

*На правах рукописи*

**Пичугин Александр Игоревич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ  
ГРУППЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ  
РАСПОЗНАВАНИЯ ЕЕ СОСТОЯНИЙ**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства  
технического обслуживания в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова».

Научный руководитель – кандидат технических наук,  
профессор

**Шлапак Владимир Павлович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

**Межецкий Геннадий Дмитриевич**

доктор технических наук, доцент

**Гребенников Александр Сергеевич**

Ведущая организация – ГОУ ВПО «Пензенская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита диссертации состоится 1 июля 2011 г. В 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 при ФГОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ».

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410600, г. Саратов, Театральная пл., 1 ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат диссертации разослан 31 мая 2011 г. и размещен на сайте: [www.sgau.ru](http://www.sgau.ru).

Ученый секретарь  
диссертационного совета

**Н.П. Волосевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Распространенные методы диагностирования цилиндропоршневой группы (ЦПГ) автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) зачастую носят интегральный характер оценки технического состояния ЦПГ и не позволяют выявлять причину неисправности. Влияние состояния других технических систем на значение диагностических параметров ЦПГ вызывает ошибки диагностирования, в результате которых в капитальный ремонт попадают ДВС с недоиспользованным на 35 – 45 % ресурсом.

Вместе с тем технологии диагностирования с глубиной поиска дефекта до конкретной детали ЦПГ увеличивают их трудоемкость и стоимость, в то время как для восстановления ЦПГ при некоторых неисправных состояниях требуется ее разборка. В этом случае достоверная причина неисправности устанавливается при дефектации деталей, а использование трудоёмкой и дорогостоящей технологии диагностирования становится нецелесообразным.

В этой связи взамен распространенного подхода «чем больше глубина поиска дефекта, тем лучше» в работе предложен другой принцип: глубина поиска дефекта должна быть рациональной и исходить из возможности применения безразборных ремонтных технологий после получения результатов диагностирования. Эффективность этих технологий непрерывно растет с развитием производства наноматериалов, необходимых для их практического применения.

На основе этого принципа разработано правило, согласно которому глубина поиска дефектов ЦПГ должна ограничиваться уровнем распознавания двух групп неисправных состояний:

1) группа состояний, перевод из которых в исправное состояние возможен применением безразборных ремонтных технологий (БРТ);

2) группа состояний, перевод из которых в исправное состояние возможен только проведением ремонтных воздействий, требующих разборки (РЗБ).

Заявленное правило реализует рациональную глубину поиска дефекта при заданной достоверности и минимальной продолжи-

тельности диагностирования, что в современных условиях является весьма актуальной задачей

**Цель работы.** Снижение простоев автомобильного транспорта при проведении ремонтно-обслуживающих воздействий путем совершенствования методов и средств распознавания состояний цилиндропоршневой группы.

**Объект исследований.** Цилиндропоршневая группа деталей двигателей внутреннего сгорания автомобильной техники сельскохозяйственного назначения.

**Методика исследований** включает в себя анализ причин простоев автотранспортной техники в процессе технического обслуживания и ремонта (ТО и Р); теоретическое обоснование сокращения длительности простоев управлением ремонтно-обслуживающими воздействиями на основании результатов диагностирования; стендовые исследования с целью проверки адекватности математической модели предложенного диагностического параметра ЦПГ ДВС; эксплуатационные исследования по оценке информативности единичных диагностических параметров ЦПГ и их возможных комбинаций.

В ходе исследований были использованы современные технические средства диагностирования ЦПГ.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- обоснован диагностический параметр, обладающий более высокой информативностью в сравнении с традиционно принятыми, и составлена математическая модель его изменения в зависимости от технического состояния ЦПГ ДВС;
- предложен принцип многоуровневой дихотомии при диагностировании технических систем;
- разработана методика определения доминирующей комбинации диагностических параметров для технических систем.

**Практическая ценность:**

- составлен алгоритм заявочного диагностирования ДВС автомобилей, эксплуатируемых по состоянию, применение которого позволит сократить время простоя при неисправностях ДВС автомобилей на 25,9 %, получить годовой экономический эффект на ремонт одного двигателя в размере 22 858,94 руб.;
- разработан алгоритм предремонтного диагностирования ДВС автомобилей для малых предприятий технического сервиса,

использование которого позволит снизить продолжительность ремонта ДВС на 10,2 – 37,6 %, увеличить годовую производственную программу на 18,0 %, получить годовой экономический эффект на один ремонтируемый двигатель в размере 4735,45 руб.

**Реализация результатов исследований.** Материалы диссертации могут быть использованы в хозяйствах АПК, автотранспортных предприятиях Министерства сельского хозяйства и других ведомств, эксплуатирующих парк автомобилей, а также на малых предприятиях технического сервиса.

#### **Внедрение разработок:**

- технология заявочного диагностирования ДВС автомобилей внедрена на ООО «Ягоднополянское» (с. Ягодная поляна Татищевского района Саратовской области);

- технология предремонтного диагностирования ДВС автомобилей внедрена на ООО «Сервисавторемонт» г. Саратова.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель изменения количества выходящего из картера выключенного ДВС сжатого воздуха в зависимости от технического состояния ЦПГ;

- теоретическое обоснование многоуровневой дихотомии при выборе и использовании доминирующей комбинации диагностических параметров;

- результаты стендовых исследований, подтверждающих адекватность математической модели;

- доминирующая комбинация диагностических параметров, сформированная в результате эксплуатационных исследований и позволяющая распознавать две группы неисправных состояний с заданной достоверностью в рамках многоуровневой дихотомии.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы были доложены, обсуждены и одобрены на XIX, XX, XXII и XXIII ежегодных межгосударственных постоянно действующих научно-технических семинарах «Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания» (Саратов, 2006, 2007, 2009, 2010 гг.), научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ» в 2008 □ 2010 гг., Международной научно-практической конференции, посвященной столетию

со дня рождения профессора Д.Г. Вадивасова (Саратов, 2009 г.), II Международной научно-производственной конференции «Перспективные направления развития автотранспортного комплекса» (Пенза, 2009 г.), VI салоне изобретений, инноваций и инвестиций Саратовской области (Саратов, 2011 г.).

