

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**УПРАВЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТЬЮ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
МЕТОДАМИ ДИАГНОСТИКИ И ТРИБОТЕХНИКИ**

Минск
БГАТУ
2019

Авторы:

кандидат технических наук, профессор **В. П. Миклуш** (БГАТУ),
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник **А. В. Дунаев**
(ФГБНУ ФНАЦ ВИМ),
кандидат технических наук, доцент **В. Е. Тарасенко** (БГАТУ),
кандидат экономических наук, доцент **С. К. Карпович** (Министерство
сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь),
кандидат технических наук, доцент **Д. А. Жданко** (БГАТУ),
кандидат технических наук, доцент **Н. К. Лисай** («Амкодор-Гродно»,
ТСЦ холдинга «Амкодор»)

Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами
диагностики и триботехники / В. П. Миклуш [и др.]. – Минск : БГАТУ,
2019. – 392 с. – ISBN 978-985-25-0019-7.

В издании изложены современные методы и средства диагностирования выходных, функциональных и ресурсных параметров машин, научное обоснование нормативов и организации технического диагностирования, а также методы выявления причин изнашивания на основе контроля по химмотологическим и спектральным показателям масел, применения экспресс-методов повышения надежности машин приемами триботехники.

Предназначено для руководителей и специалистов технического сервиса машин, работников научно-исследовательских учреждений, преподавателей аграрных вузов, информационно-консультационных служб. Может быть использовано в процессе подготовки и переподготовки инженерно-технических работников.

Табл. 43. Ил. 145. Библиогр.: 153 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 3 января 2019 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация
автомобилей» БНТУ **В. С. Ивашко**;
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Гидропневмоавтоматика
и гидропневмопривод» БНТУ **А. И. Бобровник**

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ.....	10
2. СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ МАШИН.....	22
2.1. Система технического обслуживания и ремонта машин.....	22
2.2. Этапы разработки методов и средств технической диагностики.....	29
2.3. Виды диагностирования и параметры технического состояния машин.....	33
2.4. Управление техническим состоянием машин по результатам диагностирования.....	40
3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ.....	57
3.1. Требования к разработке средств диагностирования.....	57
3.2. Стенды диагностического контроля выходных параметров тракторов.....	63
3.3. Средства контроля топливно-энергетических показателей автотракторных дизелей.....	79
3.4. Методы и средства диагностирования цилиндро-поршневой группы автотракторных ДВС.....	101
3.5. Экспресс-оценка остаточного ресурса цилиндрико-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания.....	124
3.6. Методы и средства диагностирования топливной аппаратуры дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.....	138
3.7. Методы и средства контроля приборов и агрегатов бортового электрооборудования машин.....	157
3.8. Методы и средства диагностирования и испытания гидрооборудования тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.....	160
3.9. Развитие диагностирования технического состояния машин на основе бортовых электронных средств.....	171

3.10. Оптическая эндоскопия полостей узлов и агрегатов	202
3.11. Портативные микропроцессорные диагностические средства	205
3.12. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей.....	218
4. ХИММОТОЛОГИЧЕСКИЙ И ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ.....	225
4.1. Необходимость организации контроля моторных масел при техническом обслуживании тракторов и самоходной сельскохозяйственной техники	225
4.2. Технологические приемы эксплуатационного контроля моторных масел и их реализация для ТО и ремонта ДВС	230
5. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПРИЧИН ПОВЫШЕННОГО ИЗНАШИВАНИЯ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВС	258
5.1. Особенности применения спектрального анализа смазочных масел	258
5.2. Обоснование нормативов содержания металлов и кремния в моторных маслах	261
5.3. Обоснование нормативов содержания металлов и кремния в работавших маслах автотракторных дизелей.....	273
5.4. Управление техническим состоянием автотракторных ДВС по результатам их диагностирования с помощью спектрального анализа масел	285
6. НЕТРАДИЦИОННАЯ ТРИБОТЕХНИКА ДЛЯ БЕЗРАЗБОРНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ СОПРЯЖЕНИЙ ТРЕНИЯ	289
6.1. Модифицирование поверхностей трения.....	289
6.1.1. Развитие способов воздействия на условия трения тел	293
6.1.2. Качественные признаки работы серпентиновых ремонтно-восстановительных трибосоставов и свойства ГМТ-покрытий.....	301
6.1.3. Специфика геомодифицирования поверхностей трения. Механизм трибообработки изношенных поверхностей с помощью ГМТ.....	309

6.1.4. Механизмы образования алмазоподобных углеродных пленок	331
6.1.5. Характеристика наноразмерных алмазных трибопрепаратов.....	334
6.2. Безразборный ремонт узлов трения.....	335
6.2.1. Особенности применения ГМТ-технологии.....	335
6.2.2. Результаты испытаний трибосоставов.....	338
6.2.3. Результаты разработки ремонтно-восстановительного состава	353
6.2.4. Примеры безразборного ремонта	358
6.3. Триботехнические приемы повышения топливной экономичности автотракторных двигателей.....	361
6.3.1. Улучшение топливной экономичности применением комбинированного статического смесителя-активатора	362
6.3.2. Улучшение топливной экономичности применением магнитных и электромагнитных средств обработки	369
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	373
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	378

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АБС – антиблокировочная система
АТЭ – автотракторное электрооборудование
БД – блокировка дифференциала
БУД – блок управления двигателем
БЭС – бортовое электронное средство
ВМТ – верхняя мертвая точка положения поршня в цилиндре ДВС
ГМТ – геомодификатор (минеральный модификатор) трения
ГНС – гидронавесная система
ГРМ – газораспределительный механизм
ГСТ – гидравлическая система трактора
ДВС – двигатель внутреннего сгорания
ДРТ – датчик расхода топлива
ДСС – диспергирующе-стабилизирующие свойства
ЕТО – ежесменное техническое обслуживание
ЗВОМ – задний вал отбора мощности
ЗНУ – заднее навесное устройство
ИЗЖ – индикатор загрязненности жидкости
ИК – индикатор комбинированный
КП – коробка передач
КС – камера сгорания
КШМ – кривошипно-шатунный механизм
КЭСУ – комплексная электронная система управления
МИ – многофункциональный индикатор
МТП – машинно-тракторный парк
ОГ – отработавшие газы ДВС
ОЖ – охлаждающая жидкость
ОКЧ – общее кислотное число
ОЩЧ – общее щелочное число
ПАВ – поверхностно-активные вещества
ПВОМ – передний вал отбора мощности
ПНУ – переднее навесное устройство
ППВВ – предпусковой подогреватель впускного воздуха
ППС – планово-предупредительная система технического обслуживания
ПРМ – параметр технического состояния (диагностический параметр)
ПЭК – панель электронная комбинированная
СТД – средства технического диагностирования

СТО – сезонное техническое обслуживание
СТОТ – станция технического обслуживания тракторов
ТЗ – техническое задание
ТКР – турбокомпрессор дизельного двигателя с радиальной турбиной
ТНВД – топливный насос высокого давления
ТННД – топливный насос низкого давления
ТО – техническое обслуживание
ТОР – техническое обслуживание и ремонт
ТСМ – топливо-смазочные материалы
ФТО – фильтр тонкой очистки
ЦПГ – цилиндро-поршневая группа
ЩЧ – щелочное число
ЭБУ – электронный блок управления
ЭСУД – электронная система управления двигателем

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации сельскохозяйственной техники происходит изменение ее технического состояния от начала использования до утилизации. Производители техники во всем мире не в силах гарантировать отсутствие неисправностей машин даже при нормальных условиях эксплуатации, но особенно ускоряется появление неисправностей при нарушении правил технической эксплуатации и предписаний изготовителя, интенсивной эксплуатации без необходимого контроля или за пределами установленного ресурса, несвоевременном и некачественном техническом обслуживании и ремонте, ошибках в применении эксплуатационных материалов и др.

Для обеспечения работоспособности сельскохозяйственной техники необходимы наиболее эффективные способы управления техническим состоянием и надежностью машин. Особую роль играет планово-предупредительная система (ППС) технического обслуживания (ТО) и ремонта с применением средств контроля. В этом случае регламентный контроль технического состояния машин по установленной периодичности (ГОСТ 20793–2009) определяет порядок и содержание конкретных работ по их ТО и ремонту в соответствии с техническим состоянием машин.

Практика применения ППС ТО и ремонта показала эффективность сочетания регламентного контроля с обслуживанием по фактическому состоянию машин. Это позволяет обеспечить оптимальное управление надежностью машин при условии применения системы их диагностирования. На основании данной системы, измеряя и анализируя параметры состояния машин, получают рекомендации по управлению их техническим состоянием.

Результатом технического диагностирования являются рекомендации по объему и характеру работ ТО, текущего ремонта, по необходимости капитального ремонта составных частей машин.

Практика технической эксплуатации машин во многих отраслях стран ближнего и дальнего зарубежья, а также исследования, выполненные ГОСНИТИ, НИИАТ, НАТИ, другими научно-исследовательскими организациями и учреждениями образования, показали, что сочетание ППС ТО и ремонта машин с регламентным контролем их технического состояния, выполнением работ по фактической потребности позволяет повысить в АПК безотказность тракторов и другой самоходной сельскохозяйственной техники на 25–40 %, их экономичность – на 10–15 %, увеличить полный ресурс до 2 раз, в 1,5–2 раза

снизить затраты на устранение отказов и неисправностей, повысить производительность, уменьшить потери и недобор урожая [30].

Практика ТО и ремонта сельскохозяйственной техники может быть существенно дополнена нетрадиционной триботехникой для безразборного восстановления изношенных сопряжений трения [8, 9, 31–33, 37, 45, 46, 64, 68, 86, 99, 120–122, 144, 145, 147, 152–153]. Предшественники данного направления – твердые смазки, твердые смазочные материалы и твердосмазочные покрытия. Обработка узлов и агрегатов трибосоставами приводит к образованию на поверхностях трения антифрикционного покрытия. Так как значительная доля неисправностей машин и оборудования обусловлена именно небольшим износом сопряжений (0,1–0,3 мм), то достигаемое частичное их восстановление трибосоставами даже на 0,02 мм весьма целесообразно, технически и экономически оправданно. Накопленный опыт и практика безразборного ремонта показали, что такая обработка неаварийных узлов и агрегатов, особенно не имеющих предельного износа, является оправданной альтернативой текущему и капитальному ремонту машин АПК как в доремонтный, так и в послеремонтный период эксплуатации. При этом доремонтный ресурс агрегатов продлевается на 1–3 года, уменьшаются затраты на ремонт, на топливо-смазочные материалы (ТСМ), повышается производительность машин [32, 33, 37].

На основе обобщения накопленного мирового и отечественного опыта в области применения методов и средств диагностики технического состояния сельскохозяйственной техники ставится задача обосновать и раскрыть предпосылки для создания эффективной системы управления ее надежностью в АПК Республики Беларусь.

В работе использованы результаты исследований, проводимых в России (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), Беларуси (БГАТУ, НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства и др.), труды отечественных и зарубежных ученых.

Издание рассчитано на широкий круг читателей и будет полезно лицам, принимающим управляющие решения по данной проблеме, специалистам технического сервиса, организующим и проводящим ТО и ремонт машин и оборудования, а также студентам и аспирантам аграрно-технических вузов.

Авторы выражают благодарность рецензентам: д. т. н., профессору В. С. Ивашко; д. т. н., профессору А. И. Бобровнику; директору ЧП «Экспрессдизель» О. О. Мухле за ценные замечания, которые были учтены при подготовке окончательного варианта.

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Диагностика – отрасль науки, изучающая и устанавливающая признаки состояния системы, а также методы, принципы и средства, при помощи которых дается заключение о характере дефектов системы без ее разборки и производится прогнозирование ресурса системы.

Техническая диагностика машин – система методов и средств, применяемых при определении технического состояния машины без ее разборки. При помощи технической диагностики можно определять состояние отдельных деталей и сборочных единиц машин, осуществлять поиск дефектов, вызвавших остановку или ненормальную работу машины.

На основе полученных при диагностировании данных о характере разрушения деталей и сборочных единиц машины в зависимости от времени ее работы техническая диагностика позволяет прогнозировать техническое состояние машины на последующий срок работы [76, 107, 116].

Совокупность средств диагностирования, объекта и исполнителей, действующих по установленным алгоритмам, называется *системой диагностирования*.

Техническое диагностирование – процесс определения технического состояния объекта с определенной точностью. Результатом диагностирования является заключение о техническом состоянии объекта с указанием при необходимости места, вида и причины дефекта.

Диагностирование проводят как при ТО, так и при ремонте.

При проведении ТО задачи диагностирования заключаются в том, чтобы установить: потребность в особых операциях ТО, в проведении капитального или текущего ремонта машины или ее сборочных единиц; качество функционирования агрегатов и систем машины; перечень работ, которые необходимо выполнить при очередном ТО, а при необходимости – и остаточный ресурс некоторых агрегатов машины.

При ремонте машин задачи диагностирования сводятся к выявлению узлов, агрегатов, подлежащих восстановлению, а также оценке качества ремонтных работ и показателей работоспособности машины.

Виды технического диагностирования классифицируют по назначению, периодичности, месту проведения и уровню специализации. В зависимости от производственных возможностей парка машин диагностирование проводят силами эксплуатационного предприятия или на специализированных предприятиях технического сервиса.

Диагностируемый объект можно рассматривать в двух аспектах: с точки зрения структуры и способа функционирования. Каждый из аспектов имеет особенности, описываемые своей системой понятий.

Структура системы – определенная взаимосвязь, взаиморасположение составных частей (элементов), характеризующих устройство и конструкцию системы.

Под *способом функционирования* понимают механизмы взаимодействия составных частей объекта контроля.

Параметр – качественная мера, характеризующая свойство системы, элемента или явления, в частности процесса. *Значение параметра* – количественная мера параметра.

Основное понятие технической диагностики, связанное со структурным аспектом, – *состояние объекта*.

Свойства структуры объекта в некоторый момент времени могут быть охарактеризованы совокупностью структурных параметров x_1', x_2', \dots, x_n' .

Структурный параметр – качественная мера, характеризующая свойство структуры системы или ее элемента (геометрическая форма, размеры, шероховатость поверхности элементов и др.). Структурные параметры – переменные величины. При изготовлении объекта они зависят от различных технических факторов, а в период эксплуатации – от степени износа и разрушения деталей.

Чтобы повысить степень объективности оценки, на совокупность параметров структуры накладывается *условие минимальности*.

Совокупность параметров x_1, \dots, x_n минимальна, если ни одна из этих величин не может функционально выражаться через значения других параметров, входящих в эту совокупность.

Каждый параметр минимальной совокупности может изменяться независимо от других параметров.

Помимо условия минимальности совокупность параметров, описывающих структуру объекта, также должна удовлетворять *условию полноты*.

Совокупность параметров x_i полна, если знание их величины позволяет принимать однозначные решения о необходимом ремонте и обслуживании объекта.

Набор параметров x_i и их число, используемое для описания структуры объекта, будут меняться в зависимости от целевой установки при использовании диагностической информации. Так, при заводском контроле выпускаемых машин их структура будет характеризоваться набором параметров (размеры, форма, шероховатость поверхности и др.), который отличается от набора параметров

при диагностике этих устройств в условиях эксплуатации (показатели функционирования, работоспособности, остаточного ресурса).

Различают прямые и косвенные диагностические параметры. Рассмотрим объект, состояние которого определяется независимыми величинами x_1, x_2, \dots, x_n . Состояние объекта в некоторый момент времени известно, если определены значения каждой из n величин x_i . Эта задача решена и в том случае, если x_i выражены любыми другими величинами s_1, s_2, \dots, s_m , которые известны.

В целом прямой и косвенный процессы определения неизвестных параметров состояния и называют диагностированием. Оно сводится к измерению доступных параметров диагностического сигнала s_1, s_2, \dots, s_m и к вычислению параметров состояния с помощью известных соотношений, которые устанавливаются во время тарировки системы диагностики. Тарировка заключается в изменении в определенном порядке состояния элементов объекта и в регистрации параметров сигнала s_j .

Таким образом, для описания состояния объекта имеем две системы параметров: x_1, x_2, \dots, x_n и s_1, s_2, \dots, s_m .

Чтобы диагностическая задача была разрешимой, необходимо взаимно однозначное соответствие между обеими группами параметров. Практически это значит, что каждому возможному состоянию объекта должен соответствовать свой диагностический сигнал, а каждому сигналу – единственное состояние.

Определение зависимости сигнала от изменения параметров состояния объекта $s_j = s_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ или эквивалентной ей зависимости параметров состояния от величины параметров сигнала составляет важнейший и наиболее трудоемкий этап разработки системы диагностирования.

В настоящее время наметилась тенденция снижения объемов ремонтно-обслуживающих работ сельскохозяйственной техники за счет замены отказавших составных частей машин на новые. При этом возрастает потребность в диагностировании агрегатов и узлов с целью определения их остаточного ресурса. Это обуславливает необходимость применения таких средств диагностирования, которые наряду с обеспечением оперативного и качественного диагноза позволяют осуществлять постоянный мониторинг за техническим состоянием машины, т. е. управлять ее техническим состоянием. Последнее возможно за счет применения новейших бортовых систем контроля состояния агрегатов нового поколения и обеспечивающих:

– непрерывный контроль технического состояния, в т. ч. на переходных режимах работы;

– своевременное выявление опасных дефектов с оценкой остаточного ресурса;

– сбор данных для углубленного диагностирования и долгосрочного прогноза состояния во время проведения периодических ТО;

– работа систем в необслуживаемом автоматическом режиме.

Первые две задачи – общие, их решение расширяет возможности и повышает достоверность диагностирования объектов в любой области техники, позволяя развивать системы аварийной сигнализации до систем оперативного диагностирования.

Методы диагностирования машин можно разделить на субъективные и объективные.

Субъективные методы позволяют оценить техническое состояние контролируемого объекта: визуальным осмотром (места подтекания топлива, масла и технических жидкостей (их качество определяют по пятну на фильтровальной бумаге); наличие трещин на металлоконструкции; деформация шин и остаточная деформация металлоконструкции; заметная на глаз усадка штока силового цилиндра при нейтральной позиции рукоятки золотника распределителя, вспенивание жидкости, цвет выхлопных газов и т. д.); прослушиванием (характер шумов, стуков и вибрации); на ощупь по степени нагрева механизмов и трубопроводов; по характерному запаху.

Достоинство субъективных методов – низкая трудоемкость и практическое отсутствие средств измерения. Однако результаты диагностирования этими методами дают только качественную оценку технического состояния объекта и зависят от опыта и квалификации диагноста, не выявляют причину сложных неисправностей.

Объективные методы контроля работоспособности объекта основаны на использовании измерительных приборов, стендов и другого оборудования, позволяющих количественно определять параметры технического состояния, которые изменяются в процессе эксплуатации машины. При диагностировании машин используются средства самых различных принципов и назначения, что приводит к большому разнообразию применяемых методов. Наибольшее предпочтение отдается методам, определяющим непосредственно структурные параметры объектов.

В настоящее время известен ряд объективных методов и средств диагностирования работоспособности машин в целом, ее систем и сборочных единиц: статопараметрический, амплитудно-фазовых

характеристик, временной, силовой, переходных характеристик, виброакустический, тепловой, анализа состояния жидкостей, радиационный, электрический, нефелометрический, а также непосредственное измерение показателей отдельных деталей.

Статопараметрический метод основан на измерении давления и подачи или расхода рабочей жидкости и позволяет оценить объемный коэффициент полезного действия (КПД). Он позволяет косвенно оценить структурные параметры узлов, агрегатов и целесообразность дальнейшей эксплуатации, однако для подключения датчиков к сборочным единицам необходимо разъединять трубопроводы и рукава, производить другие разборки узлов и агрегатов. Метод широко используется в Беларуси и за рубежом.

Метод амплитудно-фазовых характеристик реализуется с использованием встроенных или накладных датчиков и базируется на анализе волновых процессов изменения давления в напорных жидкостных магистралях при нагружении рабочего органа и соответственно в сливной – при дросселировании рабочей жидкости. Метод широко используется для общей оценки работоспособности объекта с высокой степенью жесткости в нагнетательной магистрали и локализации неисправности.

Временной метод основан на измерении параметров движения объекта или его рабочего органа в условиях нормированных режимов нагружения. Используется при оценке работоспособности гидропривода в целом. Так, время подъема ковша погрузчика от минимального до максимального значения при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания (ДВС) характеризует работоспособность гидравлической системы привода рабочего оборудования, а продолжительность перемещения управляемых колес из одного крайнего положения в другое – работоспособность гидропривода рулевого управления. К достоинствам метода относится возможность использования простых средств измерения, не требующих установки датчиков, но добиться нужной точности затруднительно из-за необходимости повторения требуемого режима контроля.

Силовой метод основан на определении диагностических параметров через усилия на рабочем органе, движителе или тяговом крюке. Работоспособность объекта в целом оценивается в режимах, приближенных к реальным, но для реализации метода требуются специальные нагрузочные средства.

Метод переходных характеристик базируется на анализе явлений, протекающих при неустановившихся режимах работы объекта. Этот метод широко используется для проверки герметичности пневмо- и гидросистем. Создают тестовое давление, и при отключении подачи воздуха или рабочей жидкости оценивают работоспособность соответствующих элементов по времени падения давления в диагностируемой части системы.

Перспективен этот метод при оценке технического состояния гидропривода на основании характера волновых процессов, протекающих в системе при перекрытии потока рабочей жидкости. Метод обладает высокой информативностью и может быть реализован с помощью накладных и встроенных датчиков, однако расшифровка волновых диаграмм весьма сложна и требует специального оборудования.

Виброакустический метод основан на анализе параметров вибрации и шума. Работа механической сборочной единицы может сопровождаться виброударными процессами и (или) акустическим шумом. Например, в сопряжениях плунжерных пар топливных насосов высокого давления, форсунок, клапанов газораспределительного механизма и гидропривода, подшипников кривошипно-шатунного механизма в процессе эксплуатации нарушаются запроектированные кинематические связи между деталями, вследствие чего характер вибрации и шума изменяется и они существенно усиливаются. Это свойство используется при диагностировании объекта по изменению амплитуд, форме, фазе, длительности и коэффициенту вариации вибросигналов.

Сигналы, исходящие от работающих механизмов, носят импульсный характер, а их амплитуда достаточно точно характеризует состояние кинематической пары. Большое значение имеет правильный выбор амплитудно-частотных характеристик и чувствительности первичных преобразователей. Пьезоэлектрические датчики с учетом применения компьютерных технологий дают хорошие результаты. Этот метод перспективен, обладает высокой информативностью, однако отделить полезные сигналы от помех, создаваемых различными сопряжениями контролируемой системы, затруднительно.

Тепловой метод основан на оценке распределения температуры на поверхностях сборочных единиц, а также разности температур рабочей жидкости на входе и выходе. Характерные точки контроля выбирают исходя из конструктивных особенностей элементов и расположения в них областей генерации тепла. Метод универсален и может быть реализован при помощи накладных, встроенных и дистанционных датчиков.

Однако измерение разности температур поверхности элемента с приемлемой для практики точностью, трудоемкостью и продолжительностью возможно лишь при использовании специальных высокочувствительных датчиков со стабильной линейной характеристикой. Для сокращения продолжительности и повышения точности измерения накладные и встроенные датчики должны иметь как можно меньшую площадь и массу, что позволяет не искажать тепловое поле объектов контроля.

Метод анализа состояния TCM и рабочей жидкости основан на определении их свойств и состава вредных примесей. В связи с низкой трудоемкостью, высокой информативностью и возможностью вести обработку взятых проб в лабораторных условиях метод перспективен, но имеются трудности в выявлении неисправных элементов. При работе любой сборочной единицы происходит изнашивание поверхностей сопрягаемых деталей, его интенсивность оценивается количеством частиц металла. Зная химический состав трущихся деталей, можно проследить за динамикой потери их работоспособности.

Радиационный метод основан на изменении интенсивности излучения, проходящего через объект диагностирования, и предполагает наличие источника ионизирующего излучения и детектора, регистрирующего диагностируемую информацию. Метод позволяет получать достоверную информацию об изнашивании отдельных деталей при вводе в них радиационных вставок, однако требует специализированного оборудования.

Электрический метод заключается в непосредственном измерении электрических параметров (напряжения, силы тока, сопротивления, электрической мощности). Метод используется при оценке работоспособности электрических приводов и бортового электрооборудования машин.

При *нефелометрическом методе* сравнивают интенсивность двух световых потоков: рассеянного эталонной жидкостью, не содержащей загрязнений, и жидкостью того же типа, взятой из емкости работающего объекта. Интенсивность рассеянного света пропорциональна концентрации загрязняющих жидкость частиц и зависит от их оптических свойств, углов падения и рассеивания света. Имеются также приборы, позволяющие анализировать рабочие жидкости непосредственно в потоке. Действие этих приборов основано на определении с помощью фотоэлектрического датчика числа и размеров частиц, проходящих вместе с жидкостью через калиброванную щель, которая имеет по бокам прозрачные окна. При проходе каждой частицы загрязнений происходит частичное затемнение фотодиода, в результате

на выходе схемы образуются импульсы, амплитуда и частота которых соответствуют размеру и количеству проходящих частиц.

