

На правах рукописи

УДК 621.431



Таричко Вадим Игоревич

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет» на кафедре «Тепловые двигатели»

Научный руководитель

Обозов Александр Алексеевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Тепловые двигатели»,
ФГБОУ ВПО «Брянский государственный
технический университет»

Официальные оппоненты

Марков Владимир Анатольевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Теплофизика»,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана»

Голосов Андрей Сергеевич,
кандидат технических наук,
ООО «ИНВАТЕК»

Ведущая организация

ОАО «Тутаевский моторный завод»

Защита состоится «18» декабря 2013 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская набережная, д. 2/18, учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э.Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д212.141.09.

Автореферат разослан

«15» ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент



Тумашев Р.З.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ДВС – двигатель внутреннего сгорания; КС – камера сгорания; ЦПГ – цилиндропоршневая группа; град ПКВ – градус поворота коленчатого вала; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; КИП – контрольно-измерительные приборы; ТС – техническое состояние; ДП – диагностический параметр; СТРО – статистическая теория распознавания образов; ДА – дискриминантный анализ; $P(\omega_i/x)$ – апостериорная вероятность появления класса технического состояния ω_i (на основе обследования x); P_{error} – ошибка распознавания класса ТС.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В Транспортной стратегии на период до 2030 года предусматривается техническое переоснащение транспортной системы Российской Федерации, направленное на увеличение числа транспортных средств, созданных с применением современных наукоемких технологий. В ней также указана необходимость разработки принципиально новых комплексных систем технического диагностирования транспортных средств. Разработка таких систем возможна на основе совершенствования методов, алгоритмов и средств технического диагностирования ДВС.

Совершенствование технического диагностирования ДВС является актуальной задачей вследствие увеличения числа, расширения номенклатуры, усложнения и разнообразия конструктивных элементов, различий в условиях работы эксплуатируемых двигателей. Кроме того, традиционные алгоритмы диагностирования ДВС не позволяют распознавать неисправности на ранней стадии их развития. Поэтому необходимо совершенствование технического диагностирования с применением универсальных алгоритмов обработки информации, позволяющих распознавать неисправности на ранней стадии их развития.

Диссертационные исследования поддержаны государственным Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по госконтракту № У2/17120 от 27.12.2012 г.

Целью диссертационной работы является совершенствование технического диагностирования двигателей внутреннего сгорания, направленное на определение неисправностей на ранней стадии их развития с помощью алгоритмов, основанных на методах многомерной статистики и теории распознавания образов.

Задачи исследования, решенные в диссертационной работе для достижения поставленной цели:

- 1) разработка математической модели рабочего процесса ДВС для получения диагностической информации, определения классов технического состояния, выбора диагностических параметров и обоснования режимов работы ДВС при техническом диагностировании;
- 2) разработка и создание испытательного стенда для исследования ДВС как статистического объекта технического диагностирования;
- 3) разработка автоматизированной системы сбора и обработки экспериментальных данных;

4) разработка методики получения статистического объёма данных, характеризующего появление неисправностей на ранней стадии их развития;

5) разработка методики (алгоритмов) статистической обработки диагностической информации для решения задач распознавания неисправностей различной степени развития.

Объектом исследования являются двигатели внутреннего сгорания автотракторного типа.

Методы исследования. *Расчетно-теоретические методы исследования*, которые основаны на методах математического моделирования рабочих процессов ДВС с использованием ЭВМ в среде разработанных программ. *Экспериментальные методы исследования*, основанные на получении данных с использованием созданного испытательного стенда и современных средств контроля и обработки сигналов. Экспериментальные данные обрабатывались с использованием методов математической статистики и статистической теории распознавания образов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) разработана математическая модель рабочего процесса ДВС, позволяющая имитировать неисправности камеры сгорания (КС) на различных стадиях их развития и получать соответствующую диагностическую информацию на всех режимах работы ДВС;

2) разработана методика построения алгоритмов технического диагностирования ДВС автотракторного типа, основанная на вероятностно-статистическом подходе с использованием методов статистической теории распознавания образов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена:

1) обоснованным использованием основных положений термодинамики, теории рабочих процессов, газовой динамики, теплофизики при получении информации о ДВС как об объекте диагностирования;

2) сравнением с результатами экспериментальных исследований, имеющимися в научно-технической литературе и полученными на испытательном стенде на кафедре «Тепловые двигатели»;

3) критическим обсуждением результатов работы на научно-технических конференциях.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1) разработана математическая модель рабочего процесса ДВС, позволяющая проводить имитацию неисправностей на различной стадии их развития;

2) разработан и создан испытательный стенд, позволяющий проводить экспериментальные исследования, направленные на изучение рабочих процессов ДВС для получения диагностической информации;

3) разработана методика, основанная на методах статистической теории распознавания образов, позволяющая создавать эффективные алгоритмы технического диагностирования ДВС автотракторного типа;

4) разработана автоматизированная система сбора и обработки экспериментальных данных, позволяющая проводить индицирование ДВС с ис-

пользованием современных аппаратных средств и получать диагностическую информацию на различных режимах работы ДВС.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1) методика получения математической модели, имитирующей неисправности и позволяющей получать статистическое описание классов ТС ДВС и определять информативные диагностические параметры;

2) методика проведения экспериментальных исследований ДВС и обработки экспериментальных данных для получения диагностической информации;

3) алгоритмы технического диагностирования ДВС, основанные на использовании методов математической статистики, таблиц функций неисправностей и методов статистической теории распознавания образов;

4) автоматизированная система сбора и обработки экспериментальных данных.

Личный вклад автора состоит в разработке математической модели рабочего процесса ДВС – выполнено при участии автора; разработке и создании испытательного стенда – выполнено лично автором; разработке автоматизированной системы сбора и обработки экспериментальных данных – выполнено при участии автора; построении алгоритмов технического диагностирования – выполнено при участии автора; подготовке основных публикаций по выполненной работе; участии автора в апробации результатов исследования.

Апробация работы. Диссертационная работа обсуждалась на расширенном заседании кафедры «Тепловые двигатели» (БГТУ, 2013 г.). Основные результаты диссертационной работы и ее отдельные положения были представлены на III, IV и V Международных научно-практических конференциях «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании» (БГТУ, Брянск, 2011 – 2013 гг.), III и IV Региональных научно-практических конференциях молодых исследователей и специалистов «Проведение исследования по приоритетным направлениям современной науки для создания инновационных технологий» (БГТУ, Брянск, 2012 г.), X Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика» (Филиал «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, 2013 г.), VI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2013 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 5 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы из 130 наименований. Объём диссертационной работы 201 страница машинописного текста, включающего 90 рисунков, 32 таблицы, 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и приводится общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе на основе обзора научно-технической литературы исследуются проблемы технического диагностирования ДВС, описываются методы, средства и алгоритмы технического диагностирования ДВС, анализируются неисправности ДВС, приводятся цель и задачи исследования.

Отмечается, что с целью совершенствования технического диагностирования и повышения надежности ДВС проводились исследования отечественными и зарубежными учёными: М.И. Левиным, И.В. Возницким, Л.В. Мирошниковым, В.Н. Луканиным, Н.А. Иващенко, Л.В. Греховым, В.И. Сидоровым, В.А. Лашко, А.А. Обозовым, А.Ю. Коньковым, Г.П. Панкратовым, А.П. Болдиным, Н.С. Ждановским, Е.А. Никитиным, Л.В. Станиславским, Э.А. Улановским, Г.В. Крамаренко, А.С. Гребенниковым, E. Moeck, H. Strickert, K. Grigoriadis, B. Dawson, K. Kido, K. Togai, H. Yamaura, G. Rizzoni, M. Nyberg, L. Chiang, M. Celik, P.S. Katsoulakos, S. M. Namburu, P. Nabende и др. Указанные исследования проводятся также ведущими производителями ДВС (Mercedes, Volkswagen, Ford Motor Company, General Motors, Toyota, Mitsubishi, Caterpillar, Iveco, MTU, Wärtsilä, MAN Diesel & Turbo и др.).