**Публикации.** Всего по результатам исследований опубликовано 14 работ общим объемом 4,82 печ. л., из которых 2,1 печ. л., принадлежит автору. Две печатные работы в ведущих рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Получен патент РФ на полезную модель № 95829 от 10.07.2010 г.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация изложена на 178 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, общих выводов, содержит 55 рисунков, 32 таблицы и приложения. Список использованной литературы включает в себя 137 наименований, в том числе 2 – на иностранном языке.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **«Введении»** обоснована актуальность темы и изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе **«Состояние вопроса. Цель и задачи исследования»** проведен анализ причин, вызывающих простои автомобилей сельскохозяйственного назначения марок ГАЗ, ЗИЛ, УАЗ, МАЗ и КамАЗ при ТО и Р, который показал, что большая доля простоев приходится на ремонт ДВС при отказах ЦПГ.

Анализ научно-исследовательских материалов показывает, что одним из перспективных путей снижения длительности простоев в рамках системы ТО и Р является использование стратегии эксплуатации машин по техническому состоянию. Сущность данной стратегии состоит в периодическом диагностировании технических систем и управлении комплексом ТО и Р на основании полученных диагнозов.

В настоящее время к системе эксплуатации машин по техническому состоянию перешли и в состоянии перейти высококорентабельные и рентабельные хозяйства АПК. Но около 60 % сельских товаропроизводителей РФ находятся на низкорентабельном и убыточном уровнях развития. Данная группа хозяйств сложные виды ре-

монтажно-обслуживающих воздействий ДВС проводит на малых сервисных предприятиях. Добиться снижения простоев техники в условиях этих предприятий возможно путём использования эффективного предремонтного диагностирования, которое позволит рационально назначать и распределять ремонтно-обслуживающие воздействия по рабочим местам, что сократит продолжительность ремонта и приведёт к увеличению производственной программы без изменения количества рабочих мест и оборудования.

Эффективность управления ремонтно-обслуживающими воздействиями как при эксплуатации по техническому состоянию, так и в условиях сервисного предприятия, использующего предремонтное диагностирование, является функцией достоверности, глубины поиска дефекта и трудоемкости диагностирования. Исследованиями И.А. Биргера, А.Ю. Бойкова, Д.В. Гаскарова, А.Л. Горелика, И.Б. Гуревича, Ю.А. Гурьянова, И.Г. Дынга, Ю.И. Журавлева, Г.С. Игнатьева, Б.Р. Левина, Р.А. Макарова, В.М. Михлина, А.В. Мозгалевского, В.В. Никифорова, Н.С. Пасечникова, В.Г. Рацбаума, В.Г. Рякова, К.А. Сазонова, В.А. Скрипкина, А.В. Соколова, И.П. Терских, А.М. Харазова, С.Ф. Цвида, Н.Н. Ченцова, В.А. Чечета, В.В. Шварца и других ученых установлено, что при диагностировании технических систем использование какого-либо одного параметра не всегда дает удовлетворительные результаты, а иногда приводит к совершенно неправильному диагнозу. Поэтому для повышения достоверности и глубины поиска целесообразно использовать их комбинации, что подтверждается результатами проведенного в настоящей работе анализа недостатков существующих диагностических параметров ЦПП.

Большая часть упомянутых специалистов рекомендуют использовать в качестве теоретической основы определения доминирующей комбинации диагностических параметров статистические методы распознавания. Преимущество методов заключается в возможности проводить сравнительную оценку параметров различных по физической природе, так как данные методы характеризуют ДП с точки зрения вероятностей их проявления при разнообразных состояниях системы, то есть посредством безразмерных величин. Одним из них является метод, основанный на *теореме Байеса*, использование которого подразумевает обследование по всем параметрам

комбинации, что приводит к высокой трудоемкости диагностирования. Кроме того, ему присуще угнетение статистически редких диагнозов, что может привести к диагностической ошибке второго рода – пропуску дефекта. Метод *последовательного анализа Вальда* основан на дихотомии – делении состояния системы на две группы и позволяет обоснованно корректировать число используемых при диагностировании параметров комбинации.

Анализ рассмотренных в работе процессов изнашивания и разрушения деталей ЦПГ на основании исследований, проведенных Ф.Н. Авдонькиным, Г.С. Головиным, Б.Я. Гинцбургом, А.С. Денисовым, М.Н. Добычиным, В.С. Комбаловым, Б.И. Костецким, И.В. Крагельским, М.М. Тененбаумом и другими учеными, позволил выявить гораздо большее число сложных технических состояний ЦПГ:

$S_I$  – нагар на зеркале цилиндра и закоксовка компрессионных поршневых колец с заклиниванием в канавках поршня вследствие попадания в цилиндр смазочного материала в результате износа маслосъемных и компрессионных поршневых колец;

$S_{II}$  – нагар на зеркале цилиндра и закоксовка компрессионных ПК вследствие попадания в цилиндр смазочного материала в результате износа маслосъемных и компрессионных поршневых колец и потери их упругости;

$S_{III}$  – износ основных сопряжений ЦПГ, превышающий предельные значения;

$S_{IV}$  – разрушение компрессионных поршневых колец вследствие их износа и потери упругости;

$S_V$  – износ компрессионных поршневых колец;

$S_{VI}$  – нагар на зеркале цилиндра и закоксовка компрессионных поршневых колец из-за попадания в цилиндр смазочного материала в результате износа маслосъемных поршневых колец и потери их упругости;

$S_{VII}$  – нагар на зеркале цилиндра и закоксовка компрессионных поршневых колец вследствие неправильной регулировки топливной аппаратуры, использования некачественного топлива или попадания в цилиндр спиртосодержащей охлаждающей жидкости в результате нарушения герметичности прокладки головки блока цилиндров в зоне цилиндра или коробления привалочных поверхностей головки и (или) блока цилиндров;



$S_{VII}$  – разрушение компрессионных поршневых колец из-за работы ЦПГ в условиях сухого трения в результате износа основных сопряжений ЦПГ, превышающего предельные значения;

$S_{IX}$  – нагар на зеркале цилиндра и закоксовка поршневых колец вследствие попадания в цилиндр смазочного материала в результате нарушения герметичности маслосъемных колпачков клапанов газораспределительного механизма или негерметичности уплотнений турбокомпрессора;

$S_X$  – разрушение днища поршня;

$S_{XI}$  – задиры на зеркале цилиндра из-за работы ЦПГ в условиях сухого трения в результате износа основных сопряжений ЦПГ, превышающего предельные значения;

$S_{XII}$  – исправное состояние ЦПГ.