Приведенные методы можно объединить в группы по контролируемым параметрам, первичным преобразователям, способам нагружения объектов диагностирования и т. д.

Диагностирование машин, проводимое с использованием внешних и встроенных средств контроля, позволяет определять техническое состояние агрегатов, механизмов и систем машины без их разборки, прогнозировать сроки службы узлов, фактически управлять их техническим состоянием, назначая соответствующие предупредительные работы и выполняя их в процессе ТО и ремонта. Это снижает время простоя машин, обеспечивает значительную экономию средств на их обслуживание и ремонт. Выполнение только действительно необходимых операций по ремонту и регулированию сокращает расход запасных частей и топливо-смазочных материалов. Так, своевременное обнаружение и устранение значительных неисправностей в системах питания или зажигания двигателя, агрегатов трансмиссии или ходовой части улучшает на 5–10 % топливно-экономические показатели, увеличивает мощность двигателя, в 2–3 раза улучшает экологические показатели, повышает безопасность эксплуатации машин.

Результаты диагностирования могут быть использованы для решения следующих задач: определения и устранения причин, вызывающих отказы и разрушение сборочных единиц или аварийные износы деталей; предсказания процессов изнашивания деталей и установления вероятного времени наступления отказа машины на основе их анализа; разработки планов-графиков ТО и ремонта машин.

Техническое диагностирование обеспечивает возможность интенсивно использования техники. Предупреждение отказов, оперативное их устранение резко снижают простои машин по техническим причинам, увеличивают их производительность и качество выполнения сельскохозяйственных операций, что положительно сказывается на сроках выполнения работ, способствует получению дополнительной прибыли сельскими товаропроизводителями.

Диагностирование машин и оборудования применяется практически при всех видах ТО и ремонта. Кроме традиционных работ (периодические ТО, текущий и капитальный ремонты, хранение машин) в последнее время диагностирование нашло применение при досборке машин в процессе предпродажного обслуживания,

сертификации сервисных работ, техосмотре, оценке стоимости при приобретении и продаже подержанных машин и агрегатов.

Основные задачи технического диагностирования:

- проверка исправности (работоспособности) машин или их составных частей;

- поиск дефектов с установленной глубиной поиска;

- сбор исходных данных для прогнозирования остаточного ресурса составных частей;

- выдача рекомендаций по результатам диагностирования о виде, объеме, месте и сроке ремонтно-обслуживающих работ.

Техническое диагностирование можно выполнять основными методами: статистическим, граничных испытаний, инструментальным и органолептическим по качественным признакам.

При *статистическом методе* моменты отказа прогнозируют на основе обработки результатов достаточно полной и математически обоснованной информации об отказах как элементов, так и самих машин.

Точность прогнозирования момента отказа для отдельно взятой машины невелика, но для большой группы машин она достаточна, что позволяет закладывать ее в основу составления графиков ППР.

Метод граничных испытаний, основанный на определении прогнозирующих параметров машины или ее элементов в условиях ускоренных (ужесточенных) испытаний, позволяет с достаточной точностью и быстротой устанавливать слабые элементы и типовые дефекты, тем самым существенно дополняя данные статистического метода.

Инструментальный метод, базирующийся на применении диагностирующей аппаратуры, обеспечивает необходимую корректировку данных, полученных первыми двумя методами, за счет установления реального технического состояния машины и его изменения в конкретных условиях эксплуатации. Из применяемых при методе многочисленных способов общего диагностирования применяют механический и акустический способы, с помощью которых возможна приблизительная оценка технического состояния машины.

Диагностирование подразделяют на регламентное и заявочное. *Регламентное* проводят при периодическом ТО и перед плановым ремонтом, *заявочное* – при появлении признаков неисправностей перед текущим ремонтом.

Цель регламентного диагностирования – определение технического состояния, остаточного ресурса соединений, узлов и агрегатов,

их потребности в регулировании, замене или ремонте. Цель заявочного – выявление и устранение неисправностей, предупреждение отказов и устранение их последствий.

В зависимости от количества диагностируемых машин рекомендуется использовать следующие средства диагностирования [76, 107, 116]:

– до 20 машин – переносной комплект (участок диагностирования может отсутствовать);

– 20–80 – стационарный комплект, состоящий преимущественно из механических средств диагностирования;

– 80–120 – стационарный комплект, состоящий из механических и электронных приборов;

– 120–400 – стационарный комплект с преимущественно электронными средствами диагностирования;

– 400–800 – стационарный комплект с автоматизированной системой диагностирования.

Классификация диагностических комплектов в зависимости от числа диагностируемых машин обусловлена их пропускной способностью. При плановом диагностировании машин с помощью в основном механических средств удельная трудоемкость проверки их технического состояния без ежесменного технического обслуживания (ЕТО) составляет 40–60 % от трудоемкости ТО. Применение электронных средств диагностирования уменьшает трудоемкость в 2–2,5 раза, автоматизированных систем диагностирования – в 5 раз. Такое же сокращение трудоемкости наблюдается и при заявочном диагностировании (поиске неисправностей).

В последнее время возможно более интенсивное применение приборов для контроля экологических параметров отработавших газов (ОГ) дизелей и бензиновых ДВС, что связано с ужесточением требований к уменьшению концентрации токсичных веществ в ОГ ДВС.

Чтобы снизить трудоемкость диагностирования, проверку технического состояния машины выполняют в соответствии с диагностической картой. Форма карты предварительно печатается или вызывается на экран компьютера и в дальнейшем служит основным документом для проведения ремонтно-обслуживающих работ.

Поэлементные операции регламентного и заявочного диагностирования выполняют согласно технологическим картам, в которых приводятся сведения о детальной последовательности и периодичности выполнения контрольно-диагностических операций, применяемых

при этом диагностических приборах, датчиках, приспособлениях, технических требованиях по выполнению операций, значениях диагностических параметров (номинальном, допускаемом, предельном), а также режимных параметров машины при контроле ее состояния, в следующей последовательности:

1. Проведение мастером-диагностом опроса оператора о работе механизмов и систем машины при ее подготовке к диагностированию, внешнего осмотра машины, анализа документов о работе машины в прошлом. Слесарь-диагност в это время занимается подготовкой машины к диагностированию, очисткой мест присоединения приборов переходных устройств с датчиками, проверкой креплений, которые могут повлиять на результаты диагностирования, при необходимости – дозаправкой машины охлаждающей жидкостью, маслом, прогревом механизмов и систем машины, устранением мелких неисправностей. После этого слесарь-диагност устанавливает приборы и переходные устройства с датчиками на машину для проверки ее обобщенных, а затем частных параметров состояния, измеряет диагностические параметры машины (водитель находится в кабине и по команде мастера-диагноста управляет работой агрегатов и систем машины, выдерживая в заданных интервалах режимные параметры ее состояния: скоростные, температурные, нагрузочные).

2. Проведение мастером-диагностом диагностирования: измерение и регистрация значений параметров, анализ и сравнение их с допускаемыми значениями, при необходимости – выполнение регулировочных операций, доведение по показаниям приборов значений параметров до номинальных величин. С учетом появляющихся дополнительных признаков неисправностей или другой информации мастер-диагност уточняет маршрут диагностирования на основании постоянно получаемых новых сведений о состоянии машины.

3. Завершение оформления мастером-диагностом на заключительном этапе диагностической карты от руки или на экране компьютера, составление заключения о состоянии механизмов и систем, при необходимости – прогноз остаточного ресурса составных частей и машины в целом, установление номенклатуры необходимых ремонтно-обслуживающих операций, восстанавливающих работоспособность машины или предупреждающих ее отказы.

4. Снятие с машины диагностических средств, очистка их от масла и топлива, установка на места хранения, подготовка к диагностированию следующей машины.

5. Установка оператором вместе со слесарем-диагностом на место снятых при диагностировании деталей, проверка состояния машины и перегон ее на следующий пост ТО и ремонта.

Техническое состояние объекта можно определить посредством контроля его параметров и характеристик либо посредством оценки качества выполняемых им функций. При этом параметр – физическая или математическая величина, характеризующая состояние элемента или объекта, а характеристика – зависимость одного параметра от другого или от времени.

Процесс определения действительного состояния объекта должен осуществляться по обоснованной программе и алгоритмам диагностирования.

Алгоритмы диагностирования разрабатываются на основе диагностических моделей, которые представляют собой аналитические описания или графоаналитические представления основных свойств технических объектов как объектов диагностирования, выраженные в виде математических и физических законов, процессов, логических соотношений, диаграмм записываемых сигналов. Диагностическая модель предусматривает формулировку условий работоспособности и неработоспособного состояния, наличие критериев оценки степени работоспособности и установление признаков и причин возникших неисправностей.

На основе диагностической модели разрабатываются алгоритмы диагностирования – совокупность операций, выполняемых в определенной последовательности с целью решения конкретной диагностической задачи. Получаемые в результате измерений (записей) средствами диагностики диагностические сигналы (признаки, параметры) могут быть разбиты на три группы: повреждения, выходные параметры, косвенные признаки, которым соответствуют три метода диагностирования.

2. СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ МАШИН

2.1. Система технического обслуживания и ремонта машин

Под *эксплуатацией машин и оборудования* понимают стадию их жизненного цикла, на которой реализуется, поддерживается и восстанавливается их качество. *Производственная эксплуатация* охватывает использование машины по назначению и процессы, сопровождающие непосредственное использование техники, а *техническая* – вопросы поддержания машин в работоспособном состоянии.

Техническая эксплуатация машин как наука определяет пути и методы наиболее эффективного управления техническим состоянием машин в целях их высокопроизводительной и надежной работы при оптимальных материальных и трудовых затратах.

Техническая эксплуатация машин как область практической деятельности – комплекс технических, экономических, организационных и других мероприятий, обеспечивающих поддержание машин в работоспособном, исправном состоянии, предупреждение их простоев из-за технических неисправностей [57].

Техническая эксплуатация включает в себя следующие *этапы использования*: предпродажное обслуживание; обкатка машин; заправка топливом; транспортирование машины или комплексов машин перед, в период и после работы; гарантийное обслуживание (ремонт); ресурсное диагностирование; ТО и ремонт; консервация и хранение машин; ремонт, модернизация подержанной техники для продажи; разборка после списания машины (составной части) с утилизацией непригодных, с использованием оставшихся частей.

Неотъемлемой частью системы является *система ТО и ремонта машин* – совокупность взаимосвязанных работ, материальных и финансовых средств, документации ТО и ремонта и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления качества машин.

В сельском хозяйстве Республики Беларусь сложилась ППС ТО и ремонта, которая распространяется на все виды сельскохозяйственной техники: необходимый уровень надежности машин и механизмов поддерживается в течение всего срока службы комплексом профилактических воздействий и текущих ремонтов. Полное же восстановление технического ресурса достигается капитальным ремонтом полнокомплектных машин и их составных частей.

Техническая и организационная основа ППС – *принудительное выполнение операций* ТО машин и осуществление ремонтных работ по мере возникновения в этом реальной необходимости.

Основными элементами системы ТО и ремонта тракторов и самоходных шасси, другой сельскохозяйственной техники являются: ТО при подготовке к эксплуатационной обкатке, во время нее и по ее окончании; ежесменное техническое обслуживание (ЕТО); первое техническое обслуживание (ТО-1); второе (ТО-2); третье (ТО-3); сезонное ТО при переходе к весенне-летнему периоду эксплуатации (ТО-ВЛ) и к осенне-зимнему периоду (ТО-ОЗ); текущий и капитальный ремонты.

Для тракторов, работающих на песчаных, каменистых и болотистых почвах, при низких температурах и в условиях радиоактивного заражения, проводится специальное ТО, рассчитанное на эти условия. Виды ТО машин приведены в табл. 2.1.

ТО при обкатке машин производится в условиях хозяйств, эксплуатирующих машины, с целью оптимальной приработки составных частей и доведения их до состояния, обеспечивающего дальнейший естественный износ.

Ежесменное техническое обслуживание (ЕТО) предусматривает проверку технического состояния машины в начале или по окончании рабочей смены (проведение очистительно-моечных, контрольно-регулирующих и смазочно-заправочных работ). ЕТО проводят по месту работы машины или в специальных помещениях силами обслуживающего персонала, за которыми они закреплены.

Периодическое техническое обслуживание (ТО-1, ТО-2, ТО-3) проводят через определенный интервал времени или наработки машиной заданного объема работ (выполнение очистительно-моечных, диагностических, крепежных, регулировочных и смазочно-заправочных операций).

Сезонное техническое обслуживание для машин, работающих в течение года, проводят два раза. При переходе на весенне-летний период эксплуатации ТО-ВЛ проводят при установившейся среднесуточной температуре окружающего воздуха выше 5 °С; при переходе на осенне-зимнюю эксплуатацию ТО-ОЗ проводят, если установившаяся температура ниже 5 °С. ТО машин, которые работают сезонно, проводят перед началом сезонных работ. Цель всех видов ТО – обеспечение должных условий эксплуатации или хранения машин путем проведения очистительно-моечных, контрольно-осмотровых, крепежных, регулировочных и смазочно-заправочных операций. Сезонное обслуживание обычно совмещают с очередным периодическим обслуживанием.

Таблица 2.1

Техническое обслуживание машин

Вид ТО	Тракторы и самоходные шасси	Автомобили	Комбайны, сложные самоходные и прицепные машины, сложные стационарные машины по обработке сельскохозяйственных культур	Посевные и посадочные машины, жатки и подборщики, машины по защите растений и внесению удобрений	Почвообрабатывающие машины, прицепы и тележки; транспортеры, простые стационарные машины по обработке сельскохозяйственных культур
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
При эксплуатационной обкатке	+	+	+	+	+
Ежесменное	+	+	+	+	+
Первое	+	+	+	+	—
Второе	+	+	+	—	—
Третье	+	—	—	—	—
Сезонное:					
при переходе к весенне-летнему периоду эксплуатации	+	+	—	—	—
при переходе к осенне-зимнему периоду эксплуатации	+	+	—	—	—
Перед началом сезона	—	—	+	+	+
Для особых условий эксплуатации (на песчаных, каменистых	+	—	—	—	—

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
и болотистых почвах, при низких температурах и в условиях радиоактивного заражения)					
При подготовке к кратковременному хранению	+	-	-	-	-
При подготовке к длительному хранению	+	+	+	+	+
В процессе длительного хранения	+	+	+	+	+
При снятии с длительного хранения	+	+	+	+	+

В соответствии с ГОСТ 18322–78 ремонт – комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности изделий или их составных частей.

В зависимости от конструктивной сложности машин и характера возникающих при их работе неисправностей выполняется два вида ремонта: текущий и капитальный. Для простых сельскохозяйственных машин предусматривается проведение только текущего ремонта.

Текущий ремонт (ТР) – наиболее распространенный вид ремонта, направленный на обеспечение или восстановление работоспособности машин. ТР проводится с целью устранения возникающих отказов и неисправностей заявочно, а также в плановом порядке по результатам диагностирования. ТР включает в себя все операции, входящие в периодическое ТО, а также работы по частичной разборке машины с заменой отдельных составных частей новыми или восстановленными. В процессе последующей сборки машины производится регулировка механизмов, обкатка и подкраска с восстановлением внешнего вида.

Содержание текущего ремонта должно устанавливаться на основании оценки технического состояния машины в эксплуатационной ситуации.

Текущий ремонт предупредительного характера преимущественно совмещается с ТО определенного вида, установленным для машин данной марки, а устранение отказов производится непосредственно после их обнаружения. При текущем ремонте агрегаты (узлы), требующие капитального ремонта, заменяют на отремонтированные или новые. Выполнение и планирование текущих ремонтов организуют с учетом конструктивных особенностей машин и условий их работы.

Текущий ремонт тракторов состоит из непланового (заявочного) ремонта, связанного с устранением неисправностей и проведением предупредительных работ, необходимость которых устанавливается в процессе использования или при ТО, и планового ремонта, который проводится по результатам ресурсного диагностирования.

Текущий ремонт комбайнов бывает плановым, выполняемым после сезона уборки, и неплановым (заявочным) – по устранению неисправностей и отказов машин, возникающих при их работе. Объем и состав ремонтных работ при плановом текущем ремонте уточняют диагностированием. Необходимость в неплановом текущем ремонте обычно устанавливают при ЕТО и ТО-1. Трудовые и денежные затраты на выполнение текущих ремонтов нормируют суммарно.

Текущий ремонт автомобилей осуществляется путем устранения неисправностей и отказов, возникающих при работе автомобилей, не регламентируется пробегом и выполняется для обеспечения работоспособного состояния до очередного ТО. При текущем ремонте производится замена отдельных составных частей агрегатов, исчерпавших свой ресурс. Текущий ремонт автомобилей планируют по удельным затратам (трудовым и денежным) на 1 тыс. км пробега.

Текущий ремонт оборудования животноводческих ферм и комплексов – основной вид ремонта, а основным методом выполнения ремонтных работ служит агрегатный метод. Машины, как правило, ремонтируют на месте их использования, а агрегаты и узлы в зависимости от сложности ремонтных работ – на соответствующих ремонтных подразделениях хозяйств, районных и областных предприятиях. Для сокращения сроков ремонта создается обменный фонд составных частей машин. Необходимость текущего ремонта устанавливается при проведении ТО оборудования с использованием средств технической диагностики.

Текущий ремонт сельскохозяйственных машин, использование которых носит сезонный характер, выполняют в плановом порядке до или после сезона работ. Внеплановый ремонт – заявочный текущий ремонт в процессе эксплуатации машин при возникновении случайных отказов или неисправностей.

Капитальный ремонт (КР) – наиболее трудоемкий и материалоемкий вид ремонта, предусматривающий единовременное восстановление исходных параметров машин путем замены или восстановления их частей, включая базовые, и направленный на восстановление исправности и полного или близкого к полному ресурса машин.

Потребность машин и их составных частей в капитальном ремонте определяют по техническому и экономическому критериям. *Технический* устанавливает потребность в проведении капитального ремонта при износе базовых деталей и нарушении размерных цепей, вызывающих форсированное изнашивание как оставшихся, так и вновь вводимых элементов. *Экономический* определяет оптимальную периодичность постановки объекта в капитальный ремонт, при котором будет обеспечен минимум затрат на единицу наработки машины за срок ее службы.

Капитальный ремонт планируют как по срокам, так и по объемам работ. Для современных машин, используемых в сельском хозяйстве, полнокомплектный капитальный ремонт проводится, как

правило, один раз за срок их службы. Качество капитального ремонта машины и всех ее составных частей должно обеспечивать уровень восстановления характеристик надежности, включая ресурс, не менее 80 % от исходных характеристик нового изделия.

В основу формирования системы ТО и ремонта машин в сельском хозяйстве положены исследования, проводимые учеными ГОСНИТИ, аграрных вузов, НИИ и вузов автотранспорта. Начиная с 50-х гг. XX в. создавалась нормативно-техническая документация ППС ТО и ремонта машинно-тракторного парка (МТП) и автотранспорта. В середине 60-х гг. работами известных советских ученых А. И. Селиванова, С. С. Черепанова, Е. С. Кузнецова, В. М. Михлина и многих других эта система стала дополняться мероприятиями более прогрессивной системы обслуживания и ремонта по фактическому состоянию. Несколько позже эта система с контролем и корректировкой уровня надежности машин стала развиваться и за рубежом под названием *condition monitoring*. По мере оснащения отраслей соответствующим оборудованием обслуживание по фактическому состоянию стало внедряться в систему ТО и ремонта многих отраслей промышленности и АПК.

Развиваясь, ППС ТО и ремонта МТП АПК под условным названием «Торсельхоз» использовала наиболее эффективные способы управления техническим состоянием и надежностью машин с применением средств контроля (отражена в работах профессора В. М. Михлина [76, 116]). В регламентный контроль технического состояния машин по установленной периодичности (ГОСТ 20793) органически встраивался порядок и содержание конкретных работ обслуживания и ремонта в соответствии с техническим состоянием, определяемым методами и средствами диагностики.

На первоначальном этапе развития системы опыт передовых служб диагностики МТП 60-х гг., по данным профессора ЛСХИ Н. С. Ждановского, показал, что квалифицированное и планомерное диагностирование способствует значительному повышению срока службы автотракторных ДВС, вплоть до 2–2,5 раз [30, 35]. Выявление и устранение неисправностей и разрегулировок, предупреждение серьезных неисправностей машин позволяют уменьшить затраты на их ремонт и использование, уменьшить расход ТСМ, значительно повысить производительность МТП.

Практика эксплуатации МТП АПК в 60-е гг., по данным ЛСХИ, НАТИ и ГОСНИТИ, показала, что без диагностирования машин

низка культура их эксплуатации и имеют место следующие ее недостатки:

- средний срок службы тракторов составлял 6–7 лет вместо 8 нормативных;

- около 50,0 % тракторных дизелей поступали в ремонт с износом основных сопряжений лишь 30–60 % от предельного;

- более половины тракторных дизелей не обеспечивали нормативной мощности на 15–20 %, работали с ухудшенной на 10–15 % топливной экономичностью;

- значительная доля дизелей работала с форсированным износом.

Практический опыт внедрения диагностирования МТП в хозяйства Ленинградской области показал [30, 35]:

- затраты на проведение текущих ремонтов тракторов снижались на 25–30 %;

- экономия дизельного топлива составляла до 20 %;

- межремонтная наработка тракторов увеличивалась на 23–25 %;

- количество тракторов, направляемых в капитальный ремонт, сокращалось на 27–29 %.

Как показал опыт, накопленный в странах бывшего СССР и за рубежом, диагностирование – важнейшее условие нормального использования машин и оборудования. Актуальность и эффективность диагностирования возрастает для более сложных и мощных машин при разработке методов контроля, основанных на современных достижениях науки и техники.

2.2. Этапы разработки методов и средств технической диагностики

Основополагающий вклад в разработку методов и создание средств диагностирования МТП АПК внесла большая группа выдающихся ученых, среди которых доктора технических наук, профессора: Н. С. Ждановский, А. В. Николаенко, В. М. Михлин, В. А. Аллилуев, Г. С. Игнатьев, Б. В. Павлов, В. А. Змановский, И. П. Терских, В. М. Лившиц, И. П. Добролюбов, Б. А. Улитовский, А. В. Дунаев и др.

В ГОСНИТИ комплекс переносных, передвижных и стационарных средств диагностирования на государственном уровне создал заведующий лабораторией диагностики профессор В. М. Михлин, а развитием их руководил его последователь – доктор технических наук К. Ю. Скибневский.

В. М. Михлиным разработано основополагающее учение об управлении надежностью машин, включающее прогнозирование технического состояния и оптимизацию значений диагностических параметров [76, 116].

Экспериментальная проверка положений и нормативов системы управления техническим состоянием машин на примере тракторов МТЗ-80/82 была осуществлена сотрудниками отраслевой научно-исследовательской лаборатории Госкомсельхозтехники БССР при кафедре ремонта машин БИМСХ (БГАТУ) кандидатами технических наук А. П. Буховцом, В. П. Миклушем и другими под руководством доктора технических наук, профессора В. П. Сулова.

Под руководством профессора В. М. Михлина и кандидата технических наук В. И. Бельских методы и средства диагностирования в ГОСНИТИ разрабатывали кандидаты наук В. В. Подкопаев, И. Г. Дынга, В. Н. Власенко, П. Ш. Петросян, В. И. Соловьев, А. В. Дунаев, В. А. Чечет, П. М. Черейский, В. А. Мачнев, И. Ф. Белый, В. И. Беляев, А. А. Першин и др.

Активно велась разработка средств технической диагностики и в некоторых филиалах ГОСНИТИ: в Украинском (диагностические автоматизированные комплексы «Урожай-1А» и «Урожай-1Т»), Малоярославецком, Сибирском, Целинном, Береговском, Тартуском, Ивано-Франковском.

Технологию диагностирования тракторных и комбайновых дизелей и нормативы их параметров вместе с лабораторией № 24 ГОСНИТИ обосновывали специалисты Харьковского ГСКБД, Минского тракторного завода, Ярославского моторного завода, Алтайского, Волгоградского, Владимирского, Кишиневского, Челябинского, Чебоксарского тракторных заводов, а также ПО «ЮМЗ», ПО «КамАЗ», НИКТИД, НАТИ и ВИМ.

В создании и реализации средств технической диагностики (СТД) принимали активное участие конструкторы СКБ Минавтотранса РСФСР, СКБ завода «ГАРО», Рижского СКБ «Диагностика», СКБ «Камертон» (Минск).