Практический опыт создания и внедрения систем технического диагностирования свидетельствует о том, что эффективность процедуры оценки технического состояния двигателя определяется, прежде всего, совершенством алгоритмов и средств технического диагностирования. Следует отметить, что динамические процессы ДВС как сложного объекта технического диагностирования имеют вероятностно-статистическую природу. Поэтому системы технического диагностирования, основанные на применении детерминированных алгоритмов, не могут обеспечить качественную оценку ТС ДВС (тем более ввиду субъективности решений экспертов).

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования систем технического диагностирования ДВС является применение алгоритмов, основанных на методах статистической теории распознавания образов (СТРО), позволяющих качественно оценивать ТС конструктивных элементов ДВС при минимальном числе исходных данных (диагностические параметры, параметры внешней среды и управления двигателем).

Во второй главе приводится описание математической модели рабочего процесса двигателя 6Ч 8,2/11 (ГАЗ), разработанной для исследования ДВС как объекта технического диагностирования. Математическая модель представляет собой описание рабочего процесса ДВС в дифференциальной форме и основана на законе сохранения энергии с учетом процессов теплопередачи, массообмена

$$\frac{dU}{d\varphi} = \frac{dQ_{\text{сг топл}}}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} + \frac{dL}{d\varphi} + i_{\text{вп}} \frac{dG_{\text{вп}}}{d\varphi} + i_{\text{р.т.}} \frac{dG_{\text{вып}}}{d\varphi} + i_{\text{р.т.}} \frac{dG_{\text{ут}}}{d\varphi}$$

и уравнения состояния рабочего тела Клапейрона-Менделеева

$$pV_{\text{цил}} = G_{\text{цил}} R_{\text{р.т.}} T,$$

где U – внутренняя энергия рабочего тела, находящегося в цилиндре; φ – угол ПКВ; p , T , $i_{p.t.}$ – соответственно давление, абсолютная температура и энтальпия рабочего тела, находящегося в цилиндре; $i_{вп}$ – энтальпия смеси во впускном патрубке; $Q_{сг\ топл}$, Q_w – соответственно теплота, выделяемая в результате сгорания топлива, теплота, отводимая через стенки КС от рабочего тела; $\frac{dG_{вп}}{d\varphi}$, $\frac{dG_{вып}}{d\varphi}$, $\frac{dG_{ут}}{d\varphi}$ – скорости изменения массы рабочего тела в цилиндре в процессах впуска, выпуска и утечках (вычислялись по известным уравнениям газовой динамики); $V_{цил}$ – объём цилиндра; $R_{p.t.}$ – газовая постоянная для рабочего тела.

Математическое моделирование рабочего процесса проводилось в программном комплексе MS Excel и среде математического моделирования и программирования MATLAB. Результаты математического моделирования рабочего процесса удовлетворительно согласуются с результатами экспериментальных исследований, представленными в технической литературе и полученными на испытательном стенде кафедры «Тепловые двигатели» БГТУ.

Применение математической модели позволило определить функциональную зависимость между структурными и диагностическими параметрами, при этом учитывалось влияние внешних влияющих факторов (давление и температура окружающего воздуха), а также параметров управления (цикловая подача топлива, частота вращения двигателя).

Математическое моделирование проводилось на режиме номинальной паспортной мощности, режиме холостого хода и режиме стартерной прокрутки. Программа математического моделирования использовалась для имитации характерных неисправностей ДВС, в частности неисправности КС ЦПГ, которая является одним из основных конструктивных элементов, определяющих надёжность двигателя.

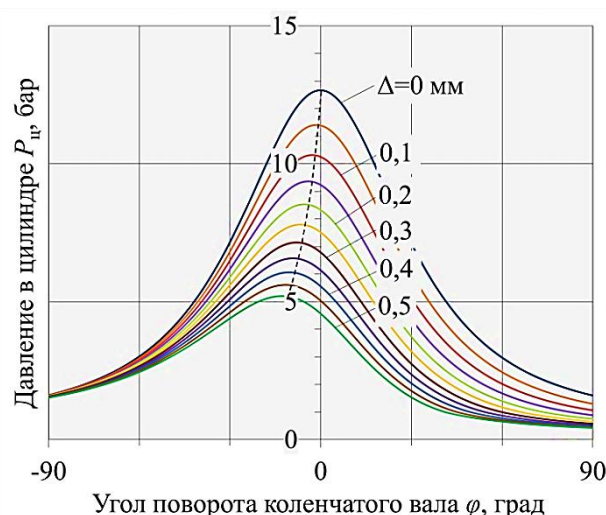


Рис. 1. Изменение давления в зависимости от параметра $\Delta_{ззор}$

Математическое моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе математического моделирования имитировалась работа ДВС 6Ч 8,2/11 (ГАЗ) с различной степенью нарушения герметичности КС при номинальной частоте вращения коленчатого вала $n_{дв}=2800 \text{ мин}^{-1}$ без воспламенения топливно-воздушной смеси. Степень нарушения герметичности КС задавалась зазором («просветом») между поршневыми кольцами и втулкой цилиндра в диапазоне его изменения $\Delta_{ззор}=0 \dots 0,5 \text{ мм}$. Установлено, что при увеличении $\Delta_{ззор}$ между поршневыми кольцами и втулкой цилиндра происходит значительное снижение максимального давления цикла P_{max} в ВМТ (рис. 1). Также нарушается свойство симметрии индикаторной диаграммы (происходит

значительное снижение максимального давления цикла P_{max} в ВМТ (рис. 1). Также нарушается свойство симметрии индикаторной диаграммы (происходит

смещение кривых влево от ВМТ).

Результаты математического моделирования показали, что при зазоре $\Delta_{\text{зазор}} = 0,5$ мм (имитация серьёзной неисправности двигателя, в частности разрушения поршневых колец) давление P_{max} уменьшается по сравнению с давлением при полной герметичности КС на 7,5 бар. Таким образом, используя результаты математического моделирования и проводя экспериментальное исследование (измеряя параметр P_{max}), можно оценить параметр $\Delta_{\text{зазор}}$ КС.

На втором этапе математического моделирования задавались классы исправного и неисправного состояний КС, для чего использовался критерий, представляющий собой относительную потерю эффективной цилиндровой мощности $\delta Pe_{\text{ц}}$, вызванную утечками рабочего тела из цилиндра. Математическое моделирование выполнялось для режима номинальной частоты вращения коленчатого вала с воспламенением топливно-воздушной смеси в исследуемом цилиндре. Изменялась степень нарушения герметичности КС ЦПГ заданием зазора $\Delta_{\text{зазор}}$ в диапазоне $0 \dots 0,1$ мм. Определялась абсолютная и относительная потеря эффективной цилиндровой мощности $\delta Pe_{\text{ц}}$ вследствие утечки рабочего тела из цилиндра (рис. 2).

