьев с использованием устройства [2] (рис. 3), который заключается в следующем. Пружинный зуб 7, отработавший ресурс, свободным концом устанавливается на направляющий ролик 11 и продвигают между двумя токоподающими обжимающими роликами 5 и 10, закрепленными в корпусе 4 (рис. 4). Последние пружинами 3 прижимаются к поверхности зуба 7 с усилием  $N$ . Для нагрева поверхности контакта роликов 5 и 10 с зубом 7 служит трансформатор 2, который включается магнитным пускателем 1. Токоподводы трансформатора 2 закреплены на осях токоподающих обжимаю-



Рис. 3. Устройство для восстановления пружинных зубьев ЭМО

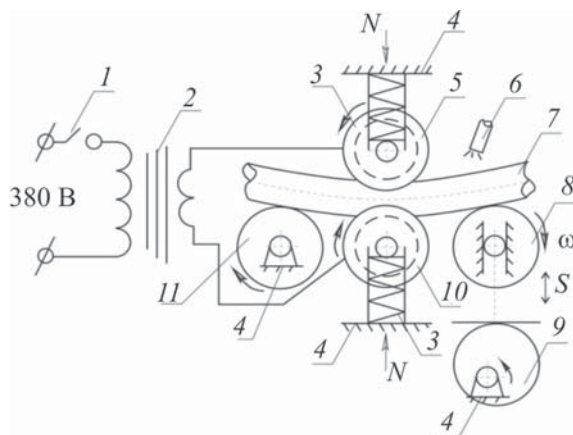


Рис. 4. Принцип работы устройства для восстановления пружинных зубьев ЭМО

щих приводных роликов 5 и 10. Охлаждающая жидкость подводится в зону нагрева по трубке 6 [3].

Одновременно придается вращение токоподающим обжимающим приводным роликам 5 и 10, между которыми пропускается электрический ток. Ролики 5, 10 обкатывают восстанавливаемый зуб 7 по всей длине, подвергая сечение между ними нагреву, поверхностному пластическому деформированию, гибке под действием ролика 8 и охлаждению. Для закалки в зону нагрева подается охлаждающая жидкость – масло АС-8.

### Результаты исследований

Установлено, что основными дефектами ремонтного фонда пружинных зубьев, подлежащих восстановлению, являются снижение потенциальной энергии ниже заданной техническими условиями (приблизительно 78 % зубьев), отклонение формы рабочей зоны зуба, отработавшего ресурс, от заданной спиральной формы нового зуба (приблизительно 63 % зубьев) и смещение свободного конца пружинного зуба (приблизительно 60 % зубьев).

С помощью методики планирования эксперимента разработаны математические модели, описывающие влияние режимов восстановления на параметры пружинных зубьев [4]. Решением системы уравнений, описывающих влияние режимов восстановления на потенциальную энергию и смещение свободного конца пружинного зуба в свободном состоянии, выявлена факторная область рациональных режимов восстановления (рис. 5), позволяющая выбирать рекомендуемые режимы обработки, обеспечивающие восстановление параметров пружинных зубьев в соответствии с техническими требованиями. В данном случае рекомендуемым режимом обработки является следующий: сила тока  $I_{\text{т}} = 3400$  А; усилие прижатия роликов  $N = 560$  Н; линейная скорость движения роликов  $v_p = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м/с.

Микроструктурные исследования показали, что структура материала пружинных зубьев, восстановленных при рекомендуемом режиме, имеет слоистый характер (рис. 6). Поверхностный слой толщиной до  $4 \cdot 10^{-5}$  м представляет собой мелкодисперсный бесструктурный мартенсит. Микроструктура материала в сердцевине пружины – сорбит отпуска [5].

Рентгеноструктурному анализу подвергали образцы новых и восстановленных при рекомен-



дуюмом режиме пружинных зубьев. Результаты измерения остаточных напряжений в материале представлены на рис. 7. Фактическое распределение остаточных напряжений по сечению прутка является благоприятным с точки зрения повышения выносливости материала зуба.

Результаты измерения плотности дислокаций, предела прочности в новых пружинных зубьях и пружинных зубьях, восстановленных ЭМО, приведены на рис. 8.

Партия пружинных зубьев, восстановленных ЭМО, была установлена на поперечные грабли ГП-14. Для сравнения новые и восстановленные зубья устанавливали попарно. По

окончании эксплуатации в течение трех летних сезонов (2007 – 2009 гг.) пружинные зубья подвергали эксплуатационным испытаниям.

### Заключение

На основании результатов испытаний установлена высокая надежность зубьев, восстановленных ЭМО. Рабочие параметры восстановленных деталей находятся на уровне новых деталей и соответствуют техническим требованиям на дефектацию. Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления пружинных зубьев поперечных граблей ГП-14 в производство составил 119 700 руб. при производственной программе восстановления зубьев 1000 шт.