Ряд простых для комбайнов и автотракторных дизелей СТД разработан в Целинном, Казахстанском, Сибирском, Ивано-Франковском, Малоярославецком филиалах ЦОКТЬ ГОСНИТИ, а для хлопкоуборочных машин – в Среднеазиатском филиале ГОСНИТИ.

Во многих отраслях (авиация, автомобильный и железнодорожный транспорт, АПК) развивалось виброакустическое диагностирование по амплитудно-частотным характеристикам на оборудовании датской

фирмы «Брюль и Кьер» и на приборах шведской корпорации SKF. В СибВИМе школа профессора Б. В. Павлова развила корреляционный анализ вибрации. Но к 90-м гг. это направление сузилось до портативных цифровых виброметров с перестраиваемыми полосовыми фильтрами.

Тепловые методы диагностирования начали развиваться с появлением в конце 70-х гг. уникальных тепловизоров США и шведской фирмы AGA. Но из-за уникальности и дороговизны их применение было крайне ограниченным. В настоящее время имеется несколько импортных портативных аналогов и серия простых дистанционных инфракрасных термометров. Это направление реализуемо для топливной аппаратуры дизелей, газораспределительных механизмов (ГРМ), системы охлаждения, электрооборудования, гидроприводов, подшипниковых опор и узлов трения агрегатов шасси.

Следует отметить значительный вклад сотрудников ГОСНИТИ в разработку и поставку на производство серии барабанных стенов для диагностирования автомобилей и колесных тракторов, расходомеров топлива автотракторных ДВС и других средств.

В ГОСНИТИ и ЛСХИ разработано несколько методов оценки зазоров в подшипниках кривошипно-шатунного механизма, хотя к широкому применению они затруднительны. Альтернатива – виброметры, стетоскопы и органолептика.

Контроль мощностных и топливных показателей тракторных и комбайновых дизелей был прерогативой НАТИ (ГОСТ 18509), но для диагностики бестормозным методом стали решающими портативные индикаторы ИМД-2, ИМД-Ц, ИМД-ЦМ от СибИМЭ, а также метод контроля мощности и топливной экономичности автотракторных дизелей по значениям расхода топлива на холостом ходу, предложенный кандидатом технических наук В. И. Бельских [11], обоснованный и развитый профессором В. А. Чечетом [144].

Схемотехнические решения для средств автоматизированного диагностирования выполнила большая группа специалистов по схемотехнике, цифровым измерениям и алгоритмии: в Киевском СКБ им. Ястребова Минавиапрома Украины и УФ ГОСНИТИ (комплексы «Урожай-1А» и «Урожай-1Т»); в Ленинградском ВНИИЭП (комплексы К736, К738, К748); в Киевском ПО «Точ-электроприбор». Мотор-тестеры разрабатывало СКБ Новгородского завода «ГАРО», СКБ Брянского БЗТО, Минское СКБ «Камертон».

Серию исследовательских и диагностических комплексов разработала и продолжает совершенствовать австрийская фирма AVL. В настоящее время автоматизированное диагностирование осуществля-

ется с помощью встроенных блоков управления машинами, особенно по легковому автотранспорту и автосамосвалам Caterpillar, Unit Rig, Comatsy, ДСМ и тракторов США, других европейских фирм. В России и других странах СНГ это направление для сельскохозяйственной техники до настоящего времени не получило должного развития.

В военно-промышленном комплексе имеются высокотехнологичные разработки с компьютерными программами измерений инфракрасными, голографическими, термодинамическими, виброакустическими, магнитными, ультразвуковыми и комбинированными методами с пространственным и объемным отображением зоны контроля. Эти достижения перспективны и для гражданской техники.

Значительный вклад в развитие методов диагностирования ДВС по спектральным параметрам масел внесли работы В. В. Чанкина, Э. А. Пахомова, С. К. Кюрегяна, специалистов ПО «ЛОМО», ЦНИИ МПС и ЦНИДИ, сотрудников НАМИ (М. А. Григорьев, Б. М. Бунаков, А. Н. Первушин и др.), ученых ГОСНИТИ (П. Ш. Петросян, К. Ю. Скибневский), ЛСХИ (Н. С. Ждановский, А. В. Николаенко и др.), специалистов ГосНИИ ГА, МАДИ (А. П. Болдин и др.).

В химмотологическом контроле пионерами являются ученые ГосНИИ-25 (К. К. Папок, Е. В. Зусева и др.), ВНИИ НП (В. Д. Резников, Э. Н. Шипулина, О. Н. Цветков), РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина (Г. И. Фукс, И. Г. Фукс, А. А. Гуреев, В. Л. Лашхи), автотранспорта (С. В. Венцель, В. А. Зорин), ЦНИИ МФ (Г. Ш. Розенберг и др.), АПК (Н. И. Итинская, А. В. Кузнецов, М. А. Кульчев, Н. С. Пасечников, Н. М. Хмелевой, В. В. Остриков, А. В. Неподгодьев, А. П. Быстрицкая и др.).

В создание нетрадиционной триботехники значительный вклад внесли ученые и специалисты: доктор технических наук Д. Н. Гаркунов, член-корреспондент, доктор технических наук В. И. Ревнивцев, кандидат технических наук Т. Л. Маринич и др.

В разработку нового направления «безразборный ремонт» и его реализации применительно к МТП в сельском хозяйстве и автомобильном транспорте, в создание трибосоставов значительный вклад внесли работы В. И. Балабанова, И. Ф. Белого, А. В. Ващенко, А. А. Гвоздева, А. В. Дунаева, В. Н. Дураджи, Э. Л. Мельникова, А. К. Ольховацкого, В. В. Острикова, О. Г. Павлова, В. В. Полякова, В. В. Сафонова, В. В. Стрельцова, А. Ю. Шабанова, В. А. Чечета и др.

В исследования проблемы «ресурсосбережение при технической эксплуатации МТП» большой вклад внесли работы доктора технических наук, профессора Е. А. Пучина.

Исследования и разработки, выполненные на постсоветском пространстве и за рубежом до 1970 г., послужили фундаментом для создания барабанных стендов, предназначенных для диагностирования энергонасыщенных колесных тракторов, расходомеров топлива, развития средств диагностирования цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) ДВС, а с 80-х гг. – для разработки автоматизированного машинотестера, химмотологического, спектрального и экспресс-контроля масел, нетрадиционной триботехники безразборного ремонта агрегатов МТП АПК.

2.3. Виды диагностирования и параметры технического состояния машин

Техническое диагностирование использует методы и средства, воспринимающие диагностические сигналы, излучаемые механизмами, недоступные восприятию непосредственно органами чувств человека и тем самым дающие возможность объективно определять состояние машин.

Для разработки этих методов и средств прежде всего следует выявить, какие параметры характеризуют работу проверяемой машины и обуславливают ее надежность, а затем установить критерии количественной величины параметров.

Техническое диагностирование классифицируется в зависимости от условий его проведения:

– *на работающем объекте*: по параметрам рабочих процессов (мощность, расход топлива, производительность, давление и др.); по диагностическим параметрам, косвенно характеризующим техническое состояние (температура, шум, вибрации и т. д.);

– *на неработающем объекте*: по структурным параметрам (износ деталей, зазор в сопряжениях и т. п.).

По объему, методам и глубине операций оно может быть комплексным (общим) и поэлементным.

Комплексное диагностирование выявляет нормальное функционирование, эффективность, работоспособность машины (агрегата) в целом. Цель его – определить соответствие нормам выходных эксплуатационных показателей проверяемых агрегатов по их основным функциям. Пример такого диагностирования – определение мощности и топливной экономичности двигателя, подачи и долговечности насоса, потерь в трансмиссии, процента буксования сцепления и т. д.

Поэлементное диагностирование определяет причину нарушения работы агрегатов (механизмов) обычно по сопутствующим косвенным признакам. Например, причину потерь мощности двигателя – по компрессии или прорыву газов в картер; повышенного расхода

топлива – по неисправностям форсунок; повышенных потерь в трансмиссии – по угловым и линейным зазорам, смещениям деталей, вибрации и нагреву и т. д. Однако в этом случае конкретизация причин неисправностей доводится лишь до такого уровня, при котором выявляется потребность снятия или разборки проверяемого узла, механизма.

Диагностирование, как правило, проводят на нескольких уровнях: на уровне машины в целом; ее агрегатов; систем, механизмов и деталей и др. На каждом из перечисленных уровней определяют техническое состояние, главным образом двумерно. Это означает, что диагностирование должно дать однозначный ответ: нуждается или не нуждается в настоящее время проверяемый объект в ремонте или ТО с учетом обеспечения безотказной работы до очередного планового технического воздействия. Если техническое состояние проверяемого объекта не соответствует нормам и он состоит из нескольких самостоятельных механизмов, то необходимо поэлементное диагностирование каждого из составных частей объекта.

При поэлементном диагностировании в первую очередь проверяют механическое состояние так называемых критических деталей, т. е. деталей, которые в первую очередь определяют работоспособность объекта.

Глубина диагностирования объектов ограничивается получением ответа на вопрос, необходима ли их разборка. Если необходима, то дальнейшее диагностирование, более детальное, не имеет практического смысла, поскольку дефекты могут быть выявлены более просто и точно после разборки объектов.

Диагностирование в общенаучном определении – процесс распознавания состояния исследуемого объекта. Определение состояния и прогнозирование естественной его динамики или динамики с учетом планируемых воздействий являются неотъемлемыми атрибутами процесса управления любыми объектами и системами. Это же относится к диагностированию технического состояния машин и оборудования вообще и к МТП в АПК в частности.

Диагностирование основывается на всестороннем систематическом контроле инструментальных и органолептических параметров технического состояния объектов, а также показателей их эксплуатации. По этим данным проводится анализ соответствия значений параметров нормативам для требуемых условий эксплуатации, по взаимосвязям и совместному влиянию параметров составных частей объекта на его функциональные и ресурсные характеристики. А результатом диагностирования являются рекомендации по оптимизации

сроков, видов и объемов работ технического сервиса для обеспечения оптимальной надежности и эксплуатационного ресурса агрегатов МТП.

Измеряемые параметры технического состояния агрегатов МТП и автомобилей делятся на структурные и диагностические [30, 36].

Структурные параметры непосредственно обуславливают техническое состояние, надежность, работоспособность и ресурс составных частей (деталей, сборочных единиц, узлов, агрегатов) машин и оборудования (размеры, износы и показатели геометрии деталей, их взаимного расположения в узлах (зазоры, натяги), физико-механические свойства поверхностей и деталей, а также выходные функциональные характеристики агрегатов и машины в целом).

Структурные параметры делят на ресурсные, динамика в эксплуатации которых обуславливает надежность, работоспособность, экономичность, экологичность и эксплуатационный ресурс агрегатов и машин в целом, а также на функциональные, в т. ч. выходные.

К *ресурсным параметрам* относят, например, давление масел и рабочих жидкостей, зазоры в сопряжениях «поршень–кольца», «поршень–гильза цилиндра», «шейки коленчатого вала–его подшипники», «игла–корпус распылителя форсунки», радиальные зазоры в подшипниках качения, износ фрикционных деталей, зубьев шестерен, шлицев валов и т. п.

Функциональный параметр, значение которого превышает предельное, обуславливает утрату работоспособности или исправности составных частей машин. Его восстанавливают при ТО или ремонте. Функциональными параметрами могут являться выходные рабочие характеристики составных частей и машин в целом, интегрально характеризующие взаимосвязанную совокупность структурных параметров. К таким параметрам относят эффективную мощность ДВС, его удельный расход топлива, минимально-устойчивую частоту вращения коленчатого вала, моменты топливоподачи, моменты открытия клапанов газораспределения, подачу масляных и гидравлических насосов, давление открытия клапанов масло- и гидросистем, скорость движения, тяговую мощность трактора, его тормозные качества, давление в шинах, напряжение в работе агрегатов электрооборудования, показатели функционирования приборов световой и звуковой сигнализации, дымность ОГ.

Если структурный (ресурсный, функциональный) параметр в процессе диагностирования определяется непосредственно, то одновременно является и диагностическим.

Для достоверного определения технического состояния агрегатов машин, оценки выходных (интегральных), функциональных и ресурсных (дифференциальных) параметров механических узлов, гидравлических и электрических узлов используется в основном *система диагностических параметров*, которые косвенно характеризуют структурные:

- механические (сила, крутящий момент, давление);
- кинематические (скорость, частота вращения, частота повторения явлений, их амплитуда, моменты времени или фазы процессов, временная или фазовая длительность процессов);
- термодинамические (температура, ее динамика и дифференциация по поверхности деталей);
- гидродинамические (расход, количество, гидравлическое сопротивление и перепад давления);
- физико-химические (показатели содержания химических веществ в ОГ, химических элементов в смазочных материалах и топливах, структурные и функциональные показатели топливо-смазочных материалов);
- триботехнические (момент механических потерь и другие показатели интенсивности трения, скорости и интенсивности изнашивания).

Наиболее распространенные диагностические параметры тракторов и агрегатов – давление жидкостей, степень герметичности агрегатов, расход газов, топлива и масла, частота вращения, показатели виброударных процессов, линейные и угловые смещения, температура, а также мощность или угловое ускорение коленчатого вала, напряжение на приборах электрооборудования и др. Реализация всей системы диагностических и структурных параметров невозможна без соответствующей системы СТД.

Так как трудно, а порой невозможно и нецелесообразно использовать инструментально измеряемые диагностические параметры и соответствующие СТД, то при диагностировании издавна используется и арсенал качественных признаков технического состояния, которых зачастую вполне достаточно для определения неисправности или неработоспособности узлов и агрегатов машин и причин этого. Органолептически используют:

- вид, картину и расположение объекта (отклонения формы, цвета, наличие отложений и смещений и т. п.);
- звуковые характеристики шума и стуков (основная звуковая частота, тональность, тембр, громкость, постоянство, переменность,

прерывистость, импульсность, амплитудно-частотная характеристика и др.), место их происхождения и зависимость от режимов работы узлов, агрегатов;

- тактильные (осязательные) ощущения вибрации, смещений и поворотов;

- ощущения температуры и ее дифференциации по объекту, между однородными и неоднородными объектами;

- восприятие запаха веществ, особенно подвергаемых термохимическим воздействиям;

- оценку цвета ТСМ (светлый, белесый, темный, окрашенный, другие необычные) и ОГ (незаметный, бело-голубой, голубой, синий, серый, черный);

- выявление утечек масел, жидкостей по месту и интенсивности проявления;

- пропуски газов и паров;

- вид, массу и характер загрязнений масляных, воздушных и топливных фильтров;

- вид, массу и характер загрязнений емкостей масла, топлива, гидрожидкостей.

Иногда используют и такие косвенные диагностические параметры, которые вычисляются по статистическим данным эксплуатации машин: относительный расход топлива на единицу выполненной работы, относительный расход масел, часовая/сменная производительность, наработка на отказ составных частей агрегатов, трудоемкость устранения неисправностей и разрегулировок, суммарные затраты на ТО и т. п.

Ухудшение технического состояния работающих сопряжений, узлов и агрегатов машин – явление неизбежное, обусловленное воздействием эксплуатационных нагрузок, износами и разрегулировками, старением материалов деталей, масел и смазок, воздействием внешней среды. Интенсивность этих переменных процессов определяется конструктивно-технологическим качеством машин, условиями эксплуатации, качеством и своевременностью ТО и ТР машин.

Для всей совокупности численно определяемых значений диагностических параметров для оптимального проведения ТО и ТР требуется установить научно обоснованные нормативные значения, т. е. систему нормативов как структурных, так и диагностических параметров, включающую:

- номинальные значения при вводе машин в эксплуатацию, соответствующие функциональному, конструктивно-технологическому

назначению машин в конкретных новых или отремонтированных узлах, механизмах, агрегатах, машинах. Номинальные значения параметров ухудшаются и изменяются как в большую (по существенно положительным величинам, например износам), так и в меньшую сторону (мощность, крутящий момент, производительность, наработка на отказ и т. п.);

– допускаемые значения для работы объектов на межконтрольный период, соответствующие граничному состоянию узла, агрегата, при котором их работа в предстоящем межконтрольном периоде не обусловит постепенного отказа и не вызовет потери работоспособности, недопустимой неэкономичности или неэкологичности работы. Если при диагностировании выявлено значение контролируемого параметра в допустимом диапазоне, то объект контроля допускают к эксплуатации без работ ТО или ремонта;

– предельные значения параметров, соответствующие недопустимо неэкономичной, аварийной или экологически опасной эксплуатации; это наибольшие или наименьшие значения параметров в работавшем длительное время узле, агрегате машины или оборудовании.

Нужны и критериальные характеристики качественным признакам технического состояния, которые пока разработаны мало.

И номинальные, и предельные значения диагностических параметров не являются постоянными, однозначными величинами. При изготовлении и вводе в эксплуатацию машин номинальные значения их составных частей должны находиться в диапазонах, устанавливаемых производителем. Аварийные отказы узлов, агрегатов происходят при разных предельных значениях их ресурсных параметров, но примерно соответствующих значениям, вычисленным при исследованиях. Потеря же работоспособности узлов агрегатов при постепенном изнашивании их деталей также является постепенной, порой не поддающейся быстрой и однозначной оценке и может характеризоваться только технико-экономическими расчетами параметрического отказа.

В целом параметры состояния узлов и агрегатов делят на *прогнозируемые*, изменяющиеся постепенно (износы, разрегулировки), а потому вызывающие, как было принято называть ранее, постепенные отказы, и *непрогнозируемые*, вызывающие внезапные аварийные отказы (разрушения, прорывы, прогары, потеря герметичности, заклинивание, прекращение подачи масел и жидкостей, отказ рулевого управления, тормозов, гидро- и пневмоприводов,

выход из строя агрегатов электрооборудования, систем световой, звуковой сигнализации и освещения). В соответствии с этим отказы как явления, заключающиеся в нарушении работоспособности объектов из-за достижения параметром предельной для конкретных условий величины, классифицируются как:

– *постепенные отказы* – постепенное изменение величины параметра до предельного, заранее примерно известного значения; характеризуются порой очень медленным, но прогнозируемым, т. е. математически вычисляемым текущим значением параметра по мере наработки узла, агрегата;

– *внезапные отказы* – непредсказуемые события, обусловленные непредвиденным, не прогнозируемым в данных конкретных условиях проявлением изменения величины параметров до предельного значения.

Диагностирование МТП оперирует только постепенно изменяющимися параметрами (расход картерных газов, компрессия, вакуумные показатели ЦПГ, давление в главной масляной магистрали, давление других масел и топлив, зазоры в ГРМ и агрегатах силовой передачи, подачи насосов, эффективная мощность и расход топлива и т. п.), лишь частично учитывая качественные признаки технического состояния. При внезапных отказах выявляют их место (заклинивание в ДВС, отказы систем топливоподдачи, смазки и гидравлики, прорывы прокладок, отказы механических передач, рулевого управления и тормозов и т. п.), а также причину, методы устранения и предупреждения.

Внезапного проявления отказов станет меньше по мере развития методов и средств диагностирования. Пока же номинальное и допускаемое значения, по которым оценивают и прогнозируют техническое состояние узлов и агрегатов МТП, устанавливают только для тех параметров, которые изменяются в эксплуатации машин постепенно, а их изменения могут моделироваться математически.

Диагностика как наука и само направление диагностирования МТП в АПК, не сложившись окончательно, продолжают развитие. Недостатки – превалирование механических и гидравлических СТД, порой – отсутствие компьютеризации, автоматизации процесса диагностирования и получения результатов контроля, отсутствие программ, средств и методов их хранения и систематизации, отсутствие автоматизации прогнозирования состояния объектов контроля. Недостаточно используются дистанционные физические методы контроля: оптические, термодинамические, электромагнитные, вибрационные,

акустические (например, по ультразвуковой эмиссии), методы химмотологии и спектрального анализа масел и рабочих жидкостей, не хватает математической обработки результатов контроля динамичных рабочих процессов. Слабо проработаны методы выявления и устранения причин повышенного и аварийного изнашивания узлов трения, причин разрегулировок, внезапных отказов и неисправностей.

В связи с состоянием науки диагностики и ТО МТП мало используются методы и средства повышения надежности, работоспособности и эксплуатационного ресурса агрегатов новыми приемами триботехники, а многие государственные стандарты по методам, средствам и нормативам диагностирования устарели и требуют переработки. В недостаточном темпе ведутся работы по прогнозированию и упреждению отказов и неисправностей перспективными бортовыми системами контроля и управления машинами. Эти недостатки могут быть устранены с использованием зарубежных разработок.

2.4. Управление техническим состоянием машин по результатам диагностирования

Проблеме повышения эффективности использования сельскохозяйственной техники на всех этапах развития агропромышленного комплекса страны уделялось особое внимание.

«Комплексная система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве» [57] – разработанный ГОСНИТИ систематизирующий документ, содержащий основные концепции, положения и нормативы, обеспечивающие в системном виде осуществление процессов поддержания и восстановления работоспособности техники на основе целенаправленного управления ее надежностью с применением средств диагностирования. Данная система устанавливает виды и порядок чередования ремонтно-обслуживающих воздействий, с помощью которых обеспечивается необходимое состояние машин, их работоспособность в течение всего периода эксплуатации.

Комплекс научных исследований и опыт показывают, что в процессе эксплуатации машин необходимо осуществлять целенаправленное управление их техническим состоянием. Это возможно с помощью системы ТО и ремонта, в которой подсистема ТО должна играть решающую роль.

ППС ТО и ремонта предусматривает контроль значений параметров технического состояния и восстановление этих значений

до номинального уровня в случае, если в процессе контроля обнаружится, что параметр вышел за пределы допуска. Непременным условием своевременного выявления и предупреждения отказов, управления надежностью машин является применение методов и средств технического диагностирования, позволяющих измерить параметры и оценить качественные признаки состояния.

Система [56] предусматривает при ТО периодический регламентный контроль значений диагностических параметров, а восстановление их значений до номинального уровня – только в случае, если значения параметров выйдут за допускаемые пределы. Методом и средством контроля параметров и качественных признаков состояния, условием своевременного выявления и предупреждения отказов, т. е. методом и средством управления надежностью машин является их диагностирование [37, 38, 56].

Современный уровень организации, методов и средств технического диагностирования позволяет выделить следующие *основные этапы*: выполнение подготовительных работ; диагностирование объекта; оценка и прогнозирование изменения технического состояния объекта и его основных частей; принятие решения об объеме ТО или ремонта объекта. Таким образом, техническое диагностирование позволяет получить, обработать, проанализировать и выдать информацию о техническом состоянии машины.

Основные положения организации и технологии технического диагностирования для сельскохозяйственной техники разработаны в ГОСНИТИ научной школой В. М. Михлина и обобщены в работах [8, 10, 11, 25, 30–41, 46, 48, 55–57, 65, 69, 70, 76, 78, 88, 90, 92, 95, 98, 101, 104, 107–109, 116, 117, 121, 126–130, 132, 134, 137, 141–144, 147].

Значительный вклад в области ТО и ремонта машинного парка с применением диагностирования внесли работы В. А. Аллилуева, А. В. Дунаева, Н. С. Ждановского, А. В. Ленского, В. М. Лившица, Л. В. Николаенко, Б. В. Павлова, Н. С. Пасечникова, И. П. Терских, Б. А. Улитовского и др. Выполненные исследования стали основой для внедрения в практику принципиально новой стратегии управления техническим состоянием машин с использованием современных методов и средств технического диагностирования [11, 25, 30, 35, 39, 57, 65, 76, 108, 109, 116, 117, 126, 129, 130].

Существующая система ТО ориентирована на проведение регламентных профилактических операций с определенной периодичностью и объемом, устанавливаемых в инструкциях по эксплуатации

машин. Принципиальным недостатком этой системы является то, что она не обеспечивает необходимых предпосылок для удовлетворения предъявляемых к ней требований. Нормативом возобновления годности элементов машин здесь служит наработка.

С учетом того, что интенсивность старения даже одинаковых машин носит вероятностный характер, потребность их в обслуживании возникает в различные сроки. Это обуславливает неправомерность строго заданной периодичности ТО, т. к. для определенной части элементов машин оно запоздает или окажется преждевременным.

В первом случае машины будут эксплуатироваться в условиях отказа отдельных элементов, что даст возможность возникновения преждевременных износов, неисправностей и поломок их составных частей. Во втором – возникнут непроизводительные затраты на возобновление годных элементов, еще не выработавших свой ресурс.

Вследствие вероятностного характера распределения сроков выполняемых работ не исключается возможность достижения регламентированной наработки в календарные сроки, совпадающие с плановыми периодами сельскохозяйственных работ. При постановке машины на ТО в такие периоды неизбежно возникают издержки, связанные с потерей основной продукции из-за нарушения оптимальных сроков выполнения работ вследствие простоя агрегата. Это обстоятельство является недостатком действующей системы.