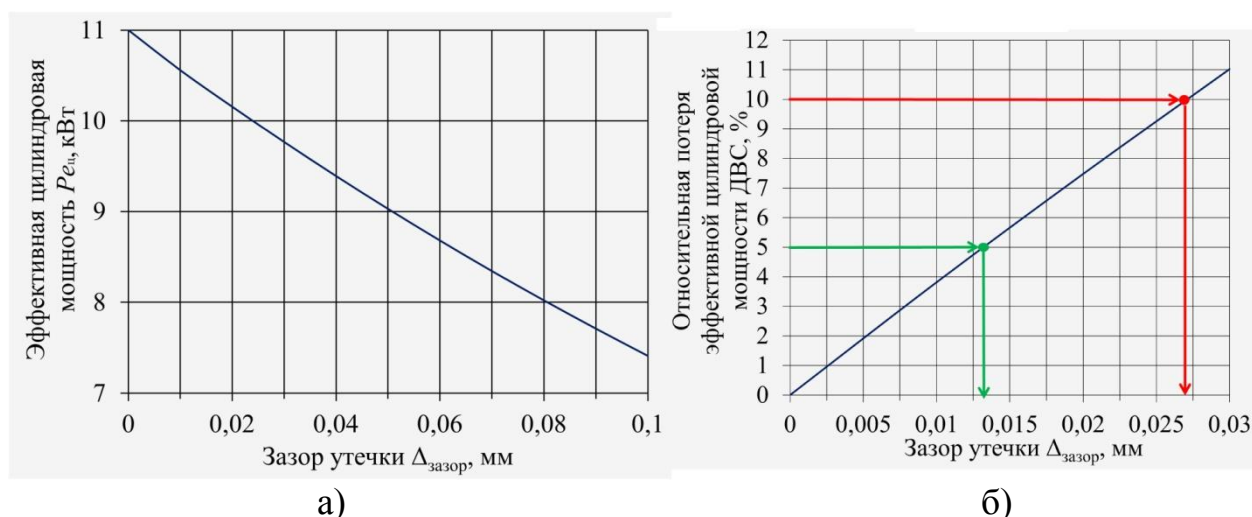


Рис. 2. Изменение абсолютной (а) и относительной потери (б) эффективной цилиндровой мощности $\delta Pe_{\text{ц}}$ в зависимости от зазора $\Delta_{\text{зазор}}$ между поршневыми кольцами и втулкой цилиндра

Принято, что для класса исправного состояния КС ЦПГ относительная потеря эффективной цилиндровой мощности $\delta Pe_{\text{ц}}$ не должна превышать 5% (рис. 2б). Это соответствует диапазону изменения зазора $\Delta_{\text{зазор}} = 0 \dots 0,0127$ мм. Тогда для класса неисправного состояния (нарушение герметичности КС на ранней стадии возникновения неисправности) предел изменения параметра $\delta Pe_{\text{ц}} = +5 \dots +10\%$, что соответствует диапазону $\Delta_{\text{зазор}} = 0,0127 \dots 0,026$ мм. Зазор $\Delta_{\text{зазор}} = 0,0127$ мм рассматривалась как граничное состояние между классами исправного и неисправного состояний ($\Delta_{\text{гр}}$).

Для определения наиболее информативных режимов для оценки ТС КС, а также распознавания неисправности на ранней стадии возникновения проведено математическое моделирование режимов стартерной прокрутки,

холостого хода и номинальной мощности с различными зазорами, соответствующими исправному, граничному и неисправному состояниям двигателя. Оценка информативности режимов проводилась на основе сравнения чувствительности ДП, определяемой как $\frac{dP_{\max}}{d\Delta} = \frac{P_{\max1} - P_{\max5}}{|\Delta_1 - \Delta_5|}$, где $P_{\max1}$ – значение ДП при $\Delta_1=0$ мм, $P_{\max5}$ – при $\Delta_5=0,026$ мм (рис. 3).

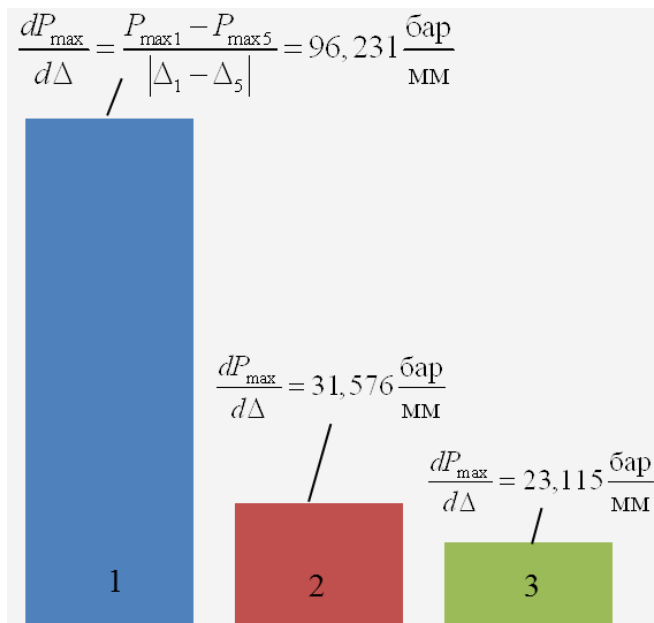


Рис. 3. Оценка информативности диагностического параметра $P_{\max}$ на различных режимах работы двигателя: 1 – режим стартерной прокрутки; 2 – режим холостого хода; 3 – режим номинальной мощности

Как видно (рис. 3) при появлении зазора $\Delta_{\text{зазор}} \neq 0$ для различных режимов работы двигателя наиболее информативным является режим *стартерной прокрутки*, менее информативными – режимы холостого хода и номинальной мощности. Тем не менее, как будет показано ниже, достаточно качественные алгоритмы технического диагностирования могут быть построены и для режима холостого хода.

Приведен анализ влияния появления неплотности КС на параметры рабочего процесса ДВС. В качестве примера показано влияние неплотности в соединении «цилиндр – поршневые кольца» на массу рабочего тела, содержащегося в цилиндре (рис. 4).

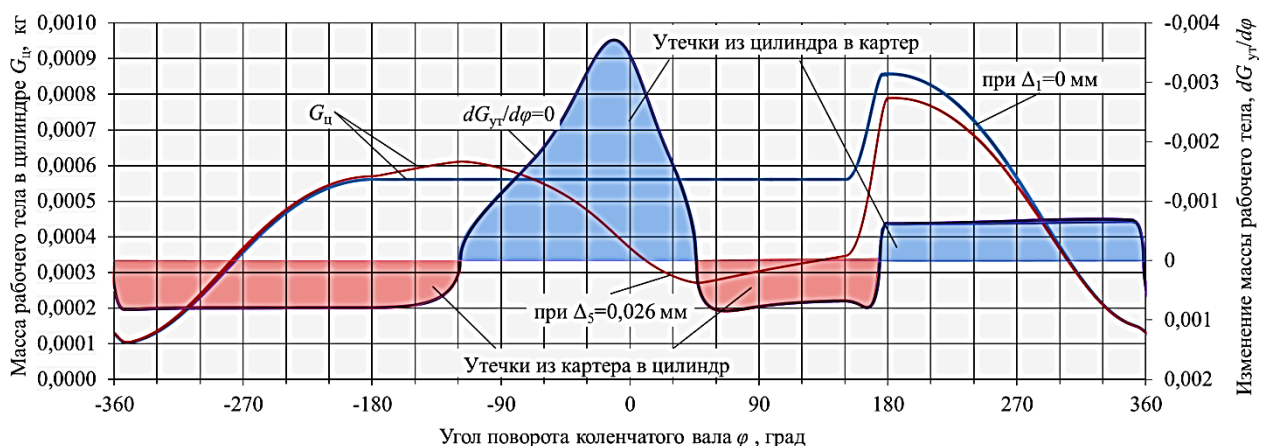


Рис. 4. Изменение массы рабочего тела в зависимости от направления утечек рабочего тела (режим стартерной прокрутки)

Установлено, что при появлении неплотности КС наибольшие утечки рабочего тела соответствуют режимам стартерной прокрутки и холостого хода. Показано, что даже небольшие зазоры между поршневым кольцом и

втулкой цилиндра приводят к значительному прорыву газов в подпоршневое пространство (значения с отрицательным знаком на рис. 4). Как известно, это негативно отражается на физико-химических свойствах моторного масла и способствует развитию неисправностей.

В третьей главе приводится описание разработанного испытательного стенда для исследования ДВС как объекта диагностирования и установленного на кафедре «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета (рис. 5).