Очевидно, что для распознавания выявленных состояний требуются как единичные диагностические параметры, так и их комбинации. Исходя из того, что диагностический процесс носит многоэтапный характер, задачей I этапа практически всегда является распознавание одного из состояний: исправного или неисправного. Особенно важно распознавание исправного состояния, так как при этом продолжительность и трудоёмкость диагностирования становятся минимальными. Проведенный анализ показал, что используемые в настоящее время параметры обладают недостаточной информативностью распознавания этого состояния, а конкретная методика обоснования и использования их комбинаций отсутствует.

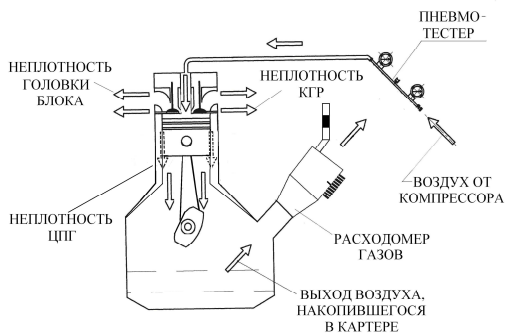
Таким образом, в соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие **задачи**:

- обосновать диагностический параметр, обладающий высокой информативностью распознавания исправного состояния и разработать математическую модель его изменения в зависимости от технического состояния ЦПГ;
- разработать методику обоснования и использования комбинации диагностических параметров с высокой информативностью распознавания двух групп неисправных состояний, перевод из которых в исправное возможен применением безразборных ремонтных технологий или проведением ремонтных воздействий, требующих разборки;

- провести стендовые и эксплуатационные исследования с целью проверки адекватности разработанной математической модели и информативности диагностических параметров доминирующей комбинации;
- оценить предложенные разработки по технико-экономическим критериям.

Во второй главе «**Теоретические предпосылки повышения эффективности диагностирования цилиндропоршневой группы автомобилей сельскохозяйственного назначения**» обоснован выбор нового диагностического параметра и разработана математическая модель его изменения в зависимости от технического состояния ЦПГ. Также дано научное обоснование альтернативного метода распознавания, положенного в основу методики выбора доминирующей комбинации диагностических параметров.

Анализ недостатков существующих диагностических параметров ЦПГ показал, что их низкая информативность распознавания исправного состояния обусловлена взаимным влиянием различных систем ДВС на значения диагностических параметров ЦПГ. Поэтому наилучшим решением данной задачи будет использование такого параметра выключенного ДВС, при котором все его системы отключены и не «зашумливают» значения выбранного диагностического параметра ЦПГ. С этой целью нами предложен новый диагностический параметр (рис.1) ЦПГ – расход газа из картера отключенного ДВС при подаче сжатого воздуха в цилиндр с зафиксированным в верхней мертвой точке поршнем (РГФП).



**Рис. 1. Схема измерения РГФП**

Для измерения параметра останавливают двигатель, снимают свечи или форсунки, поршень проверяемого цилиндра устанавливают в положение верхней мертвой точки и фиксируют коленчатый вал. В форсуночное или свечное отверстие устанавливают адаптер, подключенный к источнику сжатого воздуха. При этом устанавливается минимально необходимая величина давления – 0,6 МПа, позволяющая продуть ЦПГ от остатков смазочной среды во избежание погрешности измерения. В случае негерметичности сопряжений ЦПГ воздух, подаваемый в полость цилиндра, будет прорываться в предварительно герметизированный картер и, заполнив свободный объем, начнет выходить через маслозаливное отверстие, куда герметично устанавливается газовый расходомер. По величине расхода газов при фиксированном поршне судят о неисправности поршневых колец либо износе цилиндра. Негерметичность клапанов газораспределения или головки блока цилиндров определяют органолептически, по выходу воздуха из систем подачи воздуха в ДВС, отвода отработавших газов и охлаждения двигателя. При этом исключается влияние негерметичности клапанов газораспределения и головки блока на возникновение ошибок, так как при измерении РФП учитывается только количество воздуха, проникшего в картер через неплотности сопряжений ЦПГ.

Учитывая требование к герметичности надпоршневого пространства, можно предположить, что при исправном состоянии ЦПГ количество воздуха, прорывающегося в картер, будет ниже порога чувствительности расходомера. При наличии износа и (или) других дефектов в ЦПГ ситуация станет качественно иной. Следовательно, параметр будет проявляться только при наличии неисправного состояния ЦПГ, что обеспечит его высокую информативность. Выявленный параметр универсален при его использовании как для ДВС в составе машины, так и для демонтированных двигателей, которые зачастую отправляют в ремонт на малые сервисные предприятия с целью экономии транспортных расходов по сравнению с транспортировкой автомобиля в сборе.