Основная задача управления работоспособностью машин – проведение предупреждающих отказы ремонтно-обслуживающих работ по восстановлению параметров состояния машины. При этом используются показатели, непосредственно управляющие техническим состоянием и надежностью машин: степень восстановления технического ресурса составной части; наработка машины или ее составной части до списания; межконтрольная наработка; назначенный остаточный ресурс; допускаемое значение диагностического параметра. Оптимальные значения показателей являются характеристиками системы ТО и ремонта машин.

Управление техническим состоянием включает измерение параметров состояния с предельной погрешностью σ , сравнения измеренных значений с допускаемыми значениями D , обработки результатов измерения, определения остаточного ресурса составных частей $t_{ост}$, назначения вида (текущий или капитальный) и объема ремонта, наработки до его проведения, а также восстановления в определенной мере ресурса составных частей.

Для измерения параметров состояния и назначения необходимых ремонтно-обслуживающих работ служат средства технического диагностирования. В практике технической эксплуатации машин используются различного уровня применимости серийные комплекты диагностического оборудования, содержащие большое количество приборов и приспособлений – комплект средств экспресс-контроля поиска и устранения неисправностей агрегатов самоходных сельскохозяйственных машин (переносной диагностический комплект КИ-28032; переносной комплект диагностирования автотракторных дизелей КИ-28032.1; передвижная диагностическая установка КИ-28035; передвижная ремонтно-диагностическая мастерская КИ-28035.1; передвижная мастерская «Агротехсервис» КИ-28012-01 (КИ-28012-02) и др.).

В практическом плане диагностирование дает возможность устанавливать необходимость капитального ремонта машины или ее составных частей, объем и характер работ по ТР и ТО. Решения о проведении необходимых ремонтно-обслуживающих работ выносятся на основе оптимизации управляющих показателей с помощью экономического (минимум издержек на единицу наработки с учетом издержек от простоев по техническим причинам) или технического (максимальная вероятность безотказной работы) критериев.

В сельском хозяйстве в основном используется три *стратегии ТО и ремонта* [57]:

- по потребности после отказа C_1 – замена, ремонт, регулирование составных частей после внезапного отказа, а также отказа, устранение последствий которого сопровождается относительно небольшими потерями (внезапный отказ ламп, контрольных приборов);

- по наработке или расходу топлива C_2 – работы носят плано-предупредительный характер, их проводят в течение наработки (срока службы) вне зависимости от состояния изделия (периодическая замена масла, смазка подшипников и т. п.);

- по состоянию с периодическим или непрерывным контролем C_3 – предупредительные работы проводят в зависимости от состояния машины. Контроль (диагностирование) осуществляют в плановом порядке для установления состояния машины. По такой стратегии заменяют цилиндро-поршневую группу, регулируют момент зажигания и т. п.

При ТО и ремонте сложного изделия используют несколько стратегий применительно к определенной составной части. Например, замену ламп фары трактора осуществляют по первой стратегии,

замену масла в двигателе – по второй, замену цилиндро-поршневой группы двигателя – по третьей.

Выбор стратегии ТО и ремонта в первую очередь определяется особенностями использования машин, их безотказностью, ремонтно- и контролепригодностью, а также экономическими характеристиками.

На основании проведенных исследований, практики технического сервиса в комплексной системе обоснован переход от жесткой планово-предупредительной стратегии ТО и ремонта (C_2) к ситуационному управлению надежностью машин в эксплуатации на основе оценки их технического состояния в производственных условиях. Предупредительный характер ремонтно-обслуживающих работ не отменяется, машина по-прежнему должна ремонтироваться заранее, еще будучи работоспособной. Однако потери технического ресурса при предупредительном ремонте на основе технического состояния с использованием средств диагностирования становятся меньшими, а вероятность безотказной работы – большей, чем при регламентной планово-предупредительной стратегии ТО и ремонта по наработке или расходу топлива.

Из используемых видов управляющих воздействий приоритет отдается ТО как необходимому профилактическому мероприятию, предусмотренному для обеспечения паспортных эксплуатационных данных машин. Время проведения контроля при ТО планируется жестко, фактические объемы работ, как правило, определяются на основе оценки технического состояния с помощью инструментальной диагностики. Периодическое плановое диагностирование и принятие мер по предупреждению неисправностей позволяет сократить число отказов диагностируемых машин (составных частей) в три и более раза, уменьшить объем разборочно-сборочных работ и расход запасных частей на 30 %, расход топлива – на 10–15 %.

Технологии диагностирования машин разрабатываются с учетом особенностей системы C_3 и применяемых диагностических средств. Они имеют свое целевое назначение. Например, диагностирование тракторов при ТО-1 и ТО-2 контролирует функционирование защитных устройств, необходимых для нормальной работы составных частей, а при ТО-3 выявляет потребность в регулировке механизмов и систем, сложных операциях ТО или ремонта.

Организация работ по техническому диагностированию оказывает непосредственное влияние на качество и эффективность процесса, производительность и степень использования диагностических средств,

которые должны быть тесно увязаны с принятыми организационными формами и методами ТО и ремонта.

В основу организации технического диагностирования должен быть положен принцип специализации и разделения труда, при котором диагностирование проводят специально подготовленные мастера и слесари-диагносты или мастера-наладчики. Возможны различные методы организации диагностирования: на стационарном посту, точный или при помощи передвижных диагностических средств.

Основными задачами диагностирования являются:

- проверка определенной совокупности параметров и качественных признаков технического состояния машины в процессе выполнения операций ТО и принятие решения о необходимости восстановления до номинального значения тех параметров, которые вышли за допускаемые пределы;

- определение необходимости полной разборки и проведения капитального ремонта машины и ее составных частей (предремонтное диагностирование) и оценка качества ремонта (послеремонтное диагностирование);

- проверка работоспособности и правильности функционирования составных частей машины;

- получение информации для прогнозирования остаточного ресурса и принятие решения по восстановлению ресурса машины или составных частей при достижении машиной доремонтной или межремонтной наработки.

Диагностирование при эксплуатации машины может быть плановым (при периодических ТО) или заявочным (для выявления неисправностей). Оно может проводиться совместно с работами по ТО (совмещенное диагностирование) или отдельно (специализированное). Совмещенное рекомендуется выполнять, как правило, при ТО-1, ТО-2 и при устранении последствий отказов тракторов. Специализированное осуществляется при ТО-3 и организуется либо на станции технического обслуживания тракторов (СТОТ), либо при помощи передвижных диагностических средств районных агросервисных предприятий.

При планировании диагностических работ необходимо увязывать их с выполнением ремонтно-обслуживающих воздействий и с календарными сроками выполнения сельскохозяйственных работ. На первый квартал планируется выполнение пред- и послеремонтного диагностирования при ремонте и техническом осмотре машин. Во втором и третьем квартале необходимо проводить плановое (при ТО) и заявочное диагностирование, а в четвертом – диагностирование

после окончания полевых работ (предремонтное), а также плановое и заявочное для машин, работающих в осенне-зимний период.

Рациональная организация работ по техническому диагностированию обуславливает их высокую экономическую эффективность. Это достигается уменьшением расхода топлива, сокращением числа постепенных отказов, увеличением фактической доремонтной и межремонтной наработки, сокращением числа капитальных ремонтных машин, улучшением показателей машиноиспользования.

Обоснование оптимальной стратегии управления техническим состоянием машин по результатам диагностирования требует дифференцированного подхода к определению ее эффективности применительно к конкретным условиям сельскохозяйственных производств. С этой целью ГОСНИТИ совместно с БИМСХ (БГАУ) в период с 1982 по 1990 г. провели экспериментальные исследования, направленные на апробацию и внедрение данной стратегии на примере тракторов МТЗ-80/82 в условиях хозяйств Республики Беларусь.

Основное внимание проводимых исследований сосредотачивалось на оперативном и достоверном определении технического состояния тракторов с использованием имеющихся средств и методов диагностирования; установлении оптимальной периодичности диагностирования; экспериментальной проверке правил назначения вида, объема и срока выполнения ремонтных воздействий; оптимизации допускаемых отклонений параметров, характеризующих износ дефицитных деталей; исследование возможностей внедрения автоматизированных средств управления процессом ТО и ремонта машин.

Объектами исследования стали две группы тракторов МТЗ-80/82 – экспериментальные и контрольные, используемые в рядовых условиях эксплуатации типичных хозяйств Беларуси, по которым осуществлялся сбор исходной информации для оценки показателей надежности и отрабатывалась стратегия управления их техническим состоянием по итогам диагностирования.

В результате проведенных исследований определены показатели машиноиспользования и надежности тракторов МТЗ-80/82; построена динамика отклонений диагностических параметров в зависимости от наработки; осуществлена производственная проверка правил оценки критериев предельного состояния, регламентирующих обоснованную постановку тракторов на ремонт с учетом оптимального использования технического ресурса их составных частей; обоснована возможность изменения до оптимальных значений параметров технического

состояния (износа деталей и сопряжений) в условиях дефицита запасных частей; выявлены возможности совершенствования управления процессом ТО и ремонта тракторов по результатам диагностирования как при существующих методах и средствах управления, так и при внедрении автоматизированных систем.

Построены два статистических ряда измеренных значений по каждому i -му параметру $\Pi_{ij}(t)$ и наработке, где $i = 1, 2, \dots, n$; n – число структурных параметров.

Показатели динамики определялись по выбранной номенклатуре структурных параметров. По внезапным отказам ограничивались сопоставлением ресурса и коэффициента вариации.

Прогнозирование диагностических параметров производилось по конкретным реализациям, установленным в процессе диагностирования. В качестве аппроксимирующих функций $U(t)$ использованы степенные зависимости

$$U(t) = \Delta\Pi + V_c t^a, \quad (2.1)$$

где $\Delta\Pi$ – показатель, характеризующий приработку элемента, численно равный значению ординаты при $t = 0$; V_c – случайная величина, характеризующая показатель скорости изменения параметра под влиянием внутренних факторов; t – наработка; a – показатель степени, определяющий характер изменения параметров.

Для оптимизации допускаемых отклонений параметров $U(D)$ и межконтрольной наработки t_M использовалась целевая функция [76]

$$G = \min \left\{ \frac{AQ(D, t_M)}{T_{cp}(D, t_M)} + \frac{C[1-Q(D, t_M)]}{T_{cp}(D, t_M)} + \frac{BK_{\Pi}(D, t_M)}{T_{cp}(D, t_M)} \right\}, \quad (2.2)$$

где $Q(D, t_M)$ – вероятность отказа элемента за срок службы в зависимости от D и t_M ; $T_{cp}(D, t_M)$ – фактически используемый ресурс элемента по параметру в зависимости от D и t_M ; A, C – средние дискретные издержки, связанные с устранением последствий отказа и предупредительным восстановлением элемента по параметру; B и $K_{\Pi}(D, t_M)$ – издержки, связанные с диагностированием, и число проверок элемента в зависимости от D и t_M без учета проверок при предупредительном восстановлении и устранении последствий отказа.

Остаточный ресурс, когда t_M не задано, определяется по формуле

$$t_{\text{ост}} = t_k \left(\frac{U_k}{U_n} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1, \quad (2.3)$$

где U_n , U_k – соответственно предельное и измеренное значения отклонений параметров: $U(t_k + t_{\text{ост}}) = U_n t_{\text{ост}} = t_M$.

Ресурс конкретной составной части при индивидуальном прогнозировании изменения ее параметра по реализации представляется как сумма наработки к моменту контроля t_k и остаточного ресурса $t_{\text{ост}}$:

$$t_{\text{ср}} = t_k + t_{\text{ост}}. \quad (2.4)$$

В процессе опытно-производственной проверки стратегии управления техническим состоянием тракторов МТЗ-80/82 по результатам их диагностирования рассматривалась задача уменьшения дефицита запасных частей путем управления допускаемыми отклонениями параметров состояния. Решение – целенаправленное расширение допускаемого отклонения параметра, характеризующего износ дефицитной детали (сопряжения) в случае появления сбоев в системе материально-технического снабжения. В целях сохранения безотказности составных частей на прежнем уровне одновременно ужесточаются технические требования на замену деталей, имеющих в избытке. Увеличивая допускаемое значение диагностического параметра до оптимального уровня, можно значительно уменьшить число предупредительно заменяемых деталей, тем самым повысить их фактический используемый ресурс и снизить потребность в их замене.

Результаты исследований показали, что применение обоснованных правил назначения ремонтно-обслуживающих воздействий по потребности, определяемой диагностированием, позволяет улучшить показатели машиноиспользования, безотказности и долговечности тракторов (табл. 2.2, 2.3).

В процессе исследований обоснованы предельные и допустимые значения диагностических параметров тракторов «Беларус-80/82», разработаны рекомендации по совершенствованию организации, методов и средств технической диагностики тракторов, определены показатели надежности тракторов «Беларус-80/82» и представлены конкретные рекомендации заводу-изготовителю по улучшению конструкции.

Таблица 2.2

Основные показатели машиноиспользования тракторов «Беларус-80/82»

Показатели	Группы тракторов	
	экспериментальная	контрольная
Общие показатели		
Среднегодовая наработка, ч (усл. эт. га)	1080 (1190)	1050 (1155)
Годовой расход горючего, кг	6186	5895
Трудоемкость ТР, ч	43,3	51,1
Затраты на ТР, руб.	303,72	349,27
Удельные показатели		
Расход топлива, кг/ч	5,7	5,7
Трудоемкость ТР, ч/1000 ч (ч/1000 усл. эт. га)	40,1 (36,4)	48,8 (42,8)
Затраты на ТР, руб./1000 ч (руб./1000 усл. эт. га)	281,2 (255,2)	332,6 (292,3)

Таблица 2.3

Показатели долговечности основных агрегатов тракторов МТЗ-80/82 до первого капитального ремонта

Агрегаты	Ресурс, тыс. ч		
	средний	80%-й	остаточный
Двигатель Д-243	7,5/6,3*	5,5/4,6	1,5/1,0
Топливный насос	5,2/3,4	3,1/2,5	1,0/1,2
Гидронасос НШ-32	6,0/5,4	4,4/3,5	–
Сцепление	8,5/6,3	5,2/4,5	–
Коробка переменных передач	7,4/7,3	5,5/5,3	1,4/1,3
Передняя ось	8,8/7,9	5,3/4,3	–
Передний мост	7,6/–	4,6/–	–

*Первое значение – для экспериментальных тракторов, второе – для контрольных.

Наработка на отказ экспериментальных тракторов оказалась на 15,5 % выше, чем у контрольной группы. Показатель ремонтпригодности (удельная трудоемкость восстановления работоспособности) рассматриваемых групп тракторов оказался равным 40,1 ч на 1000 ч для экспериментальных и 48,8 ч – для контрольных. Таким образом, удельная трудоемкость восстановления работоспособности тракторов, по которым осуществлялось управление техническим состоянием по результатам диагностирования, снизилась на 21,7 %.

По результатам исследований получены параметры функции (табл. 2.4), построена динамика отклонений диагностических параметров (рис. 2.1–2.5).

Таблица 2.4

Показатели функции изменения параметров
технического состояния составных частей тракторов «Беларус-80/82»

Диагностические параметры	Параметры функции			Предельные значения		Нормативные значения параметров		
	$\Delta П$	\overline{V}_c	a	нара- ботки $t_{п}, ч$	пара- метра $U_{п}$	номи- наль- ного $U_{н}$	допустимого при остаточ- ном ресурсе, ч	
							125	500
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
Экспериментальные тракторы								
<i>Дизель</i>								
Мощность, кВт	0,99	0,739	0,77	–	44,1	58,8	44,0	48,5
Давление масла, МПа	0,05	0,014	0,68	–	0,08	0,25	0,08	0,1
Расход картерных газов, л/мин	6,61	8,25	0,95	7,5	90	28	89	86
Суммарный зазор шатуна, мм	0,02	0,02	1,16	–	0,85	0,12	0,78	0,76
Высота кулачков, мм	0,04	0,08	1,00	–	9,56	10,2	9,60	9,85
<i>Топливная аппаратура</i>								
Мощность, кВт	1,52	0,71	0,69	–	44,1	58,8	44,1	48,5
Объемный расход топлива, л/ч	0,93	0,21	1,08	5,2	26,6	18,3	20,6	19,6
Неравномерность подачи, %	4,8	0,30	1,34	5,2	13,5	6	13,0	13,0
<i>Гидросистема</i>								
Подача насоса, л/мин	5,56	1,75	1,05	5,5	26,6	45	29,3	30,4
Утечка в распределителе, л/мин	2,80	1,13	0,68	–	12	5	12	11
<i>Ходовая система</i>								
Радиальный зазор цапф, мм	0,02	0,004	2,19	8,8	0,69	0,2	0,68	0,65

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Осевой зазор колес, мм	0,03	0,003	2,20	–	0,30	0,15	0,30	0,20
Сходимость, мм	5,0	0,52	0,58	–	8	6	8	8
<i>Трансмиссия</i>								
Суммарный зазор передач:								
– 3	1,56	0,46	1,16	7,4	6,7	0,5	6,6	6,4
– 6	1,53	0,79	0,91	–	7,0	1,0	7,0	7,0
– 9	1,77	0,37	1,29	–	6,5	1	6,5	6,5
Контрольные тракторы								
<i>Дизель</i>								
Мощность, кВт	1,39	1,19	0,80	–	44,1	58,8	44,1	48,5
Давление масла, МПа	0,001	0,02	0,87	–	0,08	0,25	0,08	0,1
Расход картерных газов, л/мин	6,27	5,67	1,21	–	90	28	90	0,70
Суммарный зазор шатуна, мм	0,02	0,02	1,18	–	0,85	0,12	0,78	9,0
Высота кулачков, мм	0,003	0,03	1,69	–	8,4	10,2	8,5	–
<i>Топливная аппаратура</i>								
Мощность, кВт	0,54	0,27	0,70	–	44,1	58,8	44,1	48,5
Объемный расход топлива, л/ч	1,25	0,48	1,73	–	20,6	18,3	20,6	19,6
Неравномерность подачи, %	6,0	0,95	0,60	–	10	6	10	10
<i>Гидросистема</i>								
Подача насоса, л/мин	2,26	0,70	1,85	–	29	45	19	21
Утечка в распределителе, л/мин	3,0	1,08	0,67	–	15	5	15	12
<i>Ходовая система</i>								
Радиальный зазор цапф, мм	0,02	0,005	1,66	–	0,6	0,2	0,6	0,4
Осевой зазор колес, мм	–	–	–	–	0,3	0,15	0,3	0,2
Сходимость, мм	5,0	0,73	0,76	–	8	6	8	8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Трансмиссия</i>								
Суммарный зазор передач:								
– 3	2,1	0,20	1,09	–	6	0,5	9	6
– 6	2,2	0,31	0,92	–	7	1,0	7	7
– 9	2,4	0,45	0,85	–	6,5	1	6,5	6,5

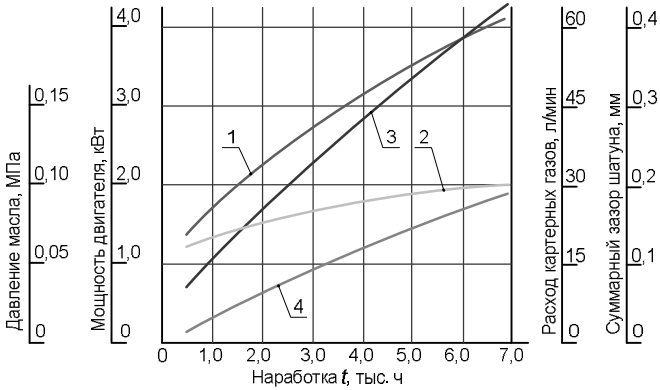


Рис. 2.1. График отклонения диагностических параметров дизелей Д-243:
 1 – мощность двигателя, кВт; 2 – давление масла, МПа;
 3 – расход картерных газов, л/мин; 4 – суммарный зазор шатуна, мм

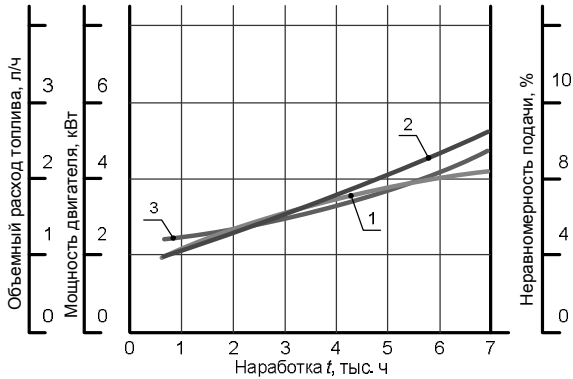


Рис. 2.2. График отклонения диагностических параметров топливной аппаратуры дизелей Д-243:
 1 – мощность двигателя, кВт; 2 – объемный расход топлива, л/ч;
 3 – неравномерность подачи, %

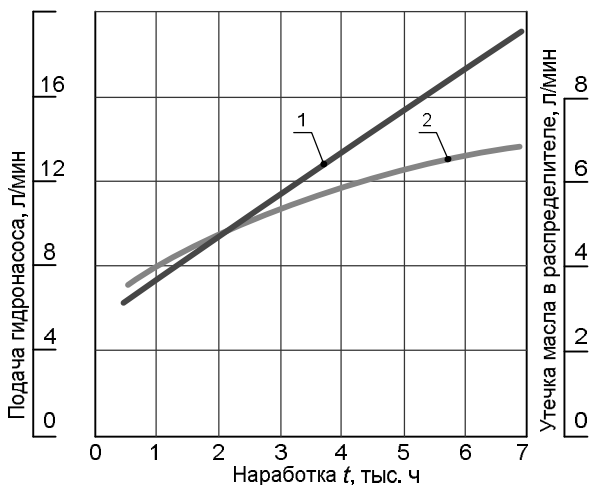


Рис. 2.3. График отклонения диагностических параметров гидросистемы:
 1 – подача гидронасоса, л/мин; 2 – утечка масла в распределителе, л/мин

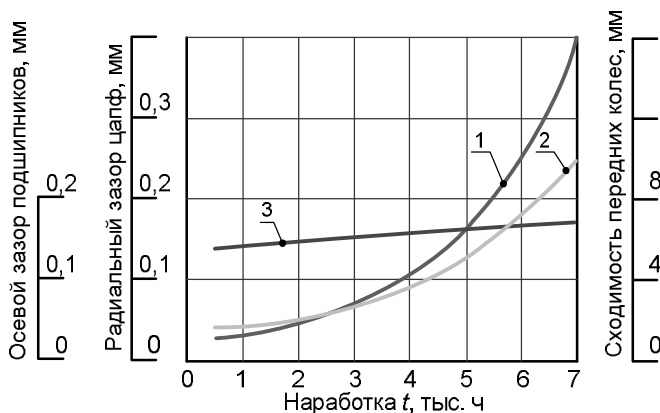


Рис. 2.4. График отклонения диагностических параметров ходовой системы:
 1 – радиальный зазор цапф, мм; 2 – осевой зазор подшипника, мм;
 3 – сходимость передних колес, мм

Результаты проведенных исследований показали, что реализация стратегии управления техническим состоянием машин по итогам диагностирования позволяет повысить коэффициент технической готовности на 8–10 %, сократить простои из-за отказов на 10–15 % и уменьшить издержки на устранение их последствий на 15–20 %.

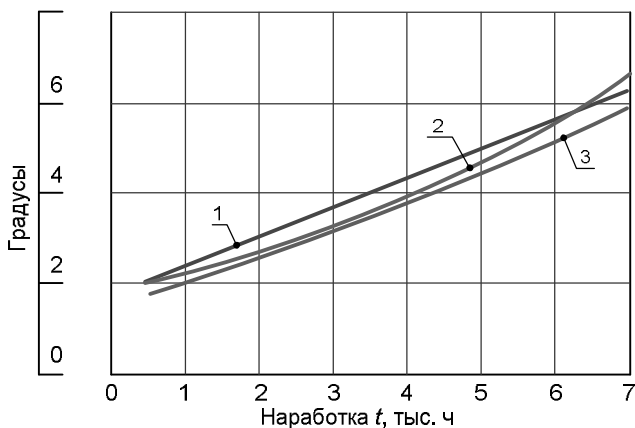


Рис. 2.5. График отклонения диагностических параметров трансмиссии (суммарный угловой зазор по передачам, град.):
1 – 3-я передача; 2 – 6-я передача; 3 – 9-я передача

Управление техническим состоянием машин является непрерывным процессом, обеспечивающим работоспособность системы технического обслуживания и ремонта техники (ТОР). Процесс управления состоит из нескольких этапов (рис. 2.6).