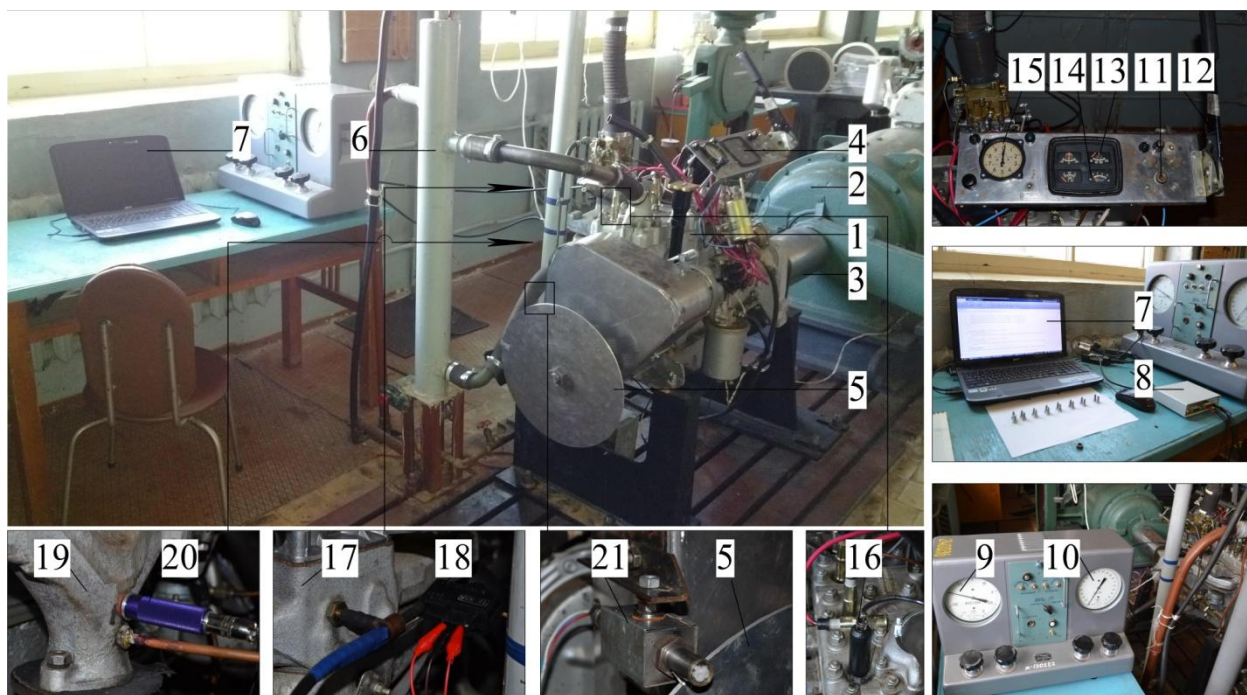


Рис. 5. Испытательный стенд и комплекс КИП

Испытательный стенд представляет собой комплекс, состоящий из двигателя внутреннего сгорания 6Ч 8,2/11 (ГАЗ) 1; балансирующей машины 2; фундамента с подмоторной плитой; соединительного вала для передачи крутящего момента от двигателя к балансирующей машине 3; пульта управления двигателем 4; диска регистрации углового положения коленчатого вала 5; системы охлаждения 6.

Пульт управления двигателем позволяет осуществлять прокрутку двигателя стартером с помощью кнопки 11; регулировать степень открытия дроссельной заслонки рычагом 12; контролировать частоту вращения вала двигателя по тахометру 15, давление масла 14, температуру охлаждающей жидкости 13.

Для исследования рабочего процесса ДВС использованы ПК типа «notebook» 7 и промышленный АЦП ЛА-20 USB 8 производства ЗАО «Руднев-Шиляев». Для индицирования двигателя использованы тензометрические датчики давления. Датчик давления в цилиндре 16 (НПП «АСЕ») устанавливается вместо свечи зажигания и используется для получения осциллограмм на режимах стартерной прокрутки и холостого хода (без воспламенения топ-

ливно-воздушной смеси). Для получения диаграмм давления во впускном патрубке 17 использован штатный датчик 18 для автомобилей ГАЗ. Индикаторный процесс в выпускном коллекторе 19 исследовался с использованием датчика давления 20 с измерительным элементом производства фирмы «Motorola». Угловое положение коленчатого вала двигателя определялось с помощью оптического ИК-датчика 21, устанавливаемого над диском 5. Для дублирования показаний датчиков использовались образцовые средства измерения: вакуумметр 9 и манометр 10.

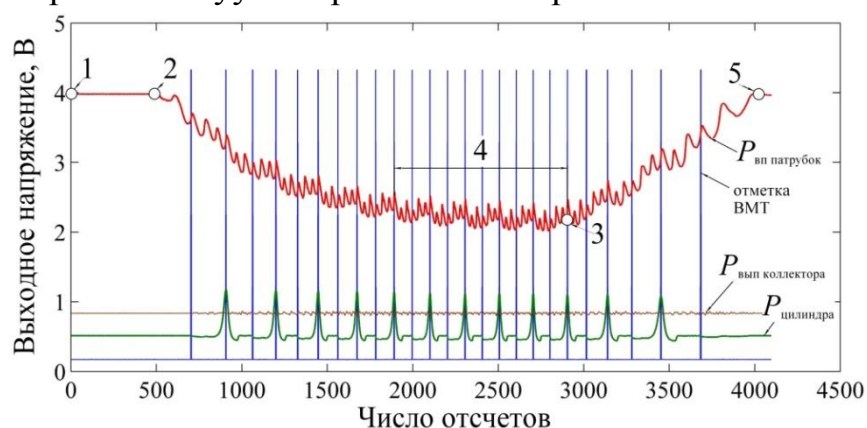


Рис. 6. Графическое окно с изображением записи сигналов датчиков: 1 — момент запуска системы; 2 — начало прокрутки двигателя стартером; 3 — отключение стартера; 4 — участок установившейся частоты вращения; 5 — момент остановки двигателя и прекращения работы системы

ния двигателя для режима стартерной прокрутки (дроссельная заслонка закрыта, давление во впускном патрубке $P_{вп}=0,64$ бар, $n_{дв}=200$ мин⁻¹), представлен на рис. 6.

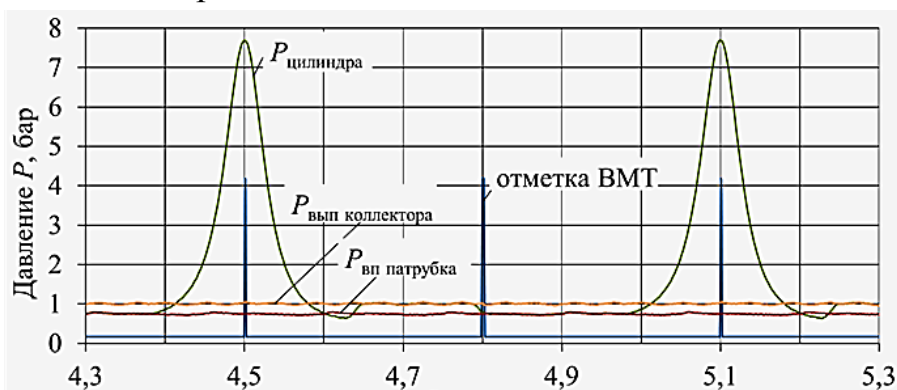


Рис. 7. Индикаторные диаграммы рабочего процесса двигателя на режиме стартерной прокрутки ($P_{вп}=0,75$ бар, $n_{дв}=200$ мин⁻¹)

что построение алгоритмов диагностирования осуществляется только на установившейся частоте вращения коленчатого вала. В связи с этим в автоматизированную систему сбора и обработки экспериментальных данных

Для обработки сигналов датчиков и управления устройством АЦП с помощью интерфейса USB разработана автоматизированная система сбора и обработки экспериментальных данных в среде математического моделирования и программирования MATLAB. Пример записи циклов рабочего процесса ДВС, отражающий результаты индизирования

В указанной системе заложены алгоритмы, позволяющие отражать по оси абсцисс (кроме точек отсчета) время записи циклов, угол ПКВ. Также имеется возможность представления последовательных циклов во времени (рис. 7). Следует отметить,

включен алгоритм выделения циклов для данных режимов.