Для реализации данного ДП необходимо математическое моделирование его значений в зависимости от изменения состояния ЦПГ с учетом износа элементов данной группы деталей. Извест-

на математическая модель расхода сжатого воздуха через неплотности ЦПГ, предложенная Ю.А. Гурьяновым для пневмокалбратора типа К-69. Зависимость используется для исправного или неисправного состояний ЦПГ:

$$\Sigma Q = \sum_{i=1}^7 \theta l_0 \delta + \frac{\pi V_3^3 (P_m^2 - P_n^2)}{4 \eta k_1 A_a^3 R T \frac{1g r_m}{r_n}} + \left. \begin{array}{l} \mu F \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2 k P_m \rho}{k+1}} \\ \mu F \sqrt{\frac{2 k P_m \rho \left[ \left( \frac{P_n}{P_m} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_n}{P_m} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}{k-1}} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где  $\Sigma Q$  – РГФП, кг/с;  $\theta$  – удельный расход воздуха через единицу площади просвета между зеркалом цилиндра и кольцом, кг/м<sup>2</sup>с;  $l_0$  – длина просвета по фронту, м;  $\delta$  – высота просвета по фронту, м;  $V_3$  – номинальный объем зазора между поверхностями, м<sup>3</sup>;  $P$  – давление воздуха, Па;  $\eta$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $k_1$  – константа Кармана;  $A_a$  – номинальная площадь поверхности кольца, м<sup>2</sup>;  $R$  – газовая постоянная, Дж /кг<sup>0</sup>К;  $T$  – температура воздуха, <sup>0</sup>К;  $r$  – радиус кольца, м;  $\mu$  – коэффициент расхода газов;  $F$  – площадь зазора в замке поршневого кольца, м<sup>2</sup>;  $k = 1,41$  – показатель адиабаты;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  и  $n$  – индексы большего и меньшего значения  $P$  и  $r$ ;

При этом  $\mu$  рассчитывается по формуле И.Е. Идельчика:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi' + \alpha \left( d_1 + \xi' \cdot f_1 + \lambda \frac{l}{\delta'} \right)}}, \quad (2)$$

где  $\xi'$  – коэффициент, учитывающий влияние формы входной кромки канала;  $\alpha$  – количество ячеек в лабиринте;  $d_1, f_1$  – коэффициенты, зависящие от отношения длины канала до лабиринта к его ширине;  $\lambda$  – линейный коэффициент сопротивления трения по

длине канала;  $l$  – длина канала (в случае ЦПГ  $\square$  высота перемычки между нижним и предшествующим ему компрессионным поршневым кольцом, Н), м;  $\delta'$   $\square$  ширина канала (для ЦПГ сумма  $z_{\text{цп}}$  – зазора между наружной поверхностью поршня и зеркала цилиндра и износа гильзы цилиндра  $I_{\text{ц}}$ ), м.

В известной модели РГФП является суммой трех составляющих. П е р в а я с о с т а в л я ю щ а я характеризует утечки через просветы в сопряжении компрессионных ПК и зеркала цилиндра. Б.Я. Гинцбург в своих более поздних исследованиях о приспособляемости ПК установил, что в исправном состоянии ЦПГ данная составляющая полностью отсутствует. Также ввиду использования нами значительно большего рабочего давления в 0,6 МПа по сравнению с пневмокалибратором (до 0,3 МПа) при неисправном состоянии ЦПГ будет происходить прижим рабочего торца ПК к зеркалу цилиндра, вследствие чего первая составляющая известной модели будет незначительной. В т о р а я с о с т а в л я ю щ а я характеризует утечки через сопряжение компрессионного ПК и поршня. При рабочем давлении 0,6 МПа будет происходить прижим компрессионного ПК к нижнему торцу канавки поршня в любом состоянии ЦПГ, ввиду чего данная составляющая также будет незначительной. Автором настоящей работы с помощью теоретических исследований установлено, что первая и вторая составляющие математической модели Ю.А. Гурьянова для дизелей в среднем составляет 0,01 % от РГФП, для ДВС с искровым воспламенением – 0,23 %. В связи с этим их целесообразно заменить коэффициентом ( $K_x$ ).

Т р е т ь я с о с т а в л я ю щ а я характеризует утечки газов через лабиринтные уплотнения, каковыми являются совокупность замков ПК и канавок поршня. Так как слагаемые третьей составляющей, кроме  $\mu$ ,  $F$  и  $P_n$  известны, то для упрощения расчетов при использовании модели на практике в настоящей работе вводится параметр  $K_w$ , который для исправного состояния равен  $0,604 \cdot 10^3$  кг/с·м<sup>2</sup>, для неисправного –  $2,310 \cdot 10^3$  кг/с·м<sup>2</sup>.

Очевидно, что в процессе изнашивания ЦПГ толщина ПК  $a$  уменьшается в зависимости от величины износа  $I_{ka}$ . Зазор в замке будет увеличиваться от номинального  $z_{\text{ном}}$  пропорционально изменению длины окружности цилиндра в результате изнашивания его рабочей поверхности  $I_{\text{ц}}$  до  $z_{\text{ном}} + I_{\text{ц}}$ . Поэтому

$$F = (a_{\text{ном}} - I_{ka}) (z_{\text{ном}} + 2\pi I_{\text{ц}}). \quad (3)$$

Так как рынок технических средств диагностирования в настоящее время насыщен средствами различных производителей, необходимо при расчетах РГФП учитывать погрешность используемых средств ( $K_u$ ).

С учётом проведённых выше преобразований получена математическая модель предложенного ДП:

$$Q = \frac{K_w K_u K_x (a_{\text{ном}} - I_{ka}) (z_{\text{ном}} + 6,28 I_{\text{ц}})}{\sqrt{1 + \xi' + \alpha \left( d_1 + \xi' \cdot f_1 + \lambda \frac{H}{z_{\text{пр}} + I_{\text{ц}}} \right)}} \sqrt{\left( \frac{P_n}{P_m} \right)^{1.42} - \left( \frac{P_n}{P_m} \right)^{1.71}}, \quad (4)$$

При этом  $P_m = 0,6$  МПа.

РГФП при расчетах рассматривается только на нижнем кольцевом уплотнении, так как оно оказывает преобладающее дроселирующее воздействие.

Проведённый анализ конструкции ЦПГ позволил установить, что для ДВС с тремя компрессионными ПК  $\alpha = 16$ , для ДВС с двумя компрессионными ПК  $\alpha = 12$ .