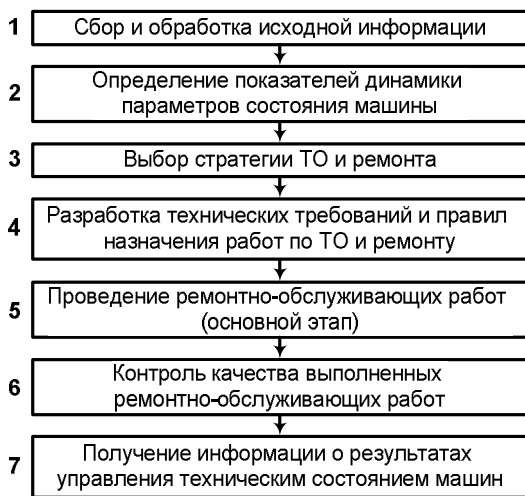


Рис. 2.6. Этапы процесса управления техническим состоянием машин

На рис. 2.7 представлена схема процесса управления техническим состоянием машин.

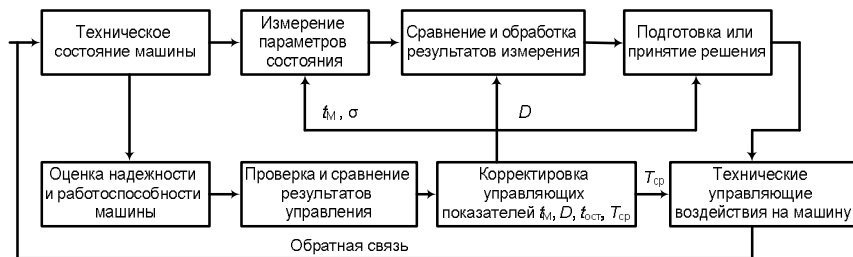


Рис. 2.7. Схема управления техническим состоянием машины

На *первом этапе* получают и обрабатывают информацию для определения значений параметров, оценки качественных признаков и наработки конкретной машины при диагностировании; нахождения показателей динамики параметров состояния, надежности составных частей машин, экономических и экологических характеристик их отказа и восстановления.

На *втором этапе* устанавливают зависимости изменения параметров состояния от ряда факторов, причинной связи элементов, показателей безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости в определенных условиях. На этом же этапе определяют динамическую модель машины и ее составных частей, используя показатели динамики и причинную связь ее элементов. Одновременно ставят диагноз состояния конкретной машины и на основе полученных графиков зависимости прогнозируют это состояние на будущее. При этом руководствуются нормативными допускаемыми и предельными значениями параметров состояния. Если параметр состояния превысил допускаемое значение, необходимо провести предупредительные работы по восстановлению номинального значения параметра. При достижении параметром предельного значения констатируют отказ составной части. Необходимость проведения капитального ремонта агрегата определяют по достижении им предельного состояния.

Третий этап предусматривает выработку общего решения, которое определяет стратегию ремонтно-обслуживающих работ. Стратегию выбирают по результатам первых двух этапов управления на основе сравнения показателей надежности при различных стратегиях. Предварительно обосновывают критерии выбора стратегии ТОР.

Четвертый этап направлен на конкретизацию общего решения, выбор и формирование конкретных частных задач, обоснование целевых функций для их реализации. Для решения конкретных задач разрабатывают типовые правила решений, в т. ч. правила назначения ремонтно-обслуживающих работ, составляют алгоритмы решения конкретных задач, планируют нормативы для их решения. Основные решения частных задач сводятся к установлению необходимости проведения определенных регулировочных и других операции ТО, устранения неисправностей при ТО и ТР с заменой или восстановлением конкретных составных частей и указанием объема, срока и места ремонта.

При принятии решений учитывают характеристики производственной ситуации: время до окончания сезона работы, наличие дефицита необходимых запасных частей, число резервных машин, возможность проведения ремонта и т. п.

Пятый этап управления заключается в организации ремонтно-обслуживающих работ в целях реализации общего и частных решений. Этап является основным и обуславливает поддержание и восстановление работоспособности и исправности машины. Он включает все операции ТОР. На этом этапе в качестве обобщенного управляющего показателя служит средний ресурс T_a составных частей по каждому структурному параметру состояния. Недостаточная степень восстановления снижает этот ресурс.

Шестой этап – контроль качества выполнения ремонтно-обслуживающих работ. Управляющими показателями здесь выступают технические требования на проведение операций ТОР и прижатие машин после ремонта. Также устанавливают достоверность постановки диагноза и правильность назначения ремонтно-обслуживающих работ.

Седьмой этап управления служит для получения информации о результатах деятельности системы ТОР, надежности и эффективности работы сельскохозяйственной техники в процессе эксплуатации, причинах отказов и т. п., а также обратной связи в процессе управления. В результате сравнения ожидаемых оптимальных значений показателей надежности машин с фактическими проводят корректировку управляющих показателей для уменьшения отклонений, выявленных при сравнении. Затем осуществляют новый цикл управления.

3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

3.1. Требования к разработке средств диагностирования

В создании перспективных средств диагностирования можно выделить три основных направления:

1) разработка комплектов простых и надежных приборов и устройств, основанных на механических, пневмогидравлических, электрических средствах измерения, применяемых при несложных видах ТО;

2) разработка простых и универсальных электронных приборов, преимущественно в целях общего диагностирования, которые используются для оперативного контроля машин при техническом осмотре, в напряженные периоды работ, при ТО-2, ТО-3;

3) разработка многофункциональных диагностических установок, применяемых при сложном ТО (ТО-3), а также для оценки качества изготовления и ремонта машин.

Также важная задача – повышение контролепригодности техники, решаемая в основном за счет уменьшения вспомогательной трудоемкости на присоединение и отсоединение диагностических средств. На это затрачивается до 80 % оперативного времени при диагностировании. В этом направлении проводятся исследования по спектральному анализу масел, что позволяет по их пробе оценивать динамику нескольких структурных параметров ДВС, КП, ведущих мостов. Широкое применение находит виброакустический контроль.

При разработке средств технической диагностики необходимо придерживаться общих требований к контролепригодности машин:

– при выполнении работ по ТО-1 и ТО-2 тракторов необходимо использовать простые типовые элементы контроля по принципу «исправен–неисправен». При ТО-3 необходимо более высокая точность, особенно при определении ресурсных параметров. В первом случае нужно применять встроенные сигнализаторы и указатели, а также элементы, обеспечивающие удобства контроля;

– чем энергонасыщеннее трактор, тем лучше он должен быть приспособлен к диагностированию, что обуславливается высокой стоимостью простоев и требует применения бортовой системы диагностирования;

– для проверки уровня масла, воды, охлаждающей жидкости следует применять встроенные приборы допускового контроля и указателя уровня, так называемые глазки;

– для различного рода педалей, рычагов и других перемещающихся деталей необходимо применять нанесенные краской метки предельных значений.

Диагностические средства классифицируются в соответствии с шестью признаками:

– по монтажному отношению к объектам диагностирования: встроенные, автономные, смешанные;

– по мобильности: стационарные, передвижные;

– по способу выходной сигнализации: фиксируют одно или два предельных значения параметра, весь диапазон возможных значений, а также записывают наблюдаемые значения параметра;

– в зависимости от физического метода измерения диагностического параметра: механические, электрические, температурные, акустические, тензометрические, оптические, магнитные;

– по периодичности наблюдения: средства непрерывного действия (приборы самой машины), периодического (стетоскопы, диагностические стенды и т. д.), а также наблюдения при отказах (средства поиска неисправностей);

– по отношению к объекту диагностирования: могут носить названия систем, для оценки технического состояния которых служат (стенды диагностирования рулевого управления, тормозных систем и т. д.).

Кроме того, выделяют:

– заводское-технологическое диагностирование – при определении технического состояния деталей, сборочных единиц и механизмов машины во время ее изготовления, сборки и заводских испытаний;

– ремонтное диагностирование: предремонтное проводится для определения объема ремонтных работ; ремонтно-технологическое предусматривает контроль отдельных деталей, сборочных единиц во время их ремонта, сборки, обкатки; послеремонтное направлено на определение качества ремонта;

– эксплуатационное диагностирование – при полевых работах (перед, во время и после окончания работ), а также при появлении неисправностей и при плановом ТО;

– специальное диагностирование – в случаях, когда требуется определить техническое состояние машины, на которой проводят исследования или нормирование.

Диагностирование сборочных единиц машины делят на три этапа:

– подготовительный – очистка и мойка машины, внешний осмотр и занесение его результатов в контрольно-диагностическую карту, монтаж датчиков и измерительных приборов;

– основной – установка необходимых режимов работы машины, измерение параметров технического состояния сборочных единиц и агрегатов. Результаты контроля заносятся в контрольно-диагностическую карту;

– заключительный – постановка диагноза, в результате которого определяют характер и объем необходимых работ по поддержанию машины в работоспособном состоянии, прогноз остаточного ресурса сборочных единиц, снятие приборов и датчиков с машины.

Диагностирование и обслуживание самоходных сельскохозяйственных машин имеет много общего с проверкой технического состояния тракторов.

Существующая технология диагностирования технологических агрегатов уборочной техники на основе статических методов и механических устройств имеет большую трудоемкость (7,8 чел.-ч) с частичной разборкой механизмов (до 70 %). Поэтому система мер обеспечения их долговечности в условиях эксплуатации должна основываться на методах и средствах диагностирования, позволяющих автоматизировать процесс получения информации о техническом состоянии, программируемый анализ результатов диагностирования путем сравнения с предыдущими измерениями, формирование командной информации обслуживающему персоналу с перечнем конкретных ремонтно-обслуживающих воздействий.

Для диагностирования технологических агрегатов уборочной техники теоретически обоснованы два метода – кинематический и динамический. В ряде работ исследована и обоснована возможность использования виброакустического метода для диагностирования технического состояния рабочих органов уборочных машин [56, 129].

Методы диагностирования необходимо разрабатывать для конструктивных подсистем. В подсистеме рабочие органы предназначены для групп технологических агрегатов, объединенных одинаковой кинематикой движения (роторные, возвратно-поступательного действия, плоско-параллельного движения).

Создание электронных диагностических средств целесообразно проводить на основе кинематических и динамических методов.

При исследованиях в БГАТУ установлена функциональная связь диагностических и структурных параметров, определены рациональные зоны установки измерительных преобразователей; области наиболее информативных частот сигналов виброускорения корпусов опорных элементов и несущих конструкций рабочих органов;

рациональные кинематические режимы диагностирования; разработаны рекомендации по диагностированию виброакустическим способом с помощью электронных средств в динамическом режиме.

Следует отметить особенности проверки параметров состояния специальных механизмов уборочной техники: режущих, измельчающих, молотильных, транспортирующих и др. При ЕТО комбайнов и других самоходных сельскохозяйственных машин оценивают общее состояние гидросистемы и электрооборудования, проверяют состояние тормозов, натяжение ремней и цепей. При проведении ТО-1 проверяют механизм уравнивания жатки, плотность и уровень электролита в аккумуляторной батарее и давление воздуха в шинах. При ТО-2 проверяют свободный ход и усилие на ободу рулевого колеса, сходимость колес и свободный ход муфты включения и выключения сцепления. Ниже приведено описание некоторых из этих работ.

После эксплуатационной обкатки и при заявочном диагностировании проверяют предохранительные муфты, ход ножа жатки, погнутость валов и биение шкивов (звездочек), состояние подшипниковых узлов, зазоры в сборочных единицах, оценивают состояние узлов гидростатической трансмиссии и гидросистемы рулевого управления.

Проверка погнутости валов и биение шкивов (звездочек). Для проверки биения закрепляют струбцину штатива с индикатором на угольнике или другой детали комбайна. Измерительный стержень индикатора подводят к поверхности вала на расстояние 5–10 мм от конца, проворачивают вал и определяют биение по индикатору. Допустимые величины биения валов: валы молотильного барабана, главного контрпривода, приемного бitera, промежуточного и отбойного битеров – 0,3 мм; коленчатые валы соломотрясов, соломонабивателя, половонабивателя, колебательный вал – 0,2; вал вентилятора – 0,4; заднего контрпривода – 1,0 мм. Если биение конца вала невозможно измерить без снятия шкива (звездочки), измеряют биение плоскости шкива (звездочки). Для этого ножку индикатора подводят к поверхности шкива (звездочки) на расстоянии 5–6 мм от края шкива или 3–5 мм от окружности впадин звездочки, проворачивают шкив (звездочку) и определяют биение по индикатору. Для звездочек диаметром до 100, 100–200, 200–300, 300–400 мм допускаются значения осевого биения 0,35; 0,60; 0,75; 1,0 мм соответственно. Для шкивов допускаются значения биения в два раза больше, чем для звездочек.

Проверка узлов подшипников качения. При осмотре подшипникового узла необходимо убедиться в отсутствии трещин в корпусе, течи смазки через уплотнения подшипников. Проверяют затяжку конусной втулки подшипника и ее шплинтовку. Перед определением радиального зазора в подшипнике ослабляют натяжение цепи (ремня), затем резко двумя руками нажимают на звездочку (шкив) вверх и вниз. Если ощущается радиальный зазор в сопряжении, его величину измеряют с помощью индикаторного приспособления и сравнивают с допускаемым значением для данного вала. Прилагаемое усилие должно составлять не менее 200–300 Н.

Проверка натяжения и износа цепей. Внешним осмотром оценивают состояние цепных передач. Звенья цепи, имеющие распрессовку валиков, разрывы и деформацию пластин, разрушения роликов, подлежат замене. Излом и выкрашивание зубьев звездочек не допускается. Звездочка натяжного устройства должна находиться в одной плоскости с контуром цепной передачи. Допускается не более 0,2 мм отклонения от плоскости на каждые 100 мм межцентрового расстояния. Натяжение цепи проверяют устройством КИ-11403.01. Наконечник устройства вставляют между роликами звена в середине ведущей ветви цепи так, чтобы пятка подвижного штока опиралась на ролик (втулку). Затем наклоняют устройством звено вдоль цепи так, чтобы хвостовик штока совпал с меткой на корпусе устройства. По шкале устройства определяют угол наклона цепи, соответствующий степени ее натяжения. У передач с четырьмя звездочками натяжение проверяют по двум ведущим ветвям контура. При отсутствии устройства КИ-11403.01 натяжение цепи проверяют с помощью динамометра ДПУ-0,1, рейки и линейки с пределом измерения 300 мм, измеряя величину прогиба цепи в соответствии с требованиями завода-изготовителя комбайна.

Износ цепи проверяют устройством КИ-11403.03, а при его отсутствии – штангенциркулем по ее удлинению. Для проверки цепь снимают с контура, натягивают с помощью груза массой 30–40 кг и замеряют длину десяти звеньев на трех различных участках. Для цепного контура с числом зубьев большей звездочки менее 30 длина не должна превышать: цепь с шагом 19,05 мм – 196 мм; с шагом 25,4 мм – 262 мм; с шагом 38,1 мм – 392 мм. Для цепного контура с числом зубьев большей звездочки 30 и более длина десяти звеньев не должна превышать 200, 267 и 400 мм соответственно.

Проверка натяжения ремней клиноременных передач. Внешним осмотром оценивается состояние ремней и шкивов. Замасливание,

расслоение, глубокие трещины, перекося и перекручивание ремней не допускаются. Шкивы должны располагаться в одной плоскости.

Для проверки натяжения ремня применяют устройство КИ-13918, деревянную рейку, линейку с пределом измерения 300 мм и динамометр ДПУ-0,1. Рейку накладывают на проверяемую ветвь ремня, конец штока устройства КИ-13918 устанавливают перпендикулярно ремню посередине ветви. Усилие, прилагаемое при проверке прогиба ремня, должно составлять 40 Н. При проверке натяжения ремней передач «вал контрпривода вентилятора–колебательный вал очистки» и «вал битера–вал контрпривода вентилятора» усилие должно составлять 100 Н. Величина усилия определяется динамометром ДПУ-0,1. У передач, имеющих автоматическую регулировку натяжения ремней, прогиб не проверяют. Если при контроле и регулировке не удастся обеспечить стрелу прогиба, ремень необходимо заменить. При регулировке натяжения нового ремня следует прокрутить передачу не менее чем на пять пробегов ремня, после чего определить величину его прогиба.

Проверка предохранительных муфт. Проводится их осмотр. Трещины и обломы фрикционных накладок, повреждение стяжных болтов и пружин не допускаются. После осмотра муфты снимают ремень или цепь привода и определяют момент пробуксовки. Для этого на шкиве или звездочке закрепляют динамометр ДПУ-0,2-2 с помощью зацепа 11382.04.500 и струбицы 11382.04.400, которые входят в комплект КИ-11382. Застопорив вал, через динамометр прикладывают усилие и определяют момент срабатывания муфты.

Проверка режущего аппарата жатки. Состояние лезвий сегментов, ножей, противорежущих пластин (брусьев), пальцев и прижимов спинки ножа проверяют осмотром. Ослабление креплений, деформация деталей не допускаются. Величину прогиба пальцевого бруса, положение рабочих поверхностей вкладышей и носков пальцев устанавливают, натянув тросик (шнур) вдоль пальцевого бруса. Допускается прогиб бруса в вертикальной плоскости 0,5 %, в горизонтальной – 0,1 % его длины. Положение сегментов ножа относительно пальцев и зазоры между сегментами и концами прижимов ножа, передней и задней частями сегмента и вкладышем контролируют с помощью щупов. Зазор между сегментом и вкладышем в передней и задней частях допускается не более 0,5 и 1,5 мм соответственно. В крайних положениях ножа оси сегментов и пальцев должны совпадать, отклонение не должно превышать 5 мм. Величину

зазора в подшипниках привода ножа проверяют с помощью индикаторного приспособления, закрепив его на неподвижной части жатки.

Молотильный аппарат. Состояние молотильного барабана, подбарабанья, решет, подвески грохота, клавиш соломотряса комбайнов проверяют внешним осмотром. Трещины на деталях не допускаются. Вмятины на остовах барабана и бичах не должны превышать 5 мм по длине и 2 мм по глубине. Для проверки состояния молотильного аппарата снимают ремень со шкива барабана, мелом наносят метку на один из бичей и несколько раз проворачивают барабан. В сбалансированном барабане бич с меткой после каждой остановки барабана должен занимать различные положения. Зазоры между торцами бичей и барабана и панелью комбайна с обеих сторон должны составлять 3–5 мм, а между рифами бичей и передней планкой подбарабанья при нахождении его в крайнем положении и между жалюзи в крайнем положении – не более 2 мм.

Измельчающий аппарат. При ТО кормоуборочных комбайнов контролируют зазор между ножами и противорежущими пластинами.

Рабочие органы почвообрабатывающих машин. При ТО контролируют толщину лезвий рабочих органов: у лемеха плуга – не более 1 мм, у полольных, односторонних и стрельчатых лап и дисковых ножей – не более 0,5 мм.

3.2. Стенды диагностического контроля выходных параметров тракторов

Независимо от устройства и принципа действия необходимо, чтобы тормозные стенды обеспечивали [30, 35, 42]:

- торможение двигателя в широком диапазоне его загрузки на всех скоростных режимах работы;
- стабильное торможение с достаточно длительной постоянной величиной тормозного момента;
- устойчивое торможение, сохраняющее заданный скоростной режим при небольших кратковременных изменениях нагрузки;
- достаточно точное измерение крутящего момента или окружного усилия;
- прокручивание вала двигателя или возможность его прокручивания от постороннего источника энергии, что необходимо для выполнения многих вспомогательных и подготовительных операций в процессе проведения типовых и научно-исследовательских испытаний;

- полезное использование энергии, получаемой от двигателя в процессе торможения;
- дистанционное управление органами, регулирующими нагрузку двигателя;
- сравнительно низкий уровень шума;
- невысокую металлоемкость стенда;
- возможность проведения дополнительных испытаний согласно ГОСТ 17.2.2.02–98, ГОСТ 17.2.2.05–97.

Для сравнения на рис. 3.1 приведена зависимость относительной металлоемкости обкаточно-тормозных стендов от максимальной тормозной мощности [42].

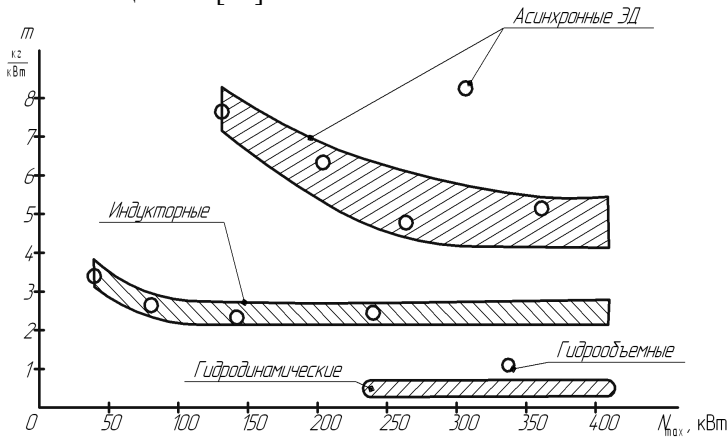


Рис. 3.1. График зависимости относительной металлоемкости тормозных устройств от максимальной тормозной мощности

Из данных рис. 3.1 видно, что наиболее металлоемкими являются стенды на базе асинхронных электродвигателей (ЭД). Гидрообъемные тормозные устройства имеют относительно небольшую металлоемкость. По этому показателю они сравнимы с гидродинамическими тормозными устройствами. Однако гидродинамические стенды не имеют возможности прокручивания коленчатого вала обкатываемого двигателя, к тому же гидрообъемные тормозные устройства обладают рядом преимуществ: малой инерцией, стабильностью управления, высокой динамичностью и низкой ценой за счет недорогой, надежной и массово выпускаемой элементной базы.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод о целесообразности выбора гидрообъемного тормоза в качестве

перспективной конструкции современных отечественных обкаточно-тормозных стендов.

Один из главных элементов диагностирования энергонасыщенных тракторов – контроль их выходных показателей, особенно топливно-энергетических, тяговых и тормозных качеств. Это требует должного оснащения постов диагностирования, в т. ч. барабанным стендом для контроля тяговых и тормозных качеств и средством контроля расхода топлива.

Тяговые испытания тракторов распространены во многих странах, проводятся на тракторных заводах (заводские), в НИИ (ведомственные и приемочные), на МИС (ведомственные, приемочные и контрольные) и оценивают показатели тракторов по ГОСТ 7057, стандартам ASAE и SAE. Эти проверки актуальны и в эксплуатации, позволяя контролировать снижение рабочей производительности машин, состояние дизеля, тормозных систем, других агрегатов и систем для восстановления их исправности при ТО и ТР.

На постсоветском пространстве барабанные стенды для испытаний колесных тракторов до 1970 г. распространения не получили. Единичные стенды имелись на ХТЗ и СевКавМИС. Но для эксплуатационного диагностирования тракторов на большинстве СТОТ в силу уникальности и сложности эти стенды были неприемлемы.

В ГОСНИТИ и на ряде МИС в 60-х гг. было создано несколько стендов для тормозных испытаний дизелей через вал отбора мощности тракторов, но они были непригодны для энергонасыщенных тракторов. Не было серийных барабанных стендов для испытания колесных тракторов и за рубежом.

В 1970 г. Харьковский тракторный завод начал использовать барабанный стенд для тракторов Т-125 (рис. 3.2, 3.3). Стенд имел две подвижные полурамы с 4 барабанами, электросистему постоянного тока на 100 кВт, 4 электромшины постоянного тока, балансирную электромашину МПБ 32,7/28 на 100 кВт, 8 редукторов, 4 КП трактора Т-74 и одну автомобильную, 9 карданных передач, тензоизмерителей, 10 нагрузочных сопротивлений и реостатов, пневмостанцию, управляющую пневмосистему, аналог японского расходомера топлива (счетчик хода поршня с приборами МЭС-54) и последовательную весовую установку с двойной фильтрацией топлива.