При построении алгоритмов диагностирования КС использован метод имитации неисправности на исследуемом ДВС. Для этого сконструирован специальный штуцер, вворачиваемый вместо свечи зажигания (рис. 8).

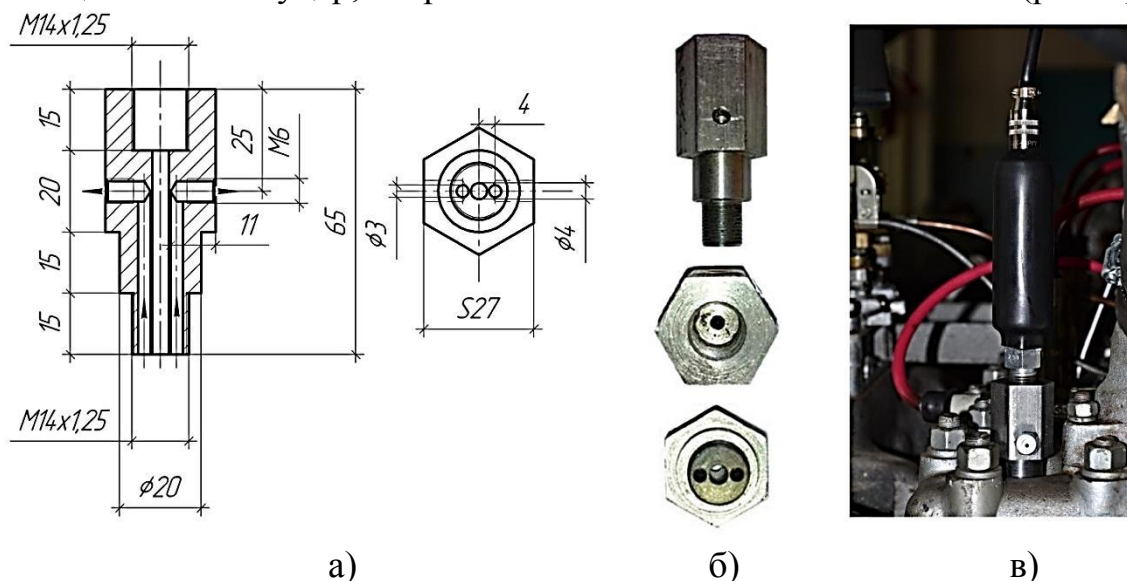


Рис. 8. Штуцер, вворачиваемый в камеру сгорания для имитации неисправности ЦПГ: а – чертеж штуцера; б – натурная деталь; в – установка штуцера и датчика давления на цилиндре

Штуцер (рис. 8б) изготовлен на высокоточном оборудовании Брянского автомобильного завода. Стрелками (рис. 8а) показаны направления утечек рабочего тела из камеры сгорания через полости переходника при индицировании двигателя. На боковых гранях штуцера имеются отверстия для вворачивания винтов с калиброванными отверстиями с различными диаметрами d_{yt} .

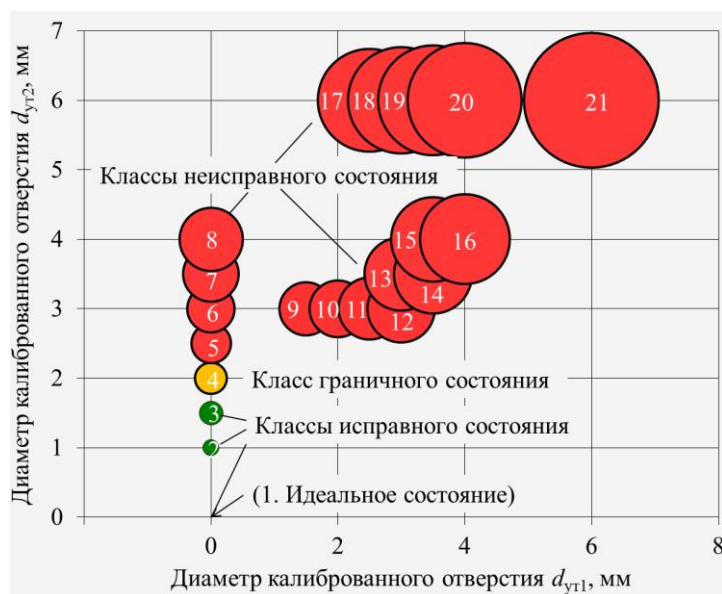


Рис. 9. План эксперимента

исследования проводились при четырёх положениях дроссельной заслонки (при давлениях во впускном патрубке: 0,64 бар (полностью закрытая заслонка); 0,75 бар; 0,85 бар; 0,95 бар (полностью открытая заслонка)). В соответ-

ствии с диаметрами d_{yt} . Диаметры отверстий в винтах выбраны согласно данным математического моделирования и заданы при составлении плана экспериментальных исследований (рис. 9). Для проведения экспериментальных исследований выбран 21 вариант различных утечек, соответствующих трём классам ТС, показанным на рисунке. Площадь каждого круга на рисунке соответствует площади утечек F_{yt} каждого режима испытаний.

На режиме стартерной прокрутки экспериментальные

ствии с планом экспериментальных исследований (рис. 9) для каждого из 21 варианта различных уровней утечек проведено индицирование цилиндра двигателя, в результате чего получен необходимый статистический объем диагностической информации. Принято, что для оценки технического состояния герметичности камеры сгорания ЦПГ достаточно данных по 40 циклам для каждого класса ТС. Автоматизированной системой сбора и обработки экспериментальных данных обрабатывались параметры рабочего процесса ДВС по каждому циклу и представлялись в табличном виде.

Аналогично проводились экспериментальные исследования рабочего процесса ДВС на режиме холостого хода. Индицирование ДВС осуществлялось без воспламенения топливно-воздушной смеси в исследуемом цилиндре при четырех положениях дроссельной заслонки, соответствующих различным абсолютным давлениям на впуске $P_{вп}$, равным 0,35 бар (минимально устойчивая частота вращения коленчатого вала, $n_{дв}=500 \text{ мин}^{-1}$); 0,4 бар ($n_{дв}=650 \text{ мин}^{-1}$); 0,45 бар ($n_{дв}=750 \text{ мин}^{-1}$); 0,49 бар ($n_{дв}=850 \text{ мин}^{-1}$).

Индикаторные диаграммы, полученные на одном из режимов стартерной прокрутки ($n_{дв}=200 \text{ мин}^{-1}$, $P_{вп}=0,75 \text{ бар}$), а также на одном из режимов холостого хода ($n_{дв}=500 \text{ мин}^{-1}$, $P_{вп}=0,35 \text{ бар}$) для всего заданного диапазона изменения зазора $\Delta_{ззор}$ (0 ... 0,219 мм) представлены на рис. 10.