Очевидно, что модель (4) предложенного ДП учитывает изменение его значений в зависимости от износа поршневых колец по толщине и высоте, рабочей поверхности цилиндра, износа поршневых канавок компрессионных колец по высоте (выражается величинами  $d_1$ ,  $f_1$ ,  $\lambda$  и  $H$ ), а также в зависимости от увеличения зазора в стыках колец. Все перечисленные параметры являются основными показателями технического состояния ЦПГ. Данный факт повышает значимость гипотезы о высокой информативности распознавании исправного состояния предложенным параметром, на основе которого можно сформировать доминирующую комбинацию ДП для ЦПГ.

Ввиду выявленных недостатков существующих методов статистического распознавания, а также отсутствия их реализации в виде конкретной методики обоснования доминирующей комбинации ДП возникла необходимость разработки альтернативного метода распознавания. Предлагаемый метод основан на принципе двухуровневой дихотомии, включающей дихотомию

общего технического состояния с последующей дихотомией неисправного состояния в случае его достоверного распознавания.

*Дихотомия неисправного состояния* – это деление достоверно установленного неисправного состояния на две группы дефектных состояний: требующих и не требующих разборки технической системы для ее перевода в исправное состояние. Перевод последней группы осуществляется посредством БРТ.

Первым по рангу следует назначить ДП, обладающий наиболее высокой информативностью дихотомии общего технического состояния. Анализ известных статистических методов распознавания позволяет сделать вывод о том, что значения апостериорных вероятностей состояний объекта, вычисленных по теореме Байеса, представляют собой наиболее полную и объективную характеристику информативности ДП и их комбинаций, так как именно они отражают внешнюю реакцию объекта на внутренние его изменения. Очевидно, что первым по рангу из множества ДП следует выбрать тот, апостериорная вероятность выявления состояния которым в случае его проявления (превышения допустимого значения) или не проявления, превышает доверительный уровень распознавания, равный 0,9:

$$P(S_{\text{иис}} / D_j) \geq 0,9 \quad \text{или} \quad P(S_{\text{ис}} / \overline{D_j}) \geq 0,9 \quad (5)$$

где  $S_{\text{иис}}$  и  $S_{\text{ис}}$  – соответственно  $i$ -е неисправное и исправное состояние;  $D_j$  и  $\overline{D_j}$  – проявление и не проявление  $j$ -го ДП.

Далее доминирующая комбинация выбирается из всех возможных комбинаций, содержащих данный параметр, при условии соответствия требованиям, предъявленным к доверительному значению информативности дихотомии 2-го уровня:

$$\sum_{i=1}^N P(S_{i\text{РЗБ}} / D^*J) \geq 0,9 \quad \text{при} \quad P(S_{\text{ис}} / D^*J) + \sum_{i=1}^M P(S_{i\text{БРТ}} / D^*J) \leq 0,1$$

или

$$\sum_{i=1}^M P(S_{i\text{БРТ}} / D^*J) \geq 0,9 \quad \text{при} \quad P(S_{\text{ис}} / D^*J) + \sum_{i=1}^N P(S_{i\text{РЗБ}} / D^*J) \leq 0,1 \quad (6)$$

где  $S_{i\text{РЗБ}}$  и  $S_{i\text{БРТ}}$  – соответственно  $i$ -е неисправное состояние, требующее (РЗБ) и не требующее (БРТ) разборки ДВС для перевода его в исправное состояние;  $D^*J$  – реакция  $J$ -й комбинации ДП на

состояние ЦПГ (проявление всех ДП комбинации, непроявление всех ДП комбинации и проявление только части ДП в комбинации);  $N$  и  $M$  – соответственно общее количество состояний  $S_{PЗБ}$  и  $S_{БРТ}$ .

Если при выборе доминирующей комбинации и ранжировании ее ДП по порядку обследования можно не учитывать диагностические ошибки 1 и 2-го рода, то при ее использовании они неизбежны. Поэтому в настоящем исследовании для их исключения разработан метод последовательного анализа (рис. 2).

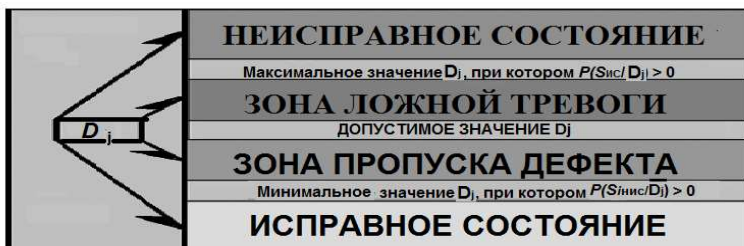


Рис. 2. Последовательный анализ в предлагаемом методе статистического распознавания для диагностического параметра, возрастающего с ухудшением состояния технической системы

Данный метод отличается от метода Вальда и заключается в разбиении зоны неопределенности решений на зоны ошибок, позволяющем уточнять вид возможной ошибки. В качестве границ между зонами ошибок и состояний принимаются значения ДП, при которых данные ошибки возникали. Эти значения определяются по статистической информации, собираемой для решения теоремы Байеса. В качестве границ между зонами ошибок принимается допустимое значение диагностического параметра, так как оно характеризует ошибку при проявлении ДП (ложную тревогу) и его не проявлении (пропуск дефекта).

Таким образом, принцип двухуровневой дихотомии позволяет обосновать доминирующую комбинацию ДП и ранжировать ее параметры по порядку обследования. Доработанный метод последовательного анализа обуславливает необходимость обследования ЦПГ по следующему в ранге ДП после обследования по предыдущему параметру, то есть позволяет корректировать трудоемкость диагностирования, вплоть до ее минимизации.



Адекватность предложенной модели (4) оценивали по результатам стендовых испытаний, адекватность разработанного статистического метода распознавания – по результатам эксплуатационных исследований.

В третьей главе **«Методика экспериментальных исследований»** приведены общие и частные методики экспериментов.