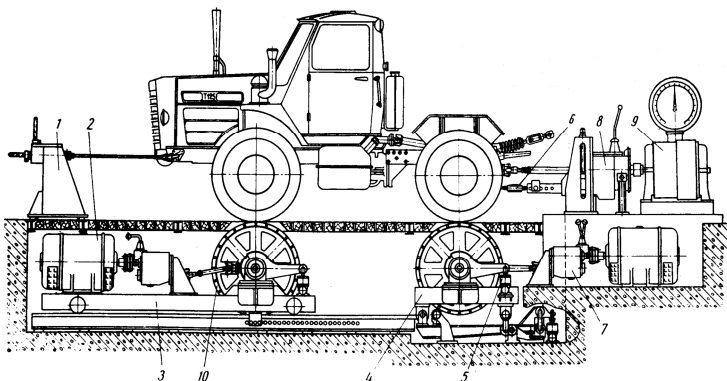


Рис. 3.2. Исследовательский динамометрический стенд для испытаний колесных тракторов 60-х гг. на ХТЗ с установленным на нем трактором Т-125: 1 – причальное устройство; 2 – электрическая тормозная машина; 3, 4 – полурамы передних и задних барабанов; 5 – динамометр; 6 – тензометрическое звено; 7, 8 – КПШ трансмиссии стенда и привода балансирной машины 9 (МПБ 32,7/28); 10 – беговые барабаны

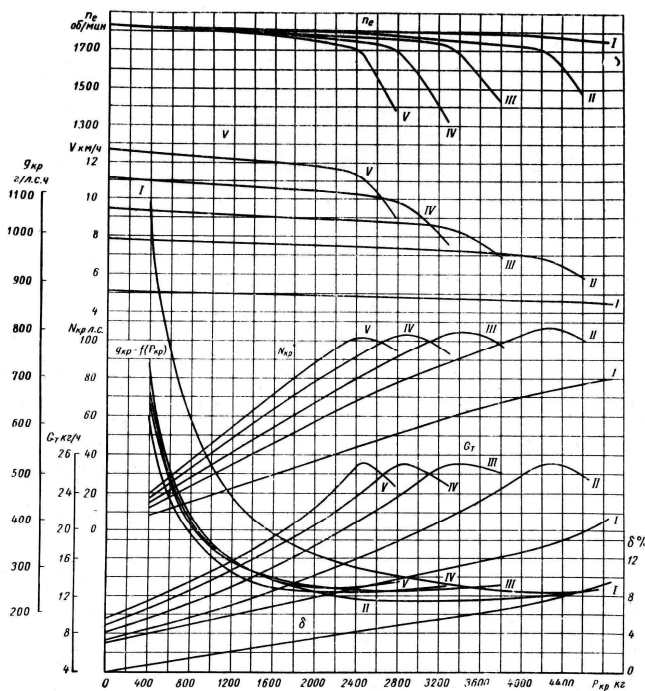


Рис. 3.3. Тяговые характеристики опытного образца трактора Т-125 на исследовательском динамометрическом стенде ХТЗ-ХАДИ (I–V – передачи)

Беговые барабаны диаметром 1206 мм, шириной 1200 мм были облицованы деревом. Масса стенда (без станции постоянного тока) – более 15 т. Барабаны имели независимый привод, автономное управление и могли попарно блокироваться.

Управление стендом содержало системы контроля температур дизеля, агрегатов шасси и приводов стенда, частоты вращения коленчатого вала дизеля, барабанов и колес трактора, тягового усилия, крутящих моментов на валах шасси трактора и на планетарных редукторах, 10 осциллографов и др. Приведенная погрешность контроля расхода топлива – до $\pm 2\%$, а силы тяги – до $\pm 1,5\%$.

Громоздкость, ограниченность параметров, дороговизна, сложность испытаний двумя операторами для диагностических стендов в АПК были неприемлемы.

Анализ отечественных и зарубежных методов и средств испытаний колесных машин показал, что серийный диагностический барабанный стенд для АПК в начале 70-х гг. нужно было разрабатывать заново, заимствуя у аналогов только некоторые решения по критерию минимума совокупной стоимости измерения, трудозатрат и электроэнергии, в то время как погрешности измерений разрабатываемого стенда и аналогов должны быть сравнимы.

При разработке нового диагностического стенда для колесных тракторов КИ-8927-ГОСНИТИ и технологических рекомендаций по его использованию были обобщены результаты многих исследований и прикладных работ по диагностированию тракторов, автомобилей и их ДВС [30, 35, 36].

Обоснование параметров стендов требовало решения следующих задач:

- возможность совмещения на одном стенде противоречивых испытаний по тяговым и тормозным показателям тракторов, отличающихся от автомобилей низкими скоростями движения и высокой силой тяги;

- техническое и технико-экономическое обоснование серийного электропривода;

- теоретическое обоснование нагрузочно-скоростных режимов тяговых и тормозных испытаний;

- теоретическое обоснование метода измерений и конструктивной схемы прибора для непрерывного контроля расхода дизельного топлива на 2–65 л/ч.

Макетный образец стенда был изготовлен Береговским опытно-экспериментальным заводом (БОЭЗ), а смонтирован и испытан – на тракторе тягового класса 5 в Светлоградской СТОТ Ставропольского края (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Макетный образец диагностического стенда для колесных тракторов на СТОТ

При испытании были выявлены конструктивные недостатки двух-барабанного стенда, и для опытного образца совмещенного силового реверсивного тягово-тормозного стенда совместно с конструкторами БФ ЦОКТБ ГОСНИТИ был задан 4-барабанный стенд: привод – на передние барабаны; тяговые испытания на высоких скоростях движения вперед, а тормозные – при вращении колес стендом назад (для натягивания колес на приводные барабаны); отношение диаметра всех барабанов блока приводного к диаметру колес трактора тягового класса 5 – не менее 60 %, в соответствии с этим диаметр барабанов – 580 мм; для тракторов Т-40 с неотключаемым передним мостом в техническом задании (ТЗ) был предусмотрен поставляемый по заказу опорный блок без привода; в системе отсоса ОГ задан 2–5-кратный отбор газов; к стационарному пульту управления задана кнопочная станция дистанционного реверсивного управления приводом и системой отсоса ОГ.

Расходомером топлива в ТЗ задан прибор контроля переменного перепада давления потока топлива на нестандартном сужающем устройстве.

Опытный образец стенда, изготовленный в 1974 г., прошел заводские и приемочные испытания на колесных тракторах классов 5 и 3, был запущен в серийное производство, и к 1978 г. было произведено 306 стендов. Общий вид серийного стенда КИ-8927-ГОСНИТИ приведены на рис. 3.5.



Рис. 3.5. Диагностический стенд для колесных тракторов КИ-8927-ГОСНИТИ (привод открыт для демонстрации устройства стенда)

При заводских и приемочных испытаниях опытного образца стенда на БОЭЗ, при эксплуатационных испытаниях серийных стендов на Богодуховской, Щелковской, Новоград-Волынской и других СТОТ определялся диапазон диагностических параметров тракторов. Полученные данные использовались для обоснования их номинальных и допускаемых значений, внесенных в технологию диагностирования колесных тракторов [117].

С постановкой на производство трактора К-701 в 1985 г. была начата разработка стенда для контроля выходных показателей трактора, на 40 % более мощного и на 12 % более скоростного.

В результате анализа конструктивов и тягово-скоростных параметров трактора К-701 диаметр беговых барабанов в сравнении со стендом КИ-8927-ГОСНИТИ был увеличен до 650 мм, а максимальная скорость испытаний – до 28 км/ч. Вместо системы «сельсин-датчик–сельсин-приемник» задан тензорезисторный силоизмеритель серии ДСТ-400 (4У2.320.396) системы ГСП повышенной точности для измерения крутящего момента на валу электромашины стенда в двигательном и генераторном режимах.

Предусмотрена микропроцессорная система измерения сил на колесах, частоты вращения ротора электромашин для непрерывной индикации тяговой мощности и фиксации максимального ее значения при постепенной загрузке трактора с возможной кратковременной перегрузкой привода стенда.

В ТЗ было задано требование снижения погрешности контроля расхода топлива, а также использован потенциометр для контроля деформации пружины в устройстве для догрузки задних колес

тракторов и контроля сил на тягах навесной системы с выводом измерений на миллиамперметр.

Вместо исходного топливомера 8927.07 из стенда КИ-8927-ГОСНИТИ были заданы разработки расходомеров дизельного топлива (дизтоплива) КИ-8940-ГОСНИТИ (2–20, 10–70 кг/ч) и КИ-8940М-ГОСНИТИ (1–10, 5–20 кг/ч), а также аналогичного расходомера бензина КИ-8943-ГОСНИТИ. Через 10 лет производства топливомера 8927.07 и расходомера КИ-8940-ГОСНИТИ с использованием появившихся возможностей дальнейшего снижения погрешности контроля расхода топлива было разработано ТЗ на усовершенствованные расходомеры дизтоплива КИ-8982-ГОСНИТИ (2–10, 5–30 и 20–60 кг/ч) и бензина КИ-8982-01-ГОСНИТИ (1–5, 3–20 и 10–40 кг/ч).

Для снижения приведенной погрешности измерения расхода с 1,5–2,5 до 0,7–1,5 % при нестандартно малых значениях чисел Рейнольдса с микрорасходами топлива в ТЗ на расходомеры были предложены новые, оправдавшие себя решения, в т. ч. использование диафрагмы со входным, а не с выходным конусом. Оправдало себя и применение в расходомере камерного демпфера пульсаций расхода. Разработка нового стенда на основе опыта эксплуатации первого проводилась с более тщательным учетом требуемых критериев. Например, кроме оптимального отношения диаметра барабанов к диаметру колес машины (0,6–1) требовалось более гарантированно обеспечить условия действия машин на барабанах стенда: надежная устойчивость машины и обеспечение контроля нормативных значений сил при тяговых испытаниях тракторов и при проверке тормозных качеств тракторов; автономный заезд/выезд при застопоренных барабанах.

В конструктивах стенда КИ-8948-ГОСНИТИ и в режимах испытаний тракторов тягового класса 5 вышеприведенные условия были учтены, поэтому при заводских, приемочных и эксплуатационных испытаниях опытного образца стенда устойчивость во всех режимах была подтверждена. А для обеспечения устойчивости трактора тягового класса 3 при тяговых и тормозных испытаниях заднего неотключаемого моста потребовалась догрузка моста догрузочным устройством стенда величиной не менее 500 кгс. Таким образом, проблемы обеспечения надежной устойчивости всех тракторов при тяговых и тормозных испытаниях были разрешены.

Принятые при разработке нового стенда и расходомеров топлива решения достигли цели [30, 35-39], что было подтверждено заводскими и государственными приемочными испытаниями стенда КИ-8948-ГОСНИТИ в 1987 г. и расходомеров топлива КИ-8940 в 1988 г., проведенными предприятием А-1686. Сравнительная характеристика обоих стендов приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Показатели стендов КИ-8927-ГОСНИТИ и КИ-8948-ГОСНИТИ

Показатели	Ед. изм	Стенды	
		КИ-8927	КИ-8948
1. Назначение	–	Контроль выходных параметров колесных тракторов (универсальных пропашных и общего назначения) тяговых классов 0,6; 0,9; 1,4; 3; 5, а также самоходных шасси Т-16, СШ-45 и СШ-75 при ГО-3 и ТР	
2. Тип по методу контроля сил тяги и тормозов, по используемому приводу	–	Барабанный электромашинный реверсивный для проездных и тупиковых постов	
3. Тип электромашин	–	Асинхронная балансирная с фазным ротором АКБ 92-8 УХЛ, управляемая жидкостным реостатом	
4. Количество измерительных каналов	ед.	8	11
5. Измеряемые параметры:			
– тяговые и тормозные силы;	кгс	100–3500	100–1000 и 300–3000
– тяговая мощность на колесах;	л. с.	–	10–100 и 20–200
– расход топлива;	кг/ч	2–20 и 10–70	2–10, 5–30, 20–60
– имитируемая скорость движения;	км/ч	5,5–20,5	6,1–23,3
– токи в бортовой сети тракторов;	А	0–50	0–50 и 0–100
– напряжение в бортовой сети;	В	0–30	0–30
– усилие на навесной системе	кгс	100–2500	500–5000

Показатели	Ед. изм	Стенды	
		КИ-8927	КИ-8948
6. Приведенные погрешности измерений:			
– усилий на колесах;	%	3	2,5
– тяговой мощности;	%	–	3
– расхода топлива;	%	3	2
– усилия на тягах навесной системы;	%	5	3
– силы тока и напряжения;	%	1,5	1,5
– окружной скорости барабанов	%	5	3
7. Установленная мощность	кВт	61	61
8. Максимальная потребляемая мощность	кВт	75	75
9. Генерируемая мощность	кВт	до 110	до 130
10. Габариты приводного блока с электромашинной	мм	5825×1692×780	4600×2000×1400
11. Масса с реостатом, системой отсоса ОГ, догрузочным устройством, топливомером и топливным баком	кг	6500	7300
12. Размеры поста диагностирования	м	7,5×12 или 9×12	6×12, не менее 30 м ²

С помощью стендов в режиме буксировки тракторов, помимо указанного в табл. 3.1, можно запускать дизели, прокручивать их для проверки ЦПГ, гидросистем навесного механизма и рулевого управления.

Стенды КИ-8927-ГОСНИТИ и КИ-8948-ГОСНИТИ, в отличие от автомобильных, совмещали силовой тяговый и силовой тормозной стенды, имели простой и надежный топливомер непрерывного расхода, более информативный для поиска неисправностей систем питания, чем дискретный (10–100 с) весовой расходомер.

По сравнению с первым стендом второй более компактен, пригоден для поста диагностирования 6-метровой ширины, измеряет и фиксирует максимальную величину тяговой мощности, имеет повышенную точность измерений, расширенный диапазон измерений на приборе усилия навесной системы.

Электромагнитные фиксаторы беговых барабанов в обоих стендах исключили громоздкие подъемники и пневмосистему у автомобильных стендов, что упростило конструкции тракторных стендов и уменьшило вес на 500 кг. Но это потребовало нового решения задач обеспечения устойчивости тракторов на стендах при контроле и сил тяги, и тормозов.

Для проверки тормозов колесные тракторы общего назначения тяговых классов 3 и 5 устанавливали на приводной блок поочередно обоими мостами, при проверке тягово-экономических качеств – одним постоянно включенным ведущим мостом. Колесные тракторы Т-40А, Т-40АМ, «Беларус-82» с неотключаемыми передними ведущими мостами устанавливали передними колесами на опорный блок.

Перед проверкой тягово-экономических показателей выключают непостоянно включаемый ведущий мост, подсоединяют расходомер топлива, систему отсоса ОГ и трос догрузочного устройства к тягам навесной системы. Провода контроля электрооборудования стенда присоединяют к контрольным точкам электрооборудования трактора, устанавливают упорные башмаки под невращающиеся колеса. Далее пускают и прогревают дизель, определяют потребность дизеля и агрегатов шасси в профилактике или ремонте, контролируют и доводят до нормы тягово-экономические и другие выходные/функциональные показатели трактора, обуславливающие его производительность и безопасность работы.

При тяговых испытаниях устанавливают такой скоростной режим, при котором частота вращения ротора электромашини приближена к двойной синхронной частоте (1500 мин^{-1}), но не превышает ее. Таким образом обоснованы промежуточные режимы транспортных скоростей для тяговых испытаний и малые скорости при контроле тормозов. Это предотвращает перегрузку электромашини по крутящему моменту, обеспечивает повышенную устойчивость трактора на беговых барабанах и умеренный износ шин при повышенных силах тяги и торможения колес.

Например, для колесного трактора общего назначения тягового класса 5 выбрана транспортная передача IV-2 (скорость 23,3 км/ч против 20,8 км/ч на стенде КИ-8927-ГОСНИТИ). Для колесного трактора общего назначения тягового класса 3 – транспортная передача III-3 (скорость 22 км/ч против 18,62 км/ч на стенде), что упростило контроль тяговых качеств этого трактора, имеющего облегченный неотключаемый задний мост. Для остальных тракторов приняты максимальные транспортные скорости (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Режимы тяговых испытаний тракторов на стендах (1 кгс = 9,80665 Н)

Тракторы	КИ-8927-ГОСНИТИ			КИ-8948-ГОСНИТИ		
	Передача	Скорость, км/ч	Сила тяги, кгс	Передача	Скорость, км/ч	Сила тяги, кгс
К-703	13	18,5	—	14	22,4	—
К-701	13	19,4	2750	14	23,3	2200
К-700А	14	20,8	2200	14	20,8	2200
К-700	13	18,0	2070	14	21,9	1600
Т-150К	5	18,62	1905	7	22,00	1580
МТЗ-80/82	8	17,95	600	8	17,95	600
МТЗ-80Х	8	17,4	600	8	17,4	600
МТЗ-50/52	8	13,85	600	8	13,85	600
МТЗ-50Х	8	14,3	600	8	14,3	600
ЮМЗ-6Л	9	19,0	430	9	19,0	430
Т-40М, АМ	5	20,96	225	5	20,96	225
Т-40АНМ	5	18,9	265	5	18,9	265
Т-28Х4М	6	15,5	623	6	15,5	623
Т-25А	6	21,9	106	6	21,9	106
Т-16М	5	16,4	100	6	23,3	100

Длительность полной проверки трактора на стенде не превышает 2 ч, а проверки тягово-экономических показателей – не более 15 мин.

Стенды КИ-8927-ГОСНИТИ и КИ-8948-ГОСНИТИ не обеспечивают контроль тяговых качеств более мощных тракторов (свыше тягового класса 5), а некоторые универсальные тракторы тяговых классов 1,4 и 3 требуют обязательной догрузки задних мостов усилием на гидронавесной системе величиной не менее 500 кгс.

Конструкция стенда КИ-8948-ГОСНИТИ упрощает тяговые испытания, т. к. при постепенной загрузке трактора фиксируется максимальная тяговая мощность. Кратковременная (до 0,5 мин) проверка на этом заканчивается.

На основании результатов приемочных испытаний стенда КИ-8948-ГОСНИТИ, выполненных в сентябре 1988 г. предприятием А1686 государственной аттестационной комиссией, диагностический стенд для колесных тракторов КИ-8948-ГОСНИТИ, изготовленный Береговским опытно-экспериментальным заводом диагностического

и гаражного оборудования УССР, аттестован по высшей категории качества с обозначением государственного Знака качества.

Условия диагностирования и тяговые показатели колесных тракторов на стендах отличаются от режимов и показателей при заводских, приемочных и контрольных испытаниях тракторов на треках или полях. Эти режимы близки, но на стенде трактор неподвижен, а неведущий или не постоянно включаемый мост не работает, поэтому сила тяги и тяговая мощность тракторов на стендах заметно выше.

Опыт эксплуатации первых стендов КИ-8927-ГОСНИТИ показал также необходимость уточнения нормативов тормозных сил и усилий на навесной системе тракторов «Кировец». Были проведены дополнительные исследования тяговых и тормозных качеств тракторов на обоих стендах.

После заводских и приемочных испытаний в 1977 г. стенда КИ-8948-ГОСНИТИ перед постановкой его на производство были уточнены номинальные и допускаемые значения следующих параметров:

- тяговой мощности N_k тракторов на барабанах стенда;
- часового расхода топлива G_m при максимальной тяговой мощности тракторов;
- тормозных сил P_T на колесах тракторов;
- усилий $P_{нав}$, развиваемых гидронавесной системой.

Обоснование допускаемых в эксплуатации отклонений эффективной мощности тракторных дизелей проведено по методике прогнозирования и оптимизации допускаемых значений диагностических параметров состояния машин, разработанную В. М. Михлиным [76].

Внедрение стендов сопровождалось разработкой и изданием серии справочных материалов ГОСНИТИ и рекомендаций по рациональной организации и технологии диагностирования тракторов с помощью стендов КИ-8927-ГОСНИТИ и КИ-8948-ГОСНИТИ [34, 39, 101, 108, 107, 116].

Технико-экономическая эффективность диагностических стендов для колесных тракторов определяется следующими показателями:

- снижением трудоемкости диагностирования машин по сравнению с контролем без стенда (по данным английской фирмы «Криптон», общая диагностика автомобилей на стенде занимает до 5 мин, а в дорожных условиях – 30-60 мин; проверка тормозных и тяговых качеств колесных тракторов и определение расхода топлива на стендах КИ-8927-ГОСНИТИ и КИ-8948-ГОСНИТИ также занимает не более 5 мин);
- эффективностью улучшения эксплуатационных показателей (мощность, экономичность, производительность, эксплуатационные

расходы), а также надежности работы и безопасности движения машин после регулировки на стендах.

Таким образом, разработка стендов для диагностирования колесных тракторов КИ-8927-ГОСНИТИ и КИ-8948-ГОСНИТИ была удовлетворительной, а аттестация стенда КИ-8948-ГОСНИТИ по высшей категории качества – обоснованной.

Применение указанных стендов на практике позволило контролировать выходные функциональные показатели энергонасыщенных колесных тракторов и повысить культуру их ТО, надежность и безопасность движения.

Разработанные методики и установленные на их основе нормативы диагностирования тракторов могут использоваться и в современных условиях. Для оценки выходных параметров современных, особенно импортных, колесных тракторов целесообразно сочетать контроль по прямым и косвенным методам на основе различных физических (электрических, магнитных, оптических, акустических, тепловых и комбинированных) методов, а также использовать встроенные средства диагностирования.

В настоящее время для диагностического контроля выходных параметров тракторов применяют стенды, к которым посредством вала отбора мощности подключаются дизели. На рынке появились электрические динамометры марки ОТС российского производства [47] (рис. 3.6), а также модернизированные стенды чешского производства MEZSERVIS Vsetin [151] (рис. 3.7). Достоинством этих стендов является то, что они позволяют производить обкатку и испытания двигателей на любых режимах.

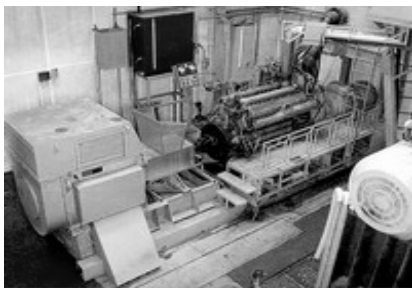


Рис. 3.6. Стенд ОТС

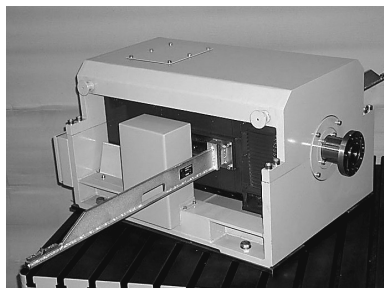


Рис. 3.7. Динамометр MEZSERVIS Vsetin

Недостатки всех электрических обкаточно-тормозных устройств – дороговизна, большие габариты и вес, а также потребление значительного количества электроэнергии, т. к. на них установлены электробалансирные машины большой мощности. Например, стенд КИ-2139БГ весит 2000 кг и требует для размещения площадь около 30 м².

Известны также гидравлические нагружающие устройства (рис. 3.8, 3.9), содержащие корпус, ротор с валом внутри корпуса, подводящие и отводящие трубы и систему регулирования момента [47, 150].



Рис. 3.8. Гидравлический тормоз фирмы Horiba

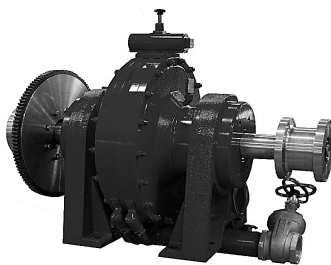


Рис. 3.9. Гидродинамический тормоз фирмы «МИКС Инжиниринг»

В 2017 г. на Международной выставке сельскохозяйственного оборудования «Agritechnica 2017» в г. Ганновере (Германия) демонстрировался передвижной тормозной стенд с вихрековым тормозом (рис. 3.10) [96].



Рис. 3.10. Передвижной тормозной стенд ZW 500 с вихрековым тормозом

Стоимость такого стенда превышает 120 тыс. евро, что дорого и недоступно для отечественных предприятий. Кроме того, вихрековый тормоз при малых габаритах и весе имеет большой недос-

татов: при его использовании не представляется возможным утилизировать энергию торможения.

В БГАТУ был разработан тормозной стенд [96] для испытания двигателей через вал отбора мощности (рис. 3.11). Работа устройства основана на использовании дросселирования потока жидкости через отверстие постоянного сечения аксиально-плунжерным гидронасосом.

Измерение нагрузки на валу ДВС может осуществляться по давлению в напорной и сливной магистралях (зависимость (3.1)) либо с помощью датчика крутящего момента (ДКМ) М40 (рис. 3.12), установленного на вал отбора мощности (ВОМ) трактора:

$$M_{\text{н}} = 0,126K \frac{d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p^3 (1 + \beta_{\text{т}}(T - T_1))}{\rho_1}}}{n}, \quad (3.1)$$

где K – коэффициент взаимовлияния; d – диаметр дросселя, м; Δp – перепад давления на дросселе, Па; $\beta_{\text{т}}$ – коэффициент объемного расширения, K^{-1} (для минеральных масел $\beta_{\text{т}} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$); T – температура жидкости в момент снятия показаний, К; ρ_1 – плотность жидкости при температуре T_1 (для минеральных масел $T_1 = 293 \text{ K}$), кг/м^3 ; n – частота вращения вала насоса, с^{-1} .



Рис. 3.11. Стенд для испытания двигателей тракторов:
1 – заднее навесное устройство трактора;
2 – карданная передача



Рис. 3.12. Датчик крутящего момента М40

Небольшие габариты и вес аксиально-плунжерных насосов и других комплектующих этого устройства, а также простота кон-

струкции позволяют изготовить его в прицепном варианте, буксируемом микроавтобусом или малотоннажным грузовиком, в которых могут быть размещены различные диагностические средства.

3.3. Средства контроля топливно-энергетических показателей автотракторных дизелей

Расход топлива G_T – один из важнейших показателей не только экономичности двигателей, но и технического состояния топливной аппаратуры, цилиндрико-поршневой группы и газораспределительного механизма ДВС. Удельный эффективный расход топлива g_e (г/л. с.·ч или г/кВт·ч) контролируют:

- при определении мощности ДВС согласно ГОСТ 18509 по испытанию тракторных и комбайновых дизелей;
- аналогично при испытании автомобильных ДВС по ГОСТ 23465;
- при диагностировании автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных, строительных и дорожных машин по ГОСТ 25044;
- при диагностировании дизелей тракторов, комбайнов по ОСТ 23.1.54–80.