### Список литературы

1. Пат. 2375163 РФ. Способ восстановления зубьев поперечных граблей / С.Ю. Элькин, И.Т. Полупанов, В.В. Сафонов, В.Ф. Кузнецов. Опубл. 10.12.2009.
2. Пат. на полезную модель 79262. Устройство для гибки кольцевых деталей / С.Ю. Элькин,

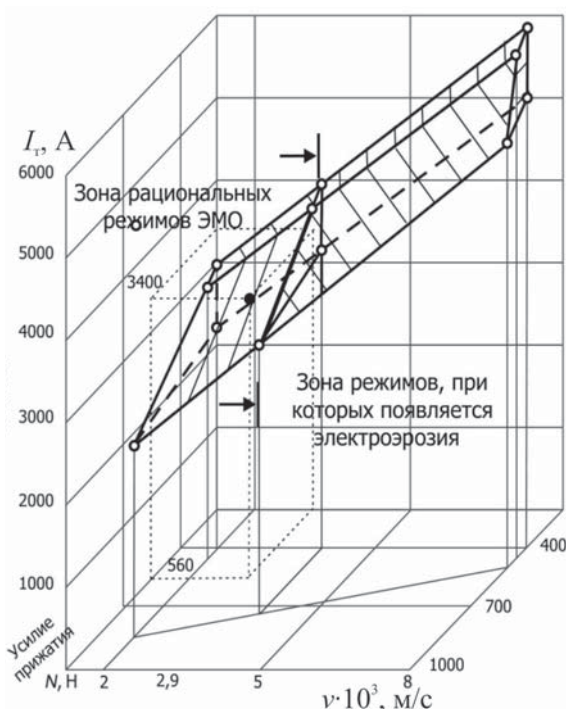


Рис. 5. Факторная область рациональных режимов восстановления

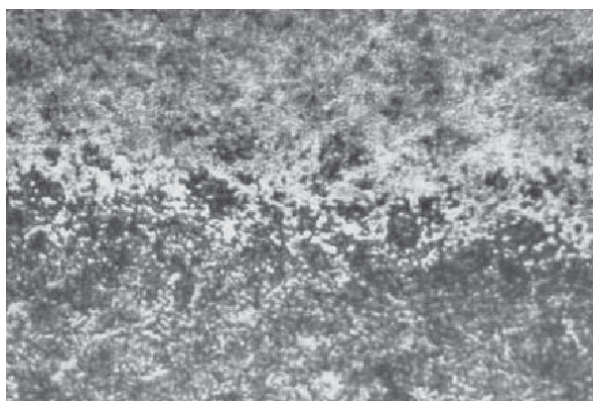


Рис. 6. Микроструктура материала восстановленных пружинных зубьев (имеет две характерные зоны)

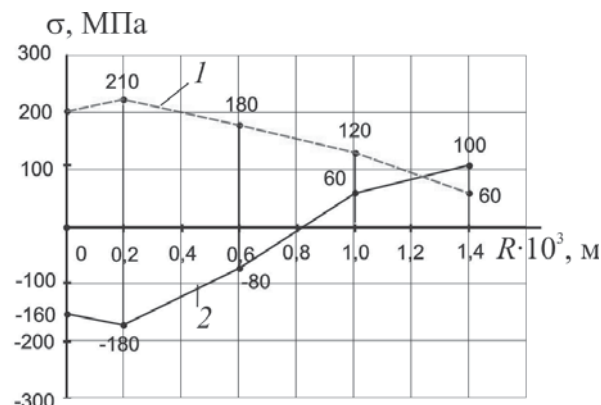


Рис. 7. Остаточные напряжения  $\sigma$  в материале восстановленного зуба и нового зуба:

1 – новый зуб; 2 – восстановленный зуб;  
 $R$  – расстояние от центра сечения прутка до точки рентгеноструктурного анализа

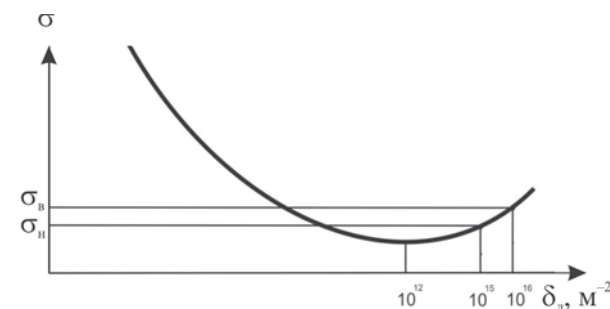


Рис. 8. Зависимость предела прочности новых  $\sigma_n$  и восстановленных  $\sigma_v$  зубьев от плотности дислокаций  $\delta_d$

- И.Т. Полупанов, В.В. Сафонов, В.Ф. Кузнецов. Заявка № 2008127832 от 08.07.2008.
3. Элькин С.Ю., Полупанов И.Т. Аналитическое обоснование технологии восстановления зубьев поперечных граблей // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2008. № 3. С.80 – 84.
  4. Полупанов И.Т. Результаты исследования микроструктуры остаточных напряжений и плотности дислокаций зубьев граблей, восстановленных электромеханической обработкой: матер. Междунар. научн.-практ. конф., посвященной 100-летию со дня рождения проф. В.В. Красникова. Саратов, 2008. С. 95–97.
  5. Полупанов И.Т. Исследование влияния режимов восстановления на рабочие параметры зубьев поперечных граблей: матер. Междунар. научн.-практ. конф., посвященной 100-летию со дня рождения проф. В.В. Красникова. Саратов, 2008. С. 91–95.

*Материал поступил в редакцию 19.08.2011*

**ЭЛЬКИН  
Сергей Юрьевич**

E-mail: [elkinsyu@yandex.ru](mailto:elkinsyu@yandex.ru)

Доктор технических наук, профессор кафедры надежности и ремонта машин ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова». Сфера научных интересов – ремонт машин. Автор более 100 публикаций.

**САФОНОВ  
Валентин  
Владимирович**

E-mail: [safonow2010sgau@yandex.ru](mailto:safonow2010sgau@yandex.ru)

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой надежности и ремонта машин ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова». Сфера научных интересов – ремонт машин. Автор более 100 публикаций.

**ПОЛУПАНОВ  
Илья  
Тимофеевич**

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова». Сфера научных интересов – ремонт машин. Автор 14 публикаций.