Стендовые исследования автотракторного дизеля ММЗ Д-245 проводили в соответствии с методикой ускоренных испытаний по ГОСТ 18509 – 88. Для поддержания заданных режимов использовался обкаточно-тормозной стенд КИ-5543 ГОСНИТИ. В качестве абразива, добавляемого в цилиндры и картерное масло, применяли кварцевую пыль с удельной поверхностью 0,56 м<sup>2</sup>/г. До испытаний проводили микрометраж и нумерацию устанавливаемых деталей ЦПГ. В процессе испытаний осуществляли периодические замеры РГФП индикатором КИ-13671 ГОСНИТИ. По окончании испытаний дизель разбирали, после чего проводили повторный микрометраж деталей ЦПГ, на основании которого по модели (4) рассчитывали теоретические значения РГФП.

Эксплуатационные исследования осуществлялись с целью оценки информативности диагностических параметров ЦПГ и их комбинаций по теореме Байеса. При этом сравнительную оценку проходили распространенные пневматические и органолептические диагностические параметры ЦПГ, так как эти группы параметров наиболее востребованы в АПК РФ и автомобильном транспорте, в частности:

$D_1$  – давление в конце такта сжатия (компрессия);

$D_2$  – значение полного вакуума;

$D_3$  – значение остаточного вакуума;

$D_4$  – падение давления сжатого воздуха, поданного в цилиндр;

$D_5$  – расход картерных газов;

$D_6$  – расход газа из картера выключенного ДВС при подаче сжатого воздуха в цилиндр с зафиксированным в верхней мертвой точке поршнем;

$D_7$  – визуально распознаваемый синий цвет выхлопных газов;

$D_8$  – осязаемые вибро-акустические отклонения;

$D_9$  – наличие или отсутствие дефекта при осмотре эндоскопом.

Двигатели с внешними признаками неисправности ЦПГ были обследованы по всем указанным параметрам. После их раз-

борки устанавливалось фактическое состояние ЦПГ, соответствующее  $S_i$ , ( $i = I, II, \dots, XII$ ). Количество объектов стендовых и эксплуатационных исследований обосновано в соответствии с требованиями к плану испытаний NUN.

В четвертой главе «Анализ результатов экспериментальных исследований» приведены основные результаты стендовых (рис. 3) и эксплуатационных исследований.

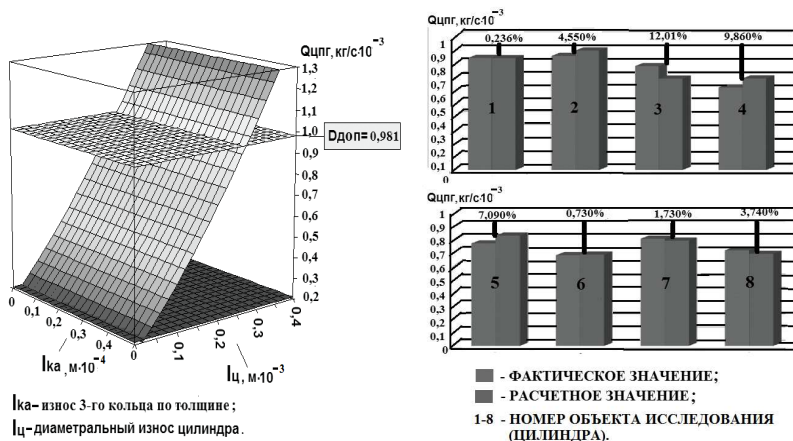
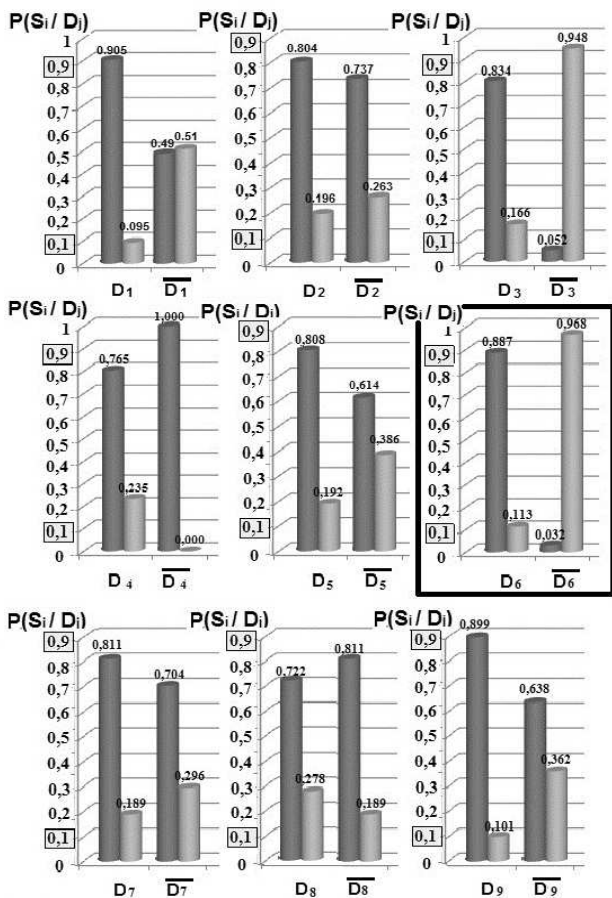


Рис. 3. Зависимость РГФП ( $Q_{цпг}$ ) от износов деталей ЦПГ и проверка сходимости расчетных и опытных (с учетом поправочного коэффициента КИ-13671  $K=1,73$ ) его значений, полученных по окончании стендовых исследований

Из рис.3 видно, что в большинстве случаев теоретические и опытные значения РГФП имеют расхождения, не превышающие 10 %. Расхождение значений в объекте № 3 на 12,01 % было вызвано заклиниванием верхнего компрессионного ПК в канавке поршня. Этот факт свидетельствует о том, что предложенный ДП чувствителен не только к износам деталей ЦПГ, но и к другим её дефектам, что впоследствии подтвердилось в процессе эксплуатационных исследований.

По результатам эксплуатационных исследований проводилась оценка соблюдения условий дихотомии первого уровня (5), которая показала, что наибольшей информативностью распознавания общего технического состояния обладает предложенный в настоящей работе диагностический параметр – РГФП (рис. 4). Он был назначен первым по рангу.