Массовый расход топлива стоит одним из первых в перечне функциональных параметров по ГОСТ 20760–75 «Техническая диагностика. Тракторы. Параметры и качественные признаки технического состояния».

В целом широкий контроль расхода газов и жидкостей применяется с начала XX в., известна целая гамма расходомеров – более 50 типов. При заводских испытаниях ДВС обкаточно-испытательные станции моторных заводов имели преимущественно расходомеры на основе торговых весов. Они же использовались и на ремонтно-механических заводах.

В зарубежной испытательной и ремонтной практике также были известны различные весовые расходомеры. Они имели недостаточную точность, поэтому в ГОСНИТИ с начала 70-х гг. предприняли несколько попыток создать более точные объемные расходомеры: колокольный непрерывных показаний, а также с мерной емкостью и измерением времени расхода из нее топлива. Однако колокольный расходомер оказался принципиально ошибочным, а расходомер с мерной емкостью из-за сложности конструкции не имел преимуществ перед весовыми расходомерами.

Известен и ряд других разработок, однако так и не было создано достаточно простой, удобной и в то же время надежной конструкции расходомера, пригодной для широкого применения. Распространены всевозможные мерные бачки или мерные сосуды с тарированной емкостью, расходование некоторого объема топлива из которых определяется по ручному секундомеру или секундомеру, встроенному в оснастку мерного сосуда.

В работах профессора Н. Я. Говорущенко по диагностированию автомобилей была предложена схема расходомера ХАДИ, приведенная на рис. 3.13 [17]. Прибор включает дозирующее устройство с поршеньком (датчик расхода топлива – ДРТ), группу из 4 электромагнитных клапанов, 4 электронных блока, 2 цифровых индикатора и манометр давления топлива на входе в прибор. Один цифровой счетчик регистрирует количество израсходованного за 3 мин топлива (до 10 л). Другой счетчик фиксирует время потребления двигателем дозы топлива (мин/л). Эта единица измерения в современных приборах не используется [60].

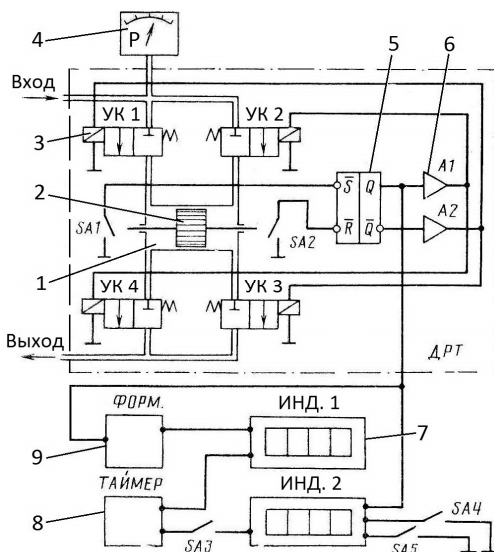


Рис. 3.13. Принципиальная схема поршневого расходомера топлива ХАДИ: 1, 2 – поршеньковый датчик расхода; 3 – группа из 4 электромагнитных клапанов; 4 – манометр давления топлива на входе в расходомер; 5, 6, 8, 9 – электронные блоки расходомера; 7 – цифровые индикаторы израсходованного количества топлива и величины, обратной текущему (мгновенному) значению расхода

Подобная схема была реализована в конце 70-х – начале 80-х гг. в расходомерах ЦМИС и СевКавМИС (приборы ИП-60 и серия их аналогов для нужд МИС АПК), а в 80-е г. – в венгерских расходомерах EUF-40 и EUF-80. Все эти приборы появились позже серийного производства топливомера 8927.07 БФ ЦОКТБ ГОСНИТИ. Недостаток этих расходомеров – высокая чувствительность даже к незначительным загрязнениям топлива.

Необходимость контроля расхода топлива усилилась и с появлением нетрудоемкого и достаточно достоверного метода экспресс-контроля топливной экономичности автотракторных дизелей [11], предложенного кандидатом технических наук В. И. Бельских (а. с. СССР № 521480), разработанного на основании анализа статистики тормозных испытаний автотракторных дизелей на центральной МИС и экспериментально уточненного В. А. Чечетом [131].

Сущность метода состоит в том, что с изменением состояния дизеля и атмосферных условий зависимость расхода топлива G_T от мощности дизеля N_e (рис. 3.14) с достаточной для эксплуатационного контроля точностью поднимается эквидистантно (параллельно).

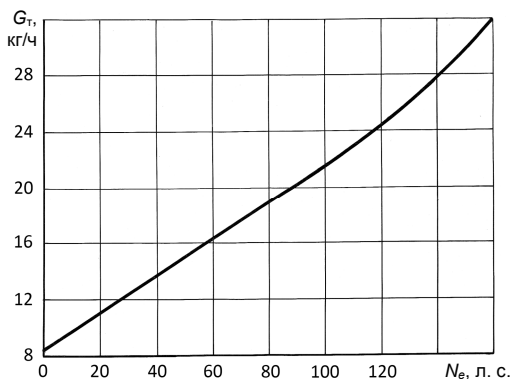


Рис. 3.14. График зависимости расхода топлива дизеля с турбонаддувом с непосредственным впрыском топлива (номинальная мощность – 128 кВт) от его эффективной мощности при $G_{ТХ} = 8,5$ кг/ч

Эквидистантность позволяет по расходу топлива определять N_e и g_e :

$$N_e = K_2 \sqrt{(G_T - G_{ТХ}) / K_1},$$

$$g_e = 1000 G_T / K_2 \sqrt{(G_T - G_{ТХ}) / K_1}, \quad (3.2)$$

где G_t , $G_{тх}$ – расходы топлива дизелем при номинальной мощности и при номинальной частоте вращения коленчатого вала на холостом ходу соответственно; K_1 , K_2 – постоянные, близкие для дизелей одного типа.

Метод В. И. Бельских [11] позволяет с достаточной для эксплуатационного контроля точностью безнагрузочно контролировать при номинальной мощности g_e автотракторных дизелей только по значениям расхода топлива при номинальной частоте вращения холостого хода. При этом даже нахождение значения $G_{тх}$ в допустимом диапазоне свидетельствует о допустимом значении топливной экономичности дизеля в целом.

Описанный метод ГОСНИТИ [11] отработан на большом числе марок дизелей, а его нормативные показатели утверждены на ведомственном уровне [70]. Данный метод требует расходомера топлива с приведенной погрешностью не более 2,5 %.

Анализ серийных в 70–80-е гг. расходомеров топлива для автотракторных ДВС показал следующие недостатки:

- весовые расходомеры не дают непрерывные показания, что важно при испытаниях для определения значений расхода по мере загрузки ДВС;

- ротаметры непригодны для автотракторных ДВС вследствие неустранимых колебаний поплавка ротаметра из-за пульсирующего характера потока топлива;

- немногие другие уникальные установки на непрерывные расходы топлива, например в НАТИ, сложны и дорогостоящи, а их серийное вневедомственное производство отсутствует.

В целом в СНГ для автотракторных ДВС после 1980 г. были известны 8 типов приборов, в т. ч. те, что поставлялись из ВНР, НРБ, ЧССР и Японии [30, 35, 36, 39, 40, 60]. Всем им были присущи те или иные недостатки, описанные выше, и проблема расходомерии дизельного топлива и бензинов для диагностирования автотракторных ДВС в начале 70-х гг. решена не была.

Измерение расхода топлива автотракторных ДВС осложнялось малыми его величинами (микрорасходами, 1–10 г/с), тогда как в промышленной практике они составляют более 1 м³/ч, где для расходомеров переменного перепада давления метрологически корректно использовать диаметры потоков более 50 мм, а сужающего устройства – более 12,5 мм. Но топливопроводы низкого давления дизелей имеют внутренний диаметр 8 мм, т. е. меньше минималь-

ного диаметра стандартного сужающего устройства. Минимальное же число Рейнольдса (Re) для стандартных сужающих устройств при метрологической корректности измерения расхода составляет $1,2 \times 10^4$, а при расходах дизтоплива в автотракторных дизелях – лишь 27–1200, т. е. как минимум на порядок меньше.

Итого при классической проработанности расходомерии с сужающими устройствами их непосредственное применение было невозможным. В целом на начало 70-х гг. практических расходомеров топлива непрерывных показаний для диагностирования МТП в АПК и автомобилей не было и остро стояла задача их разработки.

Ближайший аналог по образцам газовых реометров (рис. 3.15) впервые был схематично апробирован в 50-е гг. в НАМИ, но из-за нестабильности показаний, большой погрешности и нелинейности шкалы измерений дальнейшего развития не получил.

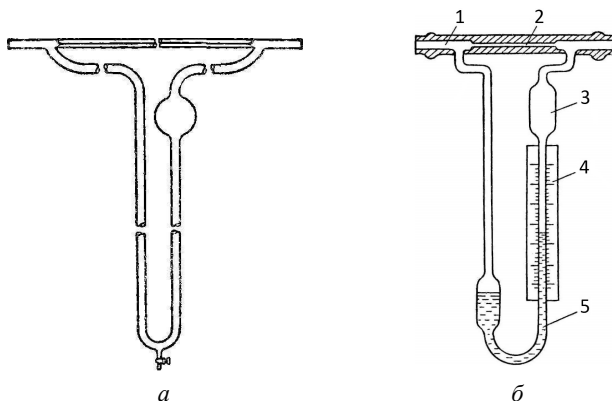


Рис. 3.15. Реометры 50–60-х гг. как расходомеры газов:

- a* – по данным А. С. Скобло; *б* – по данным П. П. Кремлевского:
 1 – канал подачи газа; 2 – капилляр, вместо которого возможна установка диафрагмы; 3 – камера сбора аварийного выброса пьезометрической жидкости (вода, спирт, керосин); 4 – шкала измерения перепада давления пьезометрической жидкости, градуируемая в единицах расхода, обычно в л/мин (по ГОСТ 9932–61); 5 – минусовое колено реометра

Реометры с диафрагмой имели диапазон от 0–4 до 0–160 л/мин с капилляром до 1 л/мин, а приведенную погрешность в диапазоне 30–100 % расхода – до 2 %. Для них справедливо классическое уравнение расхода по расходомерии с сужающими устройствами

$$Q = \alpha F \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (3.3)$$

где F – поперечное сечение потока в сужающем устройстве, м;
 ΔP – перепад давления на сужающем устройстве расходомера, Па;
 ρ – плотность жидкости или газа, кг/м³; α – коэффициент расхода,
 функция числа Re (критерий перехода ламинарного течения в турбулентное):

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}; \quad (3.4)$$

где v – скорость потока, м/с; d – диаметр отверстия сужающего устройства, м; η – динамическая вязкость жидкости или газа.

Приняв во внимание реометры и попытку НАМИ, лаборатория диагностики МФ ГОСНИТИ совместно с Береговским филиалом ЦОКТЬ ГОСНИТИ в 1970 г. создала макетный образец реометра как прибора А. И. Петрова (по характеристике ведущего специалиста по расходомерии в СССР П. П. Кремлевского [60]). По результатам испытаний макет был неудачным из-за большой погрешности измерений, нелинейности шкалы расхода и нестабильности показаний при постоянном расходе. Недостатки можно было устранить точным выполнением требований расходомерии и изготовлением прибора в точном машиностроении с ювелирной градуировкой. Учитывались следующие особенности реометров: простота конструкции, отсутствие подвижных частей и дефицитных материалов, возможность производства на обычном машиностроительном заводе, возможность отхода от стандартного использования без калибровки путем подбора диаметров потоков, диаметров сужающих устройств и индивидуальной градуировки приборов.

Другое реализованное преимущество – возможность замены дифманометров ДМ, ДМР U-образным с пьезометрической жидкостью, т. е. дифманометром с видимым уровнем пьезометрической жидкости, как прибор А. И. Петрова [60].

При разработке прибора учтено, что массовый Q_m (кг/с) и объемный Q_o (м³/с) расходы на стандартном сужающем устройстве определяются классическими формулами:

$$Q_m = \alpha \varepsilon (\pi d^2 / 4) \sqrt{2} \Delta P \rho, \quad (3.5)$$

$$Q_o = \alpha \varepsilon (\pi d^2 / 4) \sqrt{2} \Delta P / \rho, \quad (3.6)$$

где ε – поправка на расширение измеряемой среды, для дизтоплива $\varepsilon = 1$.

В последних редакциях формул (3.4–3.5) величина $\alpha \varepsilon$ обозначается и как коэффициент истечения C .

Приборы переменного перепада давления составляют $2/3$ мирового парка расходомеров, но согласно уравнениям (3.3, 3.5 и 3.6) имеют нелинейную зависимость расхода от перепада давления, что осложняет их применение.

При разработке диагностического стенда для колесных тракторов КИ-8927-ГОСНИТИ на основании изложенного в ТЗ и с учетом требований «Правил 28-64» были заданы и особые условия к расходомеру-реометру на 2–20 и 10–60 кг/ч при числах Рейнольдса, меньших на порядок стандартных:

- диафрагма – со входным, а не с выходным конусом;
- наличие камерного (воздушного) демпфера пульсаций потока;
- шероховатость внутренних поверхностей топливопроводов – не более 0,32 мкм;
- материалы деталей протока топлива в приборе – латунь, используемая в приборостроении;
- длина шкалы расходомера – не менее 500 мм;
- длина прямолинейных участков у сужающих устройств – не менее $6D$ (D – диаметр потоков);
- приведенная погрешность измерений – не более 3 %;
- габариты и масса – ориентировочно 400×150×1000 мм и 10 кг;
- емкость топливного бака – 100 л;
- наличие фильтра тонкой очистки топлива между баком и самим прибором.

На основании разработанных в ТЗ требований лаборатории № 24 в БФ ЦОКТБ ГОСНИТИ и на БОЭЗ к стенду КИ-8927-ГОСНИТИ была создана установка топливомера 8927.07, прошедшая заводские и приемочные испытания, а через несколько лет удачного серийного апробирования она была переоформлена в самостоятельное товарное изделие – расходомер КИ-8940-ГОСНИТИ. Его характеристики приведены в табл. 3.3 и на рис. 3.16.

Таблица 3.3

Параметры расходомера дизельного топлива КИ-8940-ГОСНИТИ

Показатель	Ед. изм.	Значение
Класс точности	%	3
Диапазоны измерения	кг/ч	2–20 и 10–70
Диаметр условного прохода топливопроводов	мм	8
Напор топлива при входе в поплавковую камеру	мм	850–1400
Диапазон температуры топлива	°С	10–35
Время установления режима измерений, не более	с	6
Габаритные размеры:		
– расходомера	мм	346×140×550
– расходомера с принадлежностями	мм	850×255×2125
Масса:		
– расходомера	кг	9
– расходомера с принадлежностями	кг	52
Наработка на отказ	ч	2000
Средний срок службы	лет	8
Количество обслуживающего персонала	чел.	Диагност в кабине трактора

По образцу расходомера КИ-8940-ГОСНИТИ через 10 лет был разработан и расходомер бензина КИ-8943-ГОСНИТИ, т. к. в 80-х гг. приемлемых серийных расходомеров бензина не было, что еще раз подтверждает сложность их разработки, а контроль непрерывного расхода бензина в диагностике автомобилей запоздал по сравнению с контролем дизтоплива в диагностике тракторов на 10 лет.

При содействии Ужгородского машиностроительного завода Министерства приборостроения СССР было повышено качество расходомеров и на основании ГПИ, проведенных предприятием А-1686 в сентябре 1986 г., расходомеры КИ-8940-ГОСНИТИ, КИ-8943-ГОСНИТИ производства БОЭЗ были аттестованы по высшей категории качества и внесены в Государственный реестр средств измерений (№ 10730-86).

Расходомеры подлежали обозначению государственным Знаком качества в установленном порядке (решение государственной аттестационной комиссии, зарегистрированное в Госкомитете СССР по стандартам 25.12.1986, № 105017385).

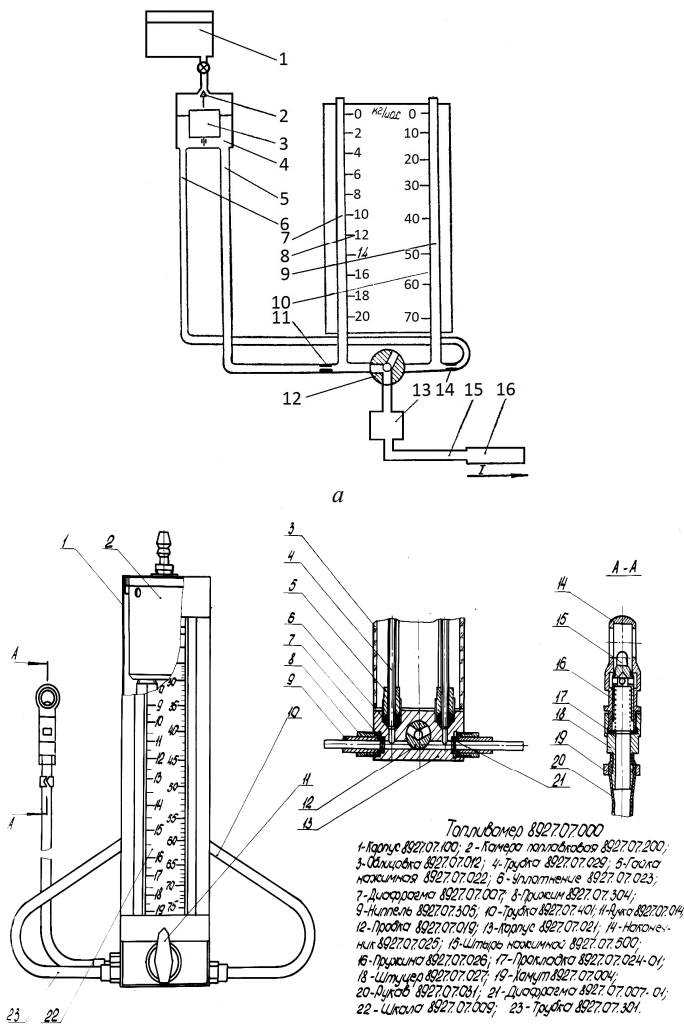


Рис. 3.16. Расходомер КИ-8940-ГОСНИТИ:

- a* – схема гидравлическая; *б* – конструктивное исполнение прибора;
 1 – бак; 2 – клапан запорный поплавковой камеры; 3 – поплавок;
 4 – камера поплавковая; 5, 6 – латунные трубки подвода топлива к диафрагмам;
 7, 9 – стеклянные трубки дифманометров; 8, 10 – шкалы; 11, 14 – диафрагмы-преобразователи расхода в перепад давления; 12 – кран-переключатель диапазонов; 13 – демпфер пульсаций забора топлива в дизель;
 15 – рукав к двигателю; 16 – наконечник-кран запорный

По ТЗ лаборатории № 24 в 1985 г. БФ ЦОКТБ ГОСНИТИ модернизирован расходомер КИ-8940-ГОСНИТИ и проведены заводские и приемочные испытания:

– расходомера КИ-8940М-ГОСНИТИ (рис. 3.17) на диапазоны измерения 1–10 и 5–20 кг/ч с приведенной погрешностью $\pm 1,5\%$ для реализации бестормозного метода контроля мощности В. И. Бельских по а. с. СССР № 521480;

– расходомер КИ-8940У-ГОСНИТИ с емкостью для дизтоплива на 3 л;
– переносной расходомер КИ-8955-ГОСНИТИ, ТУ 70.0001.846–82, на диапазоны 1–12, 5–40 и 10–65 кг/ч, приведенная погрешность – до 2% (рис. 3.18).

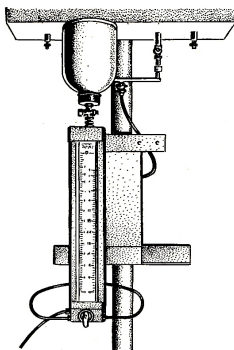


Рис. 3.17. Расходомер КИ-8940М на диапазоны 2–10 и 5–20 кг/ч

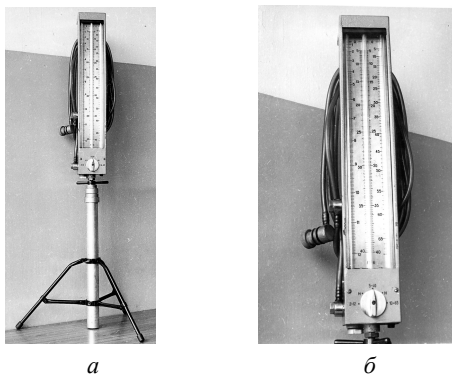


Рис. 3.18. Трехдиапазонный (2–12, 5–40 и 10–65 кг/ч) расходомер топлива КИ-8955-ГОСНИТИ с основной погрешностью измерения до 2%:

а – внешний вид в сборе; *б* – приборная головка

Для обеспечения служб диагностики более точными расходомерами с внесением в Госреестр средств измерений расходомер КИ-8940-ГОСНИТИ, выпускавшийся в течение 10 лет, и КИ-8943-ГОСНИТИ по ТЗ лаборатории № 24 были доработаны. На их базе были созданы:

- расходомер дизельного топлива КИ-8982-ГОСНИТИ на диапазоны 2–10, 5–30 и 20–60 кг/ч с пределом допускаемой приведенной погрешности $\pm 2\%$;

- расходомер бензина КИ-8982-01-ГОСНИТИ на диапазоны 1–5, 3–20 и 10–40 кг/ч с пределом допускаемой приведенной погрешности $\pm 2\%$.

Указанные расходомеры в сентябре 1988 г. прошли ГПИ, проведенные предприятием А-1686, и было решено:

- диафрагменные расходомеры топлива КИ-8982-ГОСНИТИ и КИ-8982-01-ГОСНИТИ утвердить и внести в Госреестр средств измерений;

- разрешить Береговскому опытно-экспериментальному заводу Госагропрома УССР серийное производство и выпуск в обращение диафрагменных расходомеров топлива КИ-8982-ГОСНИТИ и КИ-8982-01-ГОСНИТИ;

- представить диафрагменные расходомеры топлива КИ-8982-ГОСНИТИ и КИ-8982-01-ГОСНИТИ на высшую категорию качества в установленном порядке;

- после освоения производства расходомеров КИ-8982-ГОСНИТИ и КИ-8982-01-ГОСНИТИ снять с производства и исключить из Госреестра расходомеры КИ-8940-ГОСНИТИ и КИ-8943-ГОСНИТИ.

Расходомер КИ-8940-ГОСНИТИ и его модернизация КИ-8982-ГОСНИТИ – самые простые и дешевые (их производство доступно обычному машиностроительному предприятию).

Анализ тенденций развития расходомеров в настоящее время показывает упрощение их механической части, но повышение ее точности и все большее насыщение микропроцессорами, что существенно расширяет их функции. В связи с этим необходимо отметить недостатки разработанных ГОСНИТИ расходомеров:

- большие размеры и металлоемкость;

- необходимость в собственном топливном баке, что обуславливает стационарность применения, хотя были разработаны и портативные модификации КИ-8940М-ГОСНИТИ, КИ-8940У-ГОСНИТИ, КИ-8955-ГОСНИТИ;

- поплавковая камера не обеспечивает высокую стабильность исходного (нулевого) давления топлива перед сужающим устройством.

Совершенствование расходомеров КИ-8982-ГОСНИТИ возможно путем:

- применения в поплавковой камере золотникового запорного устройства;
- подвески шкалы расходомера на поплавок поплавковой камеры (а. с. № 1654660, расходомер топлива переменного перепада давления для тракторных, комбайновых и автомобильных двигателей, авторы – А. В. Дунаев, Ю. А. Ефимов, А. Г. Линецкий, Е. И. Мотылка, А. С. Дацко);
- градуировкой шкал расходомера в объемных единицах, что позволит исключить погрешность измерения от вариации плотности топлива. Так как дифманометр измеряет перепад давления на диафрагме $\Delta P = \Delta h\rho$, то при переходе на объемное измерение имеем:

$$Q_o = CF \sqrt{\frac{2\Delta h\rho}{\rho}} = CF\sqrt{2\Delta h}, \quad (3.7)$$

где вариация плотности топлива на погрешность измерения не влияет, а прибор становится универсальным – для дизельного топлива и бензина. Отпадает дополнительная погрешность измерений от вариации температуры топлива и несоответствия плотности контролируемого топлива плотности градуировочной жидкости, расширяется температурный диапазон нормальной работы расходомера.

В конце 90-х – начале 2000-х гг. стали выпускаться универсальные широкодиапазонные образцовые камерные (ролико-лопастные по терминологии разработчика) расходомеры и счетчики количества жидкостей и газов. Их основа – измерительные преобразователи (датчики) расхода по документации кандидата технических наук В. В. Домогацкого (Московский лесотехнический институт) типа ОР и РЛГ (рис. 3.19).