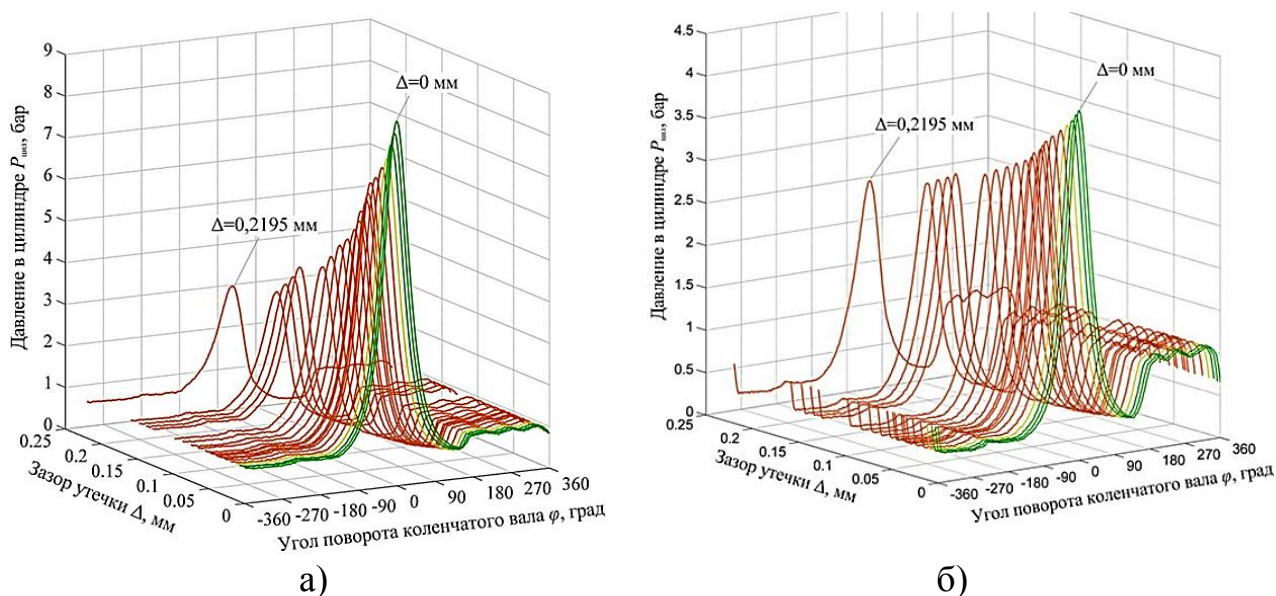


Рис. 10. Индикаторные диаграммы, полученные имитацией неисправности:
а – режим стартерной прокрутки ($P_{вп}=0,85 \text{ бар}$, $n_{дв}=200 \text{ мин}^{-1}$);
б – режим холостого хода ($P_{вп}=0,35 \text{ бар}$, $n_{дв}=500 \text{ мин}^{-1}$)

В четвертой главе приводится методика построения алгоритмов технического диагностирования ДВС с применением методов математической статистики (проверка статистических гипотез), таблиц функций неисправностей и методов СТРО (линейный дискриминантный анализ, прямая оценка апостериорной вероятности по теореме Байеса).

Определено, что для построения диагностических алгоритмов, позволяющих качественно оценивать ТС КС, необходимо использовать диагностический параметр $P_{\max}$ и дополнительный параметр $P_{вп}$ (образуется вектор параметров рабочего процесса $\{P_{\max}; P_{вп}\}$). Это позволяет уменьшить при

проведении технического диагностирования вероятность появления ошибочных решений $P_{\text{ерог}}$. Показано, что широко применяемые методы диагностирования ДВС, основанные на проверке статистических гипотез и таблицах функций неисправностей, позволяют качественно оценивать ТС КС. Так, при использовании данных методов диагностирования для режима стартерной прокрутки вероятность ошибочного распознавания $P_{\text{ерог}}$ в среднем составляет 0,05. Для повышения качества оценки ТС КС приводится методика построения алгоритмов диагностирования с использованием линейного ДА. Правило принятия решения (алгоритм диагностирования) представляет собой логическое заключение на основе приведенного ниже неравенства (в левой части неравенства находится рассчитываемая функция ДА)

$$x^t \sum^{-1} (\mu_1 - \mu_2) - \frac{1}{2} (\mu_1 + \mu_2)^t \sum^{-1} (\mu_1 - \mu_2) > (<) 0 \Rightarrow x \in \omega_1 (x \in \omega_2), \quad (1)$$

где μ_1 и μ_2 – векторы математических ожиданий распределений класса ω_1 «Исправное состояние» и класса ω_2 «Неисправное состояние»; Σ – осредненная матрица ковариаций параметров (компонентов вектора x) классов; t – символ транспонирования матрицы; $^{-1}$ – символ обращения матрицы; $x^t \sum^{-1} (\mu_1 - \mu_2)$ – линейная комбинация компонентов вектора наблюдения; величина $-\frac{1}{2} (\mu_1 + \mu_2)^t \sum^{-1} (\mu_1 - \mu_2)$ – свободный член функции ДА; $\in$ – символ принадлежности.

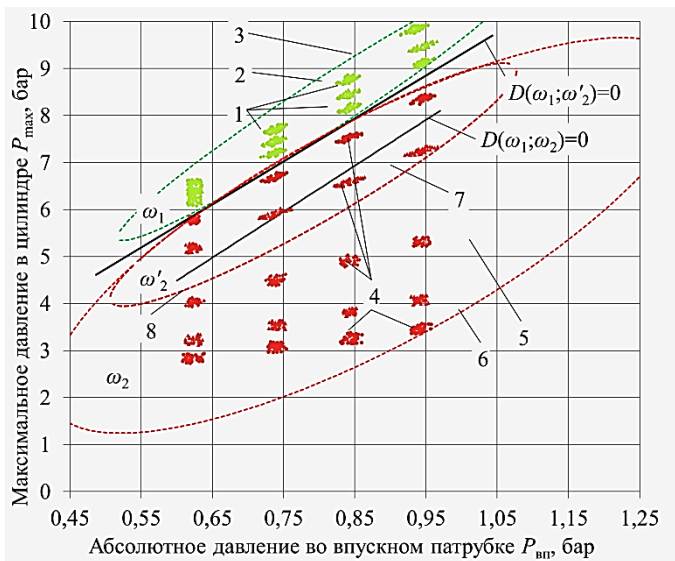


Рис. 11. Локализация классов ω_1 , ω_2 в пространстве параметров P_{max} и $P_{\text{вп}}$: 1, 4 – подклассы ω_{1j} и ω_{2j} ; 2, 5, 7 – 95%-е доверительные области для ω_1 , ω_2 , ω'_2 ; 3, 6, 8 – границы эллипсов рассеивания для ω_1 , ω_2 , ω'_2

качественного алгоритма диагностирования из класса неисправного состояния ω_2 был выделен подкласс ω'_2 (см. рис. 11), у которого вариация диагностических параметров аналогична вариации параметров класса ω_1 . После обработки обучающей выборки из экспериментальных данных (480 циклов для класса ω_1 и 320 циклов для ω'_2) дискриминантная функция приняла вид

$$D(\omega_1, \omega'_2) = 25,75 \cdot P_{\text{max}} - 271,281 \cdot P_{\text{вп}} - 22,054,$$

При построении алгоритма диагностирования с применением метода линейного ДА (1) необходимо учитывать «близость» или равенство ковариационных матриц. Поэтому при рассмотрении классов ТС с неравными ковариационными матрицами построенные алгоритмы могут давать грубые ошибочные решения.

Локализация классов ТС и результаты расчета функции ДА для распознавания классов ω_1 и ω_2 , у которых ковариационные матрицы не равны (для режима стартерной прокрутки) представлены на рис. 11. Как видно, происходит ошибочное разделение классов ТС. Для построения ка-

правило принятия решения имеет вид

$$25,75 \cdot P_{\max} - 271,281 \cdot P_{\text{вп}} - 22,054 \geq (<) 0 \Rightarrow x \in \omega_1 (x \in \omega'_2).$$

Для оценки качества построенного алгоритма каждой реализации точки x класса исправного ω_1 и подкласса неисправного ω'_2 состояний рассчитана апостериорная вероятность принадлежности $x \in \omega_i$ (на «фоне» класса ω_j) по формуле

$$P(\omega_i / x)_j = \frac{1}{1 + \exp \left[\frac{1}{2} (C_2 - C_1) \right]}, \quad (2)$$

где $C_1 = (x - \mu_1)^t \Sigma^{-1} (x - \mu_1)$ и $C_2 = (x - \mu_2)^t \Sigma^{-1} (x - \mu_2)$.