$P(S_i / D_j)$  — АПОСТЕРИОРНАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ;  
 ■ — НЕИСПРАВНОЕ СОСТОЯНИЕ ЦПГ;  
 ■ — ИСПРАВНОЕ СОСТОЯНИЕ ЦПГ;  
 $\frac{D_j}{D_j}$  — ПРОЯВЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА;  
 $\frac{\bar{D}_j}{\bar{D}_j}$  — НЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА.

Рис. 4. Оценка информативности дихотомии 1-го уровня

Доминирующая комбинация выбиралась из всех возможных, включающих данный ДП, в соответствии с требованиями к дихо-

томии второго уровня. В результате была выбрана комбинация РГФП и эндоскопического осмотра цилиндра (рис. 5).

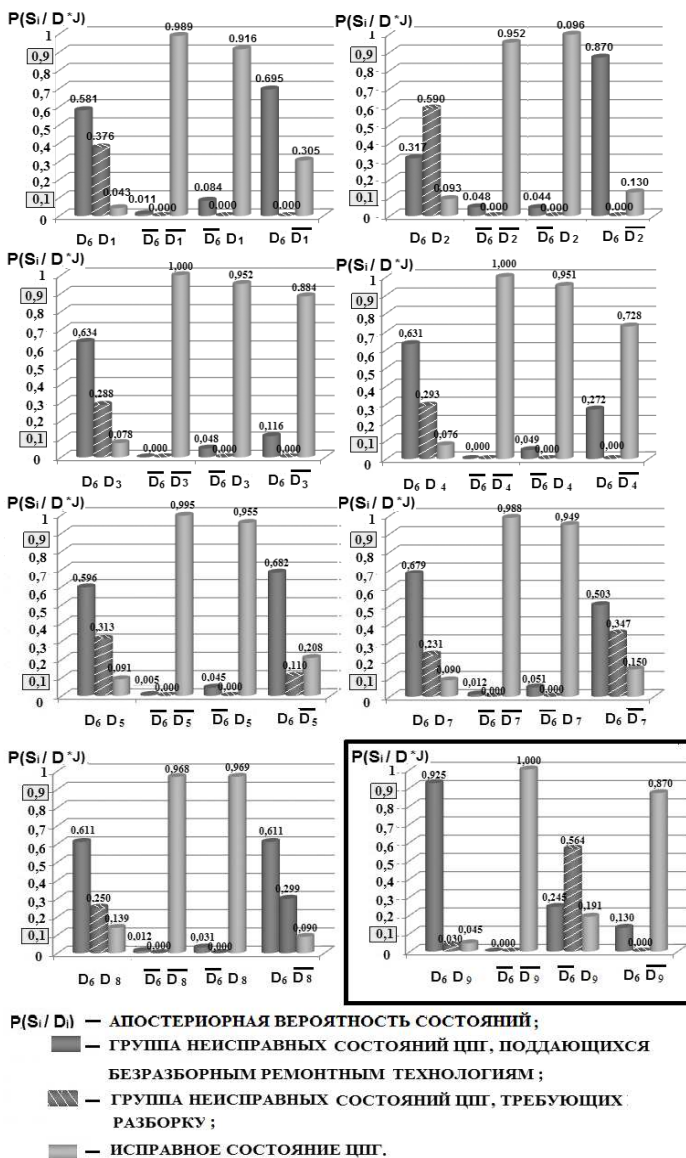


Рис. 5. Оценка информативности дихотомии 2-го уровня

В процессе эксплуатационных исследований были обнаружены некоторые недостатки предложенного ДП:

- невозможность учета газов, истекающих из картера ДВС через возможные неплотности картерного пространства;
- высокая трудоемкость диагностирования V-образных ДВС автомобилей, вызванная большим объемом картера.

Поэтому разработано техническое средство диагностирования, позволяющее исключить выявленные недостатки за счет использования вспомогательных диагностических признаков и более точного способа измерения расхода газов в сравнении со способом реализованным индикатором КИ-13671 (патент РФ на полезную модель № 95829).

В соответствии с принципом «свободы выбора» была оценена степень информативности других комбинаций. Оценка показала, что  $\sum P(S_{\text{БРТ}} / D_3 \overline{D_2}) = 0,81$ , при  $P(S_{\text{ис}} / D_3 \overline{D_2}) = 0,19$  и  $\sum P(S_{\text{ГРЗ}} / D_3 \overline{D_2}) = 0$ . Данная комбинация реализуется анализатором герметичности цилиндров АГЦ-2, и в случае повышения его информативности могут быть обеспечены идеальные условия двухуровневой дихотомии.

На основании доминирующей комбинации  $D_6 D_9$ , обоснованной в настоящей работе, были сформированы алгоритмы заявочного и предремонтного диагностирования ДВС.

В пятой главе «**Технико-экономическая оценка результатов исследований и пути их внедрения**» приведены расчеты влияния разработок на снижение простоев автотранспорта и экономической целесообразности их внедрения. Установлено, что при использовании выбранной комбинации ДП на основе повышения достоверности распознавания и управления составом ремонтно-обслуживающих воздействий простой автомобиля по причинам неисправностей двигателя снижается в среднем на 25,9 %, а годовой экономический эффект на ремонт одного двигателя составляет: для эксплуатирующего хозяйства – 22 858,94 руб., для предприятия технического сервиса – 4735,45 руб.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Обоснован новый диагностический параметр – расход газа из картера выключенного ДВС при подаче сжатого воздуха в ци-

линдр с зафиксированным в верхней мертвой точке поршнем, с информативностью распознавания исправного состояния, достаточной для минимизации трудоемкости обследования ЦПГ  $P(S_{ис} / \overline{D}_6) > 0,9$ . Разработана математическая модель изменения обоснованного параметра в зависимости от износов деталей ЦПГ.

2. Разработана методика обоснования и использования доминирующей комбинации диагностических параметров, в рамках которой осуществляется обследование ЦПГ по принципу двухуровневой дихотомии: 1-й уровень – деление на исправное и неисправное состояния; 2-й уровень – деление неисправных состояний на требующие разборки и поддающиеся устранению с помощью безразборных ремонтных технологий. Для снижения числа ошибок при использовании комбинации доработан метод последовательного анализа, отличающийся от традиционного тем, что зона неопределенности решений делится на зоны ошибок 1 и 2-го рода.