Качество построенного алгоритма можно оценить по математическому ожиданию вероятности $\mu\{P(\omega_i/x)_{\omega j}\}$ на основе анализа экзаменационной выборки, полученной при экспериментальном исследовании: $\mu\{P(\omega_i/x)_{\omega j}\} = 0,991$.

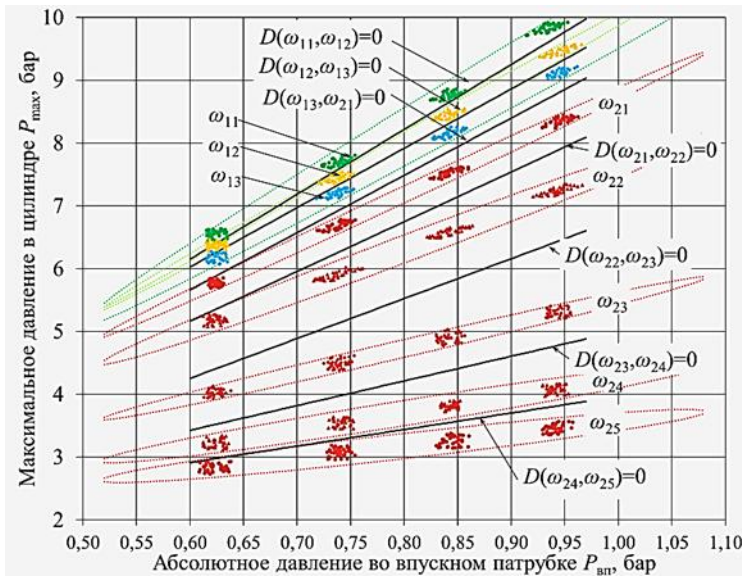


Рис. 12. Дискриминантные функции подклассов технического состояния (режим стартерной прокрутки)

подкласса ω_{13} (граничный подкласс исправного ТС) и подкласса ω_{21} (граничный подкласс неисправного ТС):

функция ДА: $D(\omega_{13}, \omega_{21}) = 3,917 \cdot P_{\max} - 35,734 \cdot P_{\text{вп}} - 0,733$;

решающее правило: $3,917 \cdot P_{\max} - 35,734 \cdot P_{\text{вп}} - 0,733 \geq (<) 0 \Rightarrow x \in \omega_{13} (x \in \omega_{21})$;

оценка качества алгоритма: $\mu\{P(\omega_{13}/x)_{\omega_{21}}\} \approx 0,915$.

Применение линейного ДА позволило построить алгоритм диагностирования КС, который с большой долей вероятности определяет неисправность на самой ранней стадии её развития. Аналогично линейный ДА использовался при построении алгоритма диагностирования для режима холостого хода.

Показано, что эффективность алгоритмов распознавания классов (подклассов) ТС можно повысить на основе применения прямой апостериорной вероятности появления классов ТС по теореме Байеса. Формула для

Для повышения качества построенного алгоритма диагностирования класс ω_1 был разделен на отдельные подклассы ω_{11} , ω_{12} , ω_{13} , а класс ω_2 — на подклассы ω_{21} , ω_{22} , ω_{23} , ω_{24} , ω_{25} . Далее ДА проводился для данных подклассов. При этом получены функции ДА и правила принятия решений для диагностирования подклассов. Эллипсы рассеивания подклассов, соответствующие доверительному уровню 95 %, показаны на рис. 12. В качестве примера приводятся результаты ДА

определения апостериорной вероятности появления класса ω_2 по теореме Байеса имеет вид

$$P(\omega_2 / x, y) = \frac{P(\omega_2) f(x, y / \omega_2)}{P(\omega_1) f(x, y / \omega_1) + P(\omega_2) f(x, y / \omega_2)}, \quad (3)$$

где (если рассматривать двумерный случай):

$$f(x, y / \omega_1) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x\omega1}\sigma_{y\omega1}\sqrt{1-r_{\omega1}^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-r_{\omega1}^2)}\left[\frac{(x-\mu_{x\omega1})^2}{\sigma_{x\omega1}^2} - \frac{2r_{\omega1}(x-\mu_{x\omega1})(y-\mu_{y\omega1})}{\sigma_{x\omega1}\sigma_{y\omega1}} + \frac{(y-\mu_{y\omega1})^2}{\sigma_{y\omega1}^2}\right]\right\};$$

$$f(x, y / \omega_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x\omega2}\sigma_{y\omega2}\sqrt{1-r_{\omega2}^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-r_{\omega2}^2)}\left[\frac{(x-\mu_{x\omega2})^2}{\sigma_{x\omega2}^2} - \frac{2r_{\omega2}(x-\mu_{x\omega2})(y-\mu_{y\omega2})}{\sigma_{x\omega2}\sigma_{y\omega2}} + \frac{(y-\mu_{y\omega2})^2}{\sigma_{y\omega2}^2}\right]\right\};$$

$x = P_{\text{вп}}$; $y = P_{\text{max}}$; $P(\omega_1), P(\omega_2)$ – априорные вероятности появления классов ω_1 и ω_2 (априори было принято, что появление классов ω_1 и ω_2 равновероятно). Тогда алгоритм распознавания класса ω_2 описывается логическим решением $P(\omega_2 / x, y) \geq 0,5 \Rightarrow \{x, y\} \in \omega_2$, в противном случае $\Rightarrow \{x, y\} \in \omega_1$.

На первом этапе исследований построен алгоритм диагностирования классов исправного ω_1 и неисправного ω_2 ТС (классам соответствуют неравные ковариационные матрицы). В результате математической обработки экспериментальных данных определено: $\mu\{P(\omega_2/x, y)\} = 0,998$. Это свидетельствует о высоком качестве построенного алгоритма. На втором этапе исследований построен алгоритм распознавания подклассов ω_{13} и ω_{21} (ω_{13} – «Зарождение дефекта»; ω_{21} – «Появление неисправности», см. рис. 12). Подклассу ω_{13} соответствует выборка экспериментальных данных, полученная при $d_{\text{ут}} = 1,5$ мм, подклассу ω_{21} соответствует выборка экспериментальных данных, полученная при $d_{\text{ут}} = 2,5$ мм. Графическое отображение функции апостериорной вероятности $P(\omega_{21}/x, y)$, полученной в результате математической обработки экзаменационной выборки, представлено на рис. 13.

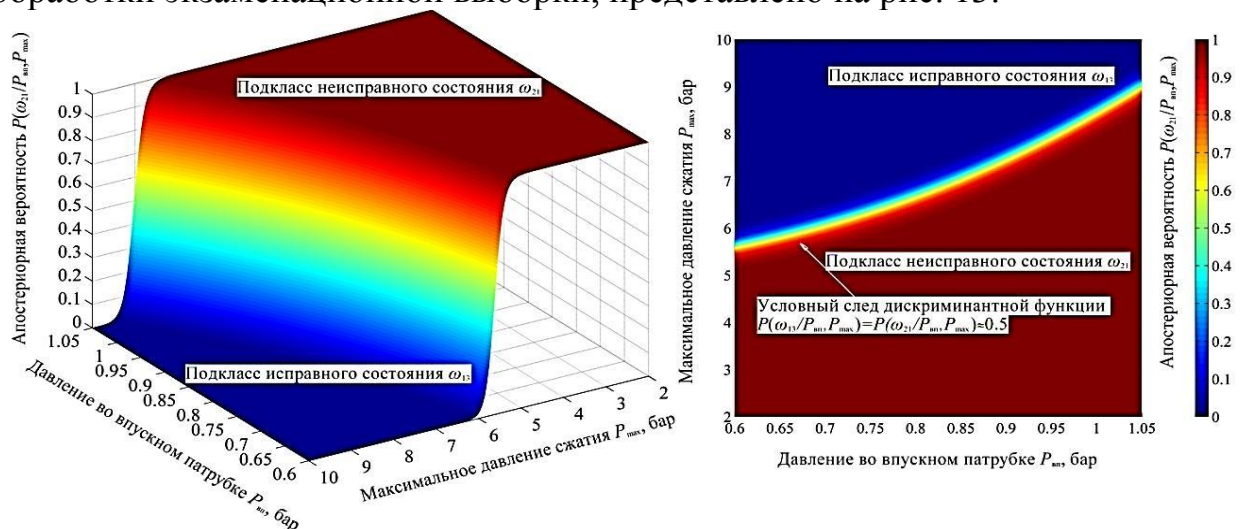


Рис. 13. Отображение апостериорной вероятности появления подкласса ω_{21} в пространстве параметров $\{P_{\text{вп}}, P_{\text{max}}\}$ по теореме Байеса

Как видно из рис. 13, граница перехода от красного фона к синему фону представляет собой область, которой свойственна повышенная вероятность ошибки распознавания подклассов ω_{13} и ω_{21} . В этой области проходит условный след неявной дискриминантной функции, которая имеет *нелинейный* характер. Анализ экзаменационной выборки показал, что $\mu\{P(\omega_{21}/x, y)\} = 0,992$.



Рис. 14. Диаграмма сравнения алгоритмов диагностирования подклассов ω_{13} и ω_{21} , (режим стартерной прокрутки)

Для сравнения построенных алгоритмов диагностирования составлена диаграмма (рис. 14), из которой видно, что алгоритм, основанный на прямой оценке апостериорной вероятности появления класса ТС по теореме Байеса, является наиболее качественным. Также с его помощью возможно качественное распознавание классов ТС

ДВС, статистически описываемых неравными ковариационными матрицами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве наиболее существенных результатов работы можно назвать следующие:

1. Выполнен обзор современных методов, средств, алгоритмов и систем технического диагностирования ДВС. Показана необходимость обнаружения неисправностей на ранней стадии их развития на основе анализа причин отказов ДВС. Обоснована необходимость совершенствования технического диагностирования ДВС на основе применения универсальных алгоритмов обработки информации.

2. Разработана программа математического моделирования рабочего процесса ДВС с использованием основных положений термодинамики, теории рабочих процессов, газовой динамики, позволяющая моделировать рабочий процесс для исправного и неисправного ТС.

3. Создан испытательный стенд для экспериментального исследования ДВС как объекта технического диагностирования. Разработана автоматизированная система сбора и обработки экспериментальных данных с применением промышленного АЦП, позволяющая одновременно регистрировать и обрабатывать значительный объем информации, поступающей от КИП (тензометрические датчики давления, датчик углового положения коленчатого вала). Также система позволяет всесторонне исследовать индикаторный процесс, выделяя при этом диагностические параметры.

4. Предложена методика имитации нарушения герметичности КС, основанная на использовании устанавливаемого вместо свечи зажигания специального штуцера и винтов с калиброванными отверстиями. Методика позволяет имитировать утечки рабочего тела из КС, которые возникают при распространенных неисправностях ЦПГ (разрушение поршневых колец, неплотное закрытие клапана). Проведены экспериментальные исследования, в результате которых получен объем статистических данных, соответствующий

щий заданным классам ТС, и необходимый для построения алгоритмов диагностирования.

5. Показан стохастический характер рабочего процесса ДВС, на основе чего доказана необходимость оценки ТС с применением вероятностно-статистических методов. Предложено разбиение классов ω_1 и ω_2 на подклассы ω_{ij} , что позволяет качественно оценивать ТС ДВС.

6. Построены алгоритмы диагностирования нарушения герметичности КС, основанные на традиционных методах (проверка статистических гипотез, таблица функций неисправностей). Обоснована необходимость дальнейшего совершенствования алгоритмов диагностирования с использованием вероятностно-статистических методов.

7. Разработаны методы построения алгоритмов диагностирования КС ЦПГ, основанные на методах СТРО (линейный ДА, прямая оценка апостериорной вероятности появления неисправности по теореме Байеса). На основе обработки экспериментальных данных построены алгоритмы диагностики КС ЦПГ. Выполнен вероятностно-статистический анализ качества полученных алгоритмов диагностирования, проведено их ранжирование. Наиболее эффективным является алгоритм диагностирования, основанный на прямой оценке вероятности появления неисправности по теореме Байеса. Данный алгоритм позволяет с высокой точностью диагностировать неисправности КС ЦПГ на самой ранней стадии ее развития (граничные подклассы диагностируются с ошибкой P_{error} , не превышающей 0,5%, в то время как традиционные алгоритмы дают $P_{\text{error}} \approx 10-15\%$). Показано, что метод, основанный на теореме Байеса, является неявным методом нелинейного дискриминантного анализа. Он позволяет качественно оценивать классы ТС, статистически описываемые неравными ковариационными матрицами.

Построенные алгоритмы являются методической основой совершенствования технического диагностирования автотракторных ДВС, а также могут использоваться для разработки концептуально новых *обучающихся* систем диагностирования, в которых реализуются в автоматическом режиме функции сбора, обработки обучающей выборки, построения алгоритма диагностирования и оценки его качества.

Основные положения диссертации отражены в 12 научных работах:

1. Обозов А.А., Таричко В.И. Совершенствование технического диагностирования автомобильных двигателей на основе применения методов статистической теории распознавания образов // Двигателестроение. 2013. №3 (253). С. 16–22.

2. Обозов А.А., Таричко В.И. Проведение экспериментальных исследований рабочего процесса ДВС с целью получения диагностической информации // Вестник БГТУ. 2013. №3 (39). С. 32–40.

3. Обозов А.А., Таричко В.И. Математическое имитационное моделирование рабочего процесса автомобильного ДВС в целях получения диагностической информации // Двигателестроение. 2013. №2 (252). С. 21–25.

4. Обозов А.А., Таричко В.И. Развитие методов и систем техниче-

ского диагностирования ДВС // Двигателестроение. 2012. №4 (250). С. 30–34.

5. Обозов А.А., Таричко В.И. Анализ неисправностей карбюраторных и инжекторных бензиновых ДВС, идентифицируемых системой технической диагностики // Вестник БГТУ. 2012. №2 (34). С. 41–47.

6. Дракин А.Ю., Таричко В.И. Разработка программно-аппаратного комплекса для индицирования двигателя внутреннего сгорания // Совершенствование энергетических машин: Сб. науч. тр. / Под ред. В.В. Рогалева. Брянск: БГТУ, 2013. С. 108–113.

7. Обозов А.А., Таричко В.И. Экспериментальные исследования рабочего процесса ДВС с целью получения диагностической информации // Будущее машиностроения России: Сб. тр. VI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М., 2013. С. 192–194.

8. Обозов А.А., Таричко В.И. Разработка систем диагностики двигателей внутреннего сгорания. Реализация концепции самообучающихся систем // Достижение молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Брянск, 2011. С. 79–81.

9. Обозов А.А., Таричко В.И. Разработка систем диагностики двигателей внутреннего сгорания на основе применения искусственных нейронных сетей // Достижение молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Брянск, 2012. С. 30–31.

10. Обозов А.А., Таричко В.И. Диагностирование двигателей внутреннего сгорания алгоритмами, основанными на нечёткой логике // Достижение молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: Материалы IV Международной научно-практической конференции. Брянск, 2012. С. 31–32.

11. Обозов А.А., Таричко В.И. Самообучающаяся система технической диагностики двигателей внутреннего сгорания // Проведение исследования по приоритетным направлениям современной науки для создания инновационных технологий: Материалы IV Региональной научно-практической конференции молодых исследователей и специалистов. Брянск, 2012. С. 39–40.

12. Обозов А.А., Таричко В.И. Математическое имитационное моделирование рабочего процесса автомобильного ДВС в целях получения диагностической информации // Информационные технологии, энергетика и экономика: Сб. тр. X Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов; В 3 т. Смоленск, 2013. Т. 1. С. 270–273.