3. Результаты стендовых испытаний подтвердили, что математическая модель предложенного параметра обладает достаточной степенью адекватности – расхождение опытных и расчетных значений  $Q_{шт}$  не превышает 10%.

Итоги эксплуатационных исследований подтвердили эффективность разработанной методики выбора доминирующей комбинации диагностических параметров. Также была подтверждена высокая информативность предложенного параметра при определении дихотомии 1-го уровня:  $P(S_{ис} / \overline{D}_6) = 0,968 > 0,9$ . В процессе эксплуатационных исследований выявлены его недостатки, заключающиеся в высокой трудоемкости диагностирования и невозможности учета утечек газа через неплотности картерного пространства. Разработано средство диагностирования, позволяющее исключить указанные недостатки путем использования вспомогательных диагностических признаков и более точного способа измерения расхода газов. Данное средство защищено патентом РФ. Для обеспечения дихотомии 2-го уровня определена доминирующая комбинация обоснованного в настоящей работе диагностического параметра с эндоскопическим осмотром цилиндра:

$$\sum P(S_{шт} / D_6 D_9) = 0,925 > 0,9, \text{ при } P(S_{ис} / D_6 D_9) + \sum P(S_{прзб} / D_6 D_9) = 0,075 < 0,1.$$

4. Для выбранной комбинации диагностических параметров на основе принципа многоуровневой дихотомии разработаны технологии

заявочного и предремонтного диагностирования, позволившие снизить простой двигателя автомобиля в среднем на 25,9 %. Годовой экономический эффект на ремонт одного двигателя для хозяйства эксплуатирующего парк автомобилей составил 22 858,94 руб., для ремонтного предприятия – 4735,45 руб. (в ценах 2010 г.).

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. *Пичугин, А. И.* Управление надежностью машин, эксплуатируемых по техническому состоянию / А. И. Пичугин, В. П. Шлапак, Е. В. Шлапак // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания : материалы 19 межгос. НТС / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2007. – С. 100–103 (0,21/0,07 печ. л.).

2. *Пичугин, А. И.* Особенности сбора статистической информации машин, эксплуатируемых по техническому состоянию / А. И. Пичугин, В. П. Шлапак // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания : материалы 19 межгос. НТС / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2007. – С. 104–107 (0,19/0,09 печ. л.).

3. *Пичугин, А. И.* Учет износа и старения машин при определении вероятностей изменения их состояния / А. И. Пичугин, В. П. Шлапак, Е. В. Шлапак // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания : материалы 20 межгос. НТС / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2008. – С. 82–85 (0,22/0,07 печ. л.).

4. Прогнозирование технического состояния как задача диагностирования сложных технических систем / А. И. Пичугин [и др.] // Доклады академии военных наук. – 2008. – № 2 (31). – С. 25–35 (1,27/0,32 печ. л.).

5. *Пичугин, А. И.* Использование метода статистического распознавания при проектировании технических средств диагностирования / А. И. Пичугин, В. П. Шлапак // Вавиловские чтения – 2008 : материалы Междунар. НПК. – Саратов : ИЦ «Наука», 2008. – С. 348–350 (0,19/0,09 печ. л.).

6. *Пичугин, А. И.* Организация технологии и технической базы диагностирования для служб эксплуатации и ремонта подвижного состава / А. И. Пичугин // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса : материалы 2 Междунар. НПК. – Пенза : РИО «ПГСХА», 2009. – С. 150–155 (0,23/0,23 печ. л.).

7. Оценка информативности диагностических параметров сложных технических систем / А. И. Пичугин [и др.] // Доклады академии военных наук. – 2009. – № 4 (39). – С. 161–164 (0,24/0,06 печ. л.).

8. *Пичугин, А. И.* Влияние человеческого фактора на сбор информации о надежности машин, эксплуатируемых по техническому состоянию / А. И. Пичугин // Материалы Междунар. НПК, посвященной 100-летию профессора Д.Г. Вадивасова / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2009. – С. 104–105 (0,13/0,13 печ. л.).

9. *Пичугин, А. И.* Выбор комбинаций диагностических параметров для технических систем / А. И. Пичугин // Проблемы экономичности и эксплуатации двигате-

лей внутреннего сгорания : материалы 22 межгос. НТС / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2010. – С. 87–89 (0,14/0,14 печ. л.).

10. *Пичугин, А. И.* Использование комбинаций диагностических параметров для технических систем / А. И. Пичугин, В. П. Шлапак // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания : материалы 22 межгос. НТС / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2010. – С. 117–119 (0,14/0,07 печ. л.).

11. *Пичугин, А. И.* Разработка математической модели для оценки герметичности цилиндров поршневых ДВС / А. И. Пичугин, В. П. Шлапак // Вестник саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2010. – № 10. – С. 74–79 (0,75/0,37 печ. л.).

12. Расходомер картерных газов двигателя внутреннего сгорания [Текст]: пат. 2010103307/22 Рос. Федерация. МПК G 01 F 1/36/ Пичугин А. И. [и др.]: заявитель и патентообладатель Саратовский ГАУ.- № 2010103307/22 ; заявл. 01.02.10 : опубл. 10.07.10. Бюл. № 19. – 4 с. : ил.

13. *Пичугин, А. И.* Особенности ускоренных испытаний дизеля при диагностировании, основанном на подаче сжатого воздуха в цилиндр / А. И. Пичугин, В. П. Шлапак // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания : материалы 23 межгос. НТС / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2010. – С. 96–98 (0,13/0,06 печ. л.).

14. *Пичугин, А. И.* Статистические методы распознавания в условиях эксплуатации машин / А. И. Пичугин, В. П. Шлапак // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 2. – С. 58–63 (0,68/0,34 печ. л.).

---

Подписано в печать ...05.11. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Гарнитура Times.

Печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ

---

Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова»  
410600, Саратов, Театральная пл., 1