Рис. 3.19. Датчики В. В. Домогацкого расходомеров Московского лесотехнического института (ОР-2, ОР-40, ОР-400, РЛГ-100 и РЛГ-1000) и вторичный прибор МС-75

Широкодиапазонные датчики ОР и РЛГ отличаются высокой точностью, чувствительностью даже к капельным расходам, малой инерционностью роликов-роторов, долговечностью и надежностью, т. к. в них исключено трение скольжения деталей, они не требуют переградуировки в течение длительного времени, работают в диапазоне вязкостей измеряемых сред от 0,1 до 200 сСт. Датчики ОР и РЛГ в прецизионном исполнении повышенной точности могут использоваться в качестве образцовых (эталонных) метрологических средств и заменять собой сложные и дорогостоящие стенды и образцовые (баковые или трубопоршневые) установки.

Датчики комплектуются вторичным прибором МС-75, который регистрирует расход газов/жидкостей в л/ч или л/с, запоминает общий расход сред, прошедших через датчики, время работы, разность расходов двух датчиков.

Отличительные особенности датчиков серии ОР (РЛГ):

- диапазон расхода жидкостей – 0,0875–5000 л/мин (0,7–70 л/мин);
- рабочее давление 2,5–30 МПа (до 10 МПа);
- требуемая тонкость фильтрации измеряемой среды – не хуже 15–20 мкм;
- предел допускаемой относительной погрешности – 0,10–0,25 %;
- габариты, $L \times D$ – от 79×83 до 650×340 мм (148×92 мм);
- масса – от 0,4 до 60 кг (1,5 кг);
- вязкость измеряемой среды – от 0,1 до 200 сСт;
- регистрация величин расхода – вторичными приборами серии МС-75 исполнений 0, 1, 2, 3, А или счетчиком объема марки СЭ-261.

На основе макетного образца датчика ОР-40 в начале 90-х гг. кандидат технических наук В. А. Чечет в ГОСНИТИ создал макетный образец расходомера КИ-12964-ГОСНИТИ.

Возможно применение датчика ОР-100/6 (диапазон расходов – 1,2–11 м³/ч или 20–183 л/мин, предел допускаемой погрешности – 0,25/0,5 %) для контроля картерных газов автотракторных ДВС. Для сохранения работоспособности датчика требуется фильтр-демпфер для освобождения картерных газов от паров воды и масла, а для сохранения паспортной точности измерений необходимо привести в фильтре-демпфере параметры потока газов к нормальным условиям по ГОСТ 2939 ($T = 293$ К, $P = 103,32$ кПа).

В АТП СП «Эрдэнэт» два датчика В. В. Домогацкого ОР-2 и ОР-40 с прибором МС-75 были проверены на стенде КИ-15716-ГОСНИТИ для испытания топливного насоса высокого давления (ТНВД)

с помощью мерника образцового III разряда. Выявлено абсолютно полное совпадение расхода 10 дм^3 по прибору МС-75 с мениском топлива на риске мерника.

Используя датчики ОР и РЛГ, Минское СКБ «Камертон» повторило разработку расходомеров топлива со своим вторичным прибором для многих отраслей промышленности Беларуси, а Московский институт инженеров транспорта взял внедрение расходомеров ЗАО «МЦ-Восток» на железнодорожном транспорте России под свой полный контроль.

Практика контроля и восстановления топливной экономичности автотракторных дизелей показала, что основными факторами приживаемости расходомеров у диагностов являются: надежность и стабильность длительной работы; стойкость к загрязнениям в топливе; малая трудоемкость и удобство присоединения расходомера; отсутствие течи топлива в соединениях расходомерной установки.

Присоединение расходомеров (кроме весовых) к системе топливоподачи автотракторных дизелей для повышенной точности контроля требует перекрытия магистрали перепуска топлива из фильтра тонкой очистки (ФТО) и ТНВД в бак машины, т. к. измерение потока эмульсии в магистрали перепуска – сложная, требующая применения дегазаторов, и так и не решенная задача. Например, попытки НАТИ учесть этот перепуск выливались в создание сложных стационарных установок, а в ЦОКТБ ГОСНИТИ эта попытка успеха не имела совсем. Во Франции и в других странах Европы для контроля расхода дизтоплива также неоднократно создавались сложные расходомерные установки с дегазаторами и охладителями, что неприемлемо для рядовой практики.

Закрытие магистрали перепуска создает дополнительную погрешность измерений расхода в напорной магистрали. Определить ее не удалось и, по оценкам, для практики диагностирования автотракторных дизелей ею можно пренебречь. Поэтому магистрали перепуска рекомендуется на время измерений расхода перекрывать. Решением учета перепуска топлива является его ввод в систему топливоподачи после фильтра грубой очистки топлива, а присоединение расходомеров – до него.

Разработка расходомеров моторного топлива продолжается как в России, так и в других странах. Например, для контроля расхода топлива СП «Технотон» выпускает расходомеры DFM.

Расходомеры топлива DFM подразделяются на следующие модели:

1) однокамерные (рис. 3.20) – измеряют объем топлива, протекающего по подающей топливной магистрали;

2) дифференциальные – измеряют расход топлива как разницу объемов топлива, протекающего по подающей и обратной топливным магистралям (дифференциальный расход).

DFM состоит из измерительной камеры кольцевого типа 1, верхней крышки 2 с находящейся внутри микропроцессорной платой, интерфейсного кабеля с разъемом подключения 3 и кронштейна 4.

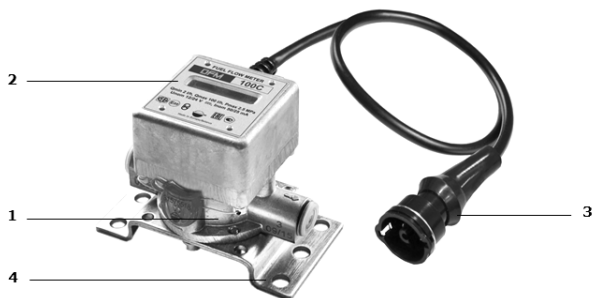


Рис. 3.20. Расходомер топлива DFM:

1 – измерительная камера кольцевого типа;

2 – верхняя крышка с находящейся внутри микропроцессорной платой;

3 – интерфейсный кабель с разъемом подключения; 4 – кронштейн

Расходомер DFM относится к приборам прямого объемного измерения расхода топлива с измерительной камерой кольцевого типа.

Принцип работы DFM основан на измерении объема топлива, протекающего через измерительную камеру. Под давлением жидкости, поступающей через входной штуцер расходомера во входное отверстие измерительной камеры, кольцо катится по внутренней поверхности камеры и одновременно скользит вдоль перемычки. Кольцо циклически вытесняет жидкость из камеры через ее выходное отверстие в выходной штуцер (рис. 3.21).

За один оборот кольца вытесняется объем жидкости, равный объему камеры, а электронная плата DFM вырабатывает один выходной импульс.



Рис. 3.21. Схема работы измерительной камеры DFM

Установка датчиков DFM в зависимости от топливной системы осуществляется по следующим схемам:

1. Установка по схеме «на разрежение» предполагает установку расходомера на участке топливной системы, где протекание топлива осуществляется за счет разрежения, создаваемого топливным насосом низкого давления (ТННД) – помпой. Схема рекомендуется для установки на двигатель, имеющий ТНВД с механическим приводом плунжера.

Для установки (рис. 3.22) необходимо использовать участок топливопровода между фильтром грубой очистки и входом ТННД.

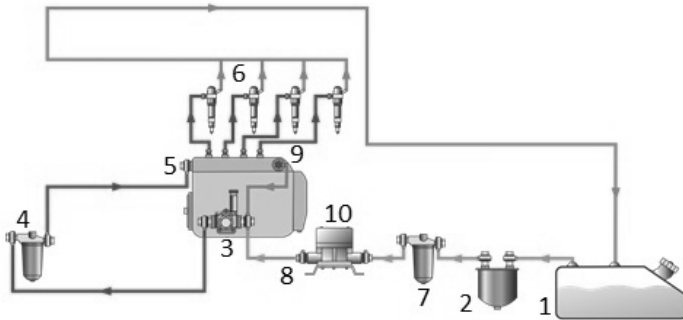


Рис. 3.22. Схема установки DFM «на разрежение»:

1 – топливный бак; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – ТННД (помпа) на ТНВД; 4 – фильтр тонкой очистки; 5 – ТНВД; 6 – форсунки; 7 – дополнительный фильтр тонкой очистки; 8 – обратный клапан; 9 – перепускной клапан; 10 – расходомер DFM

При исправной работе форсунок их обратка (перепуск излишнего топлива) составляет не более 0,1 % расхода топлива двигателем, поэтому ею можно пренебречь. Однако имеется значительный перепуск топлива из ФТО и ТНВД, которым пренебречь нельзя.

Для предотвращения измерения объема топлива, возвращаемого в бак, необходимо изменить схему обратного топливопровода. Для рассматриваемого случая обратку ТНВД необходимо изменить так, чтобы топливо циркулировало по малому кругу без участия топливного бака путем соединения обратки ТНВД со входом ТННД.

Достоинства схемы:

- минимальное вмешательство в топливную систему;
- простота установки;
- подходит для большинства двигателей.

Недостатки схемы:

- необходимость дополнительного фильтра тонкой очистки, что повышает стоимость установки;
- повышенная нагрузка на ТНВД;
- топливо в баке не подогревается топливом из обратной магистрали (иногда требуется установка дополнительного подогревателя).

2. Установка по схеме «на давление» предполагает установку расходомера на участке топливной системы после ТНВД, где протекание топлива осуществляется под давлением. Схема рекомендуется для установки на двигатель, имеющий ТНВД с механическим приводом плунжера.

Для установки (рис. 3.23) необходимо использовать участок топливопровода между фильтром тонкой очистки и входом ТНВД.

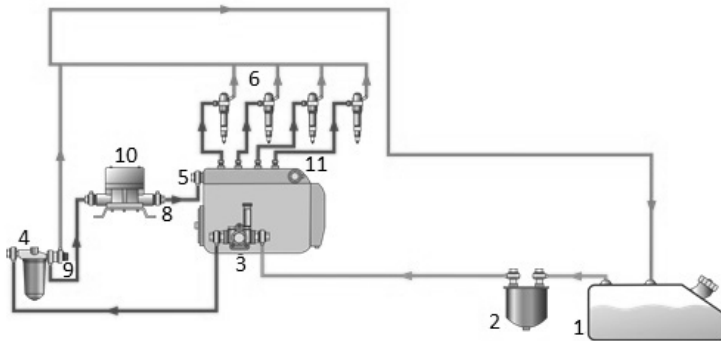


Рис. 3.23. Схема установки DFM «на давление»:

- 1 – топливный бак; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – помпа ТНВД;
4 – фильтр тонкой очистки; 5 – ТНВД; 6 – форсунки; 8 – обратный клапан;
9 – перепускной клапан; 10 – расходомер DFM; 11 – пробка

Обратку из форсунок и ТНВД нужно подавать на вход или на выход из ФТО. Перепуск топлива из ТНВД на короткое время можно перекрыть пробкой ТНВД, втулкой на штуцере магистрали перепуска.

Для нормальной работы измененной топливной системы требуется установить на входе фильтра тонкой очистки перепускной клапан, который будет поддерживать необходимое постоянное давление (1–1,5 атм) на участке «фильтр тонкой очистки–вход ТНВД» и пере-

пускать излишнее топливо в бак. На выходе DFM установить обратный клапан на 0,1–0,35 атм, который предотвратит протекание топлива через DFM в обратном направлении, а также снизит воздействие гидроударов топливной системы на DFM.

Таким образом, нагнетаемые ТННД излишки топлива будут сбрасываться обратно в топливный бак со входа фильтра тонкой очистки, а через расходомер DFM будет протекать только тот объем топлива, который расходуется двигателем.

Достоинства схемы:

- DFM устанавливается после штатного фильтра тонкой очистки;
- топливо проходит через DFM под давлением, что уменьшает нагрузку на ТНВД;
- обратка может подогревать топливо в баке.

Недостатки схемы:

- незначительно ухудшается охлаждение ТНВД;
- температура обратки ниже, чем при штатной топливной схеме.

3. Установка по дифференциальной схеме. При дифференциальном измерении схема циркуляции топлива в топливной системе не изменяется. Подающая камера (на корпусе расходомера обозначена буквой *F*) дифференциального DFM устанавливается в разьединение подающей топливной магистрали двигателя. Обратная камера (обозначена буквой *R*) – в разьединение обратной перепускной магистрали. Расход топлива определяется как разница между измеренными значениями расхода в подающей и обратной камерах.

Частные случаи установки DFM по дифференциальной схеме:

1) в топливной системе двигателя с плунжерным ТНВД установка подающей камеры может производиться:

- в магистраль после ТННД («на давление») (рис. 3.24);
- в магистраль до ТННД («на разрежение»). Обязательна установка дополнительного фильтра тонкой очистки (рис. 3.25);

2) в топливной системе с насос-форсунками установка подающей камеры может производиться в магистраль после ТННД («на давление») (рис. 3.26);

3) в топливной системе с Common Rail установка подающей камеры производится в магистраль до ТНВД («на разрежение»). Обязательна установка дополнительного фильтра тонкой очистки (рис. 3.27).

Обратная камера дифференциального DFM во всех случаях устанавливается на участке обратки «выход ТНВД–топливный бак».

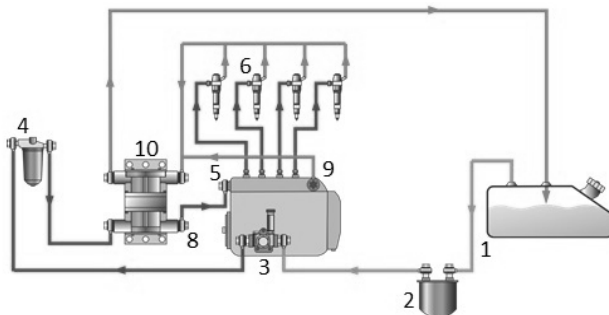


Рис. 3.24. Схема установки подающей камеры «на давление»
(в системе с плунжерным ТНВД):

1 – топливный бак; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – помпа ТНВД;
4 – фильтр тонкой очистки; 5 – ТНВД; 6 – форсунки; 8 – обратный клапан;
9 – перепускной клапан; 10 – расходомер DFM

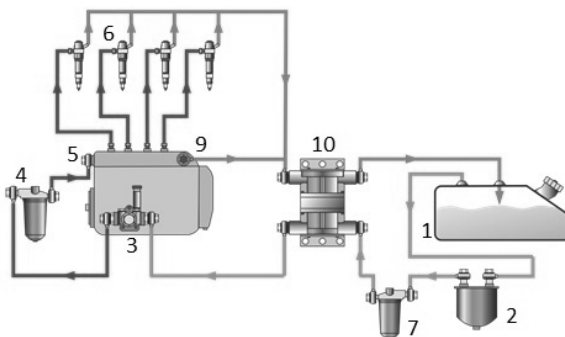


Рис. 3.25. Схема установки подающей камеры «на разрежение»
(в системе с плунжерным ТНВД):

1 – топливный бак; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – помпа ТНВД; 4 – фильтр тонкой очистки;
5 – ТНВД; 6 – форсунки; 7 – дополнительный фильтр тонкой очистки;
8 – обратный клапан; 9 – перепускной клапан; 10 – расходомер DFM

Достоинства схемы:

- отсутствие изменений в топливной системе;
- возможность установки на гарантийные двигатели.

Недостатки схемы:

- более высокая стоимость;
- более высокая погрешность измерения расхода топлива;
- повышение нагрузки на ТНВД за счет дополнительного фильтра тонкой очистки и DFM.

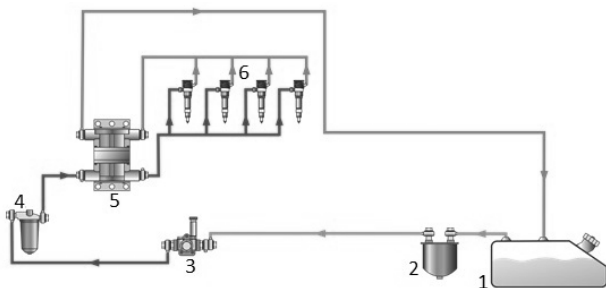


Рис. 3.26. Схема установки подающей камеры «на давление»
(в системе с насос-форсунками):

1 – топливный бак; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – ТНВД;
4 – фильтр тонкой очистки; 5 – расходомер DFM; 6 – насос-форсунки

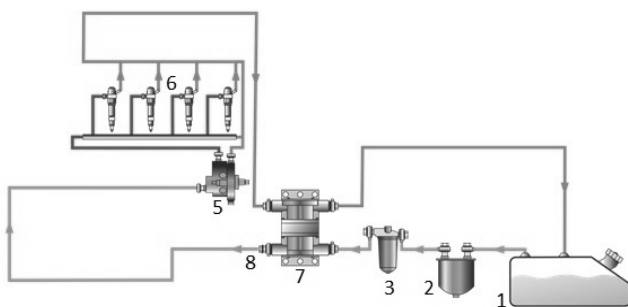


Рис. 3.27. Схема установки подающей камеры «на разрежение»
(в системе с Common Rail):

1 – топливный бак; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – фильтр тонкой очистки;
5 – ТНВД; 6 – форсунки; 7 – расходомер DFM

В связи с изложенными трудностями перспективным является контроль массового расхода моторного топлива с помощью прецизионного датчика давления, монтируемого на дне топливного бака машины. При этом исключается какая-либо механическая измерительная часть, без трудностей учитывается перепускаемое топливо, исключаются погрешности контроля с изменением плотности, сорта и температуры топлива, не требуются разборочно-сборочные работы для встраивания чего-либо в топливную магистраль любого ДВС. Контроль расхода топлива может быть непрерывным как в движении, так и при нахождении на стоянке, что реализовано с помощью значительно более сложных приборов.

Предпосылки для создания такого способа контроля известны давно. Так, в 60-х гг. английской фирмой «ФРУД» экспонировался расходомер с мерным цилиндром и датчиком давления на его дне. Такой прием контроля пытался реализовать в ГОСНИТИ кандидат технических наук В. В. Подкопаев. На подобный расходомер получили патент по собственной разработке сотрудники ЦОКТБ ГОСНИТИ. На современном же уровне такой прием пытался реализовать доктор технических наук В. Э. Шалимов в патенте РФ № 2649044 на расходомер топлива для дизельных двигателей автотранспортных средств.

Комплект внешнего расходомера, представленный на рис. 3.28, имеет пеногасительную камеру к сливной магистрали, из которой топливо поступает в мерный цилиндр. Микропроцессорный прибор подключается четырехканальным электромагнитным клапаном сливную и подающую магистрали к мерному цилиндру. Измерение времени расходования 100 г навески топлива из мерного цилиндра обеспечивает контроль расхода и работу топливной системы двигателя без воздушных пробок. Однако сложность такого комплекта ограничивает его стационарными условиями.

Для реализации универсального расходомера с датчиком давления на дне бака машины имеются и прецизионные датчики давления на 100 кПа, и микропроцессорная техника.

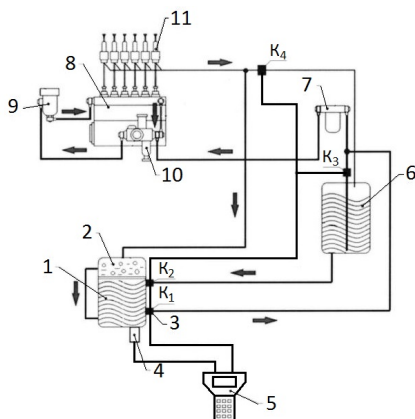


Рис. 3.28. Комплект средств расходомера топлива

для автотракторных дизелей по патенту РФ № 2649044:

- 1 – мерный цилиндр с пеногасительной камерой; 2, 3 – четырехканальные электромагнитные клапаны; 4 – датчик давления; 5 – микропроцессорный измеритель; 6 – топливный бак машины; 7, 9 топливные фильтры дизеля; 8 – ТНВД; 10 – топливоподкачивающий насос; 11 – форсунки дизеля

Измерению расхода топлива сопутствует контроль давления наддува от ТКР дизеля, что требует наличия манометра на 0,06 МПа. Взамен предложено пьезометрическое устройство КИ-13927-ГОСНИТИ для контроля разрежения и давления наддува с пределами измерения $-200 \dots +3000$ мм вод. ст. (0,03 МПа) (рис. 3.29).

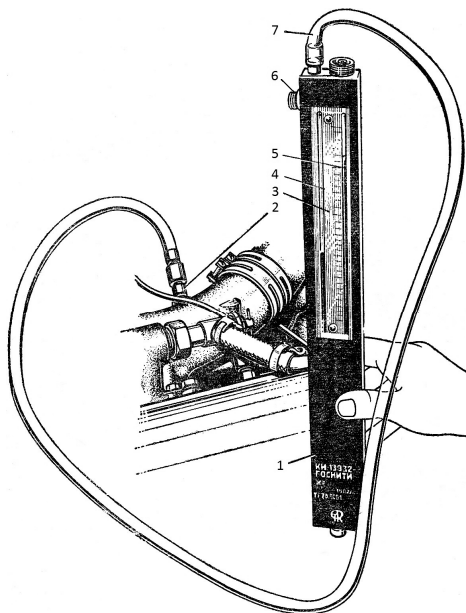


Рис. 3.29. Устройство КИ-13932-ГОСНИТИ для измерения давления наддува дизелей ТКР

Оценка дымности ОГ дизелей

Исследования ГОСНИТИ и ряда других научных учреждений позволили установить, что относительное увеличение дымности ОГ в эксплуатации дизелей удовлетворительно соответствует относительному увеличению удельного расхода топлива. В общем увеличении дымности можно определить значительную долю, соответствующую росту удельного расхода топлива из-за недогорания топлива и сажи, хотя она не только обуславливает дымность ОГ, но и откладывается нагаром в камере сгорания и в выпускном тракте.

Таким образом, ориентировочная оценка топливной экономичности дизелей по дымности ОГ в эксплуатации правомерна. В силу оперативности большего охвата парка машин и совмещения его с экологическим контролем этот метод может стать важным, что наблюдается за рубежом.

В настоящее время имеются портативные дымомеры (например, МЕТА-01 МП), с помощью которых дымность измеряется оперативнее.

Исходя из изложенного следует подчеркнуть:

1. Расходомеры топлива автотракторных ДВС переменного перепада давления на сужающем устройстве – самые простые, достаточно надежные и точные при их низкой цене, поэтому для современной практики ТО МТП могут быть востребованы.

2. Нормативы расхода топлива современных автотракторных дизелей требуют уточнения с верхними допусками +5 % от номинальных значений для новых дизелей.

4. Топливно-экономические и мощностные показатели автотракторных дизелей достаточно контролировать по бестормозному методу В. И. Бельских [11], для чего созданы стационарные и переносные расходомеры серии КИ-8940-ГОСНИТИ.

5. Экспресс-оценку топливной экономичности автотракторных дизелей при их диагностировании и инспектировании МТП АПК возможно проводить по дымности ОГ, контролируемой в режиме свободного ускорения коленчатого вала дизелей.

6. Перспективен контроль массового расхода топлива автотракторных ДВС с помощью прецизионного датчика давления, монтируемого на дне топливного бака машин.

3.4. Методы и средства диагностирования цилиндро-поршневой группы автотракторных ДВС

ЦПГ на 80 % определяет ресурс до первого ремонта ДВС. Для контроля состояния ЦПГ и определения ее остаточного ресурса с целью поддержания его на должном уровне необходимо совершенствовать методы и средства диагностирования ЦПГ. В настоящее время эта потребность повысилась в связи с расширением так называемого безразборного ремонта ДВС.

В различных отраслях существует множество методов и средств диагностирования ЦПГ, но их авторы субъективны в оценке своих и чужих методов и средств технического диагностирования ЦПГ, не всегда учитывая отзывы и пожелания практиков.

Обширный анализ методов и средств технического диагностирования ЦПГ проведен сотрудниками Иркутского СХИ под руководством доктора технических наук, профессора И. П. Терских [124, 125]. Наиболее значимые из них приведены в табл. 3.4 в хронологической последовательности появления.

Таблица 3.4

Основные методы диагностирования ЦПГ ДВС

Измеряемый параметр	Особенности применения	Недостатки метода	Разрешающая способность*
1	2	3	4
1. Длительность прокрутки ДВС для запуска	Измеряется время от начала прокрутки дизеля до начала самостоятельной его работы	Метод качественный: летом длительность прокрутки мала, а зимой она меняется в связи с изменением температуры и вязкости моторного масла	—
2. Разрежение во впускном коллекторе бензинового ДВС	Присоединяют вакуумметр к впускному коллектору ДВС и при частоте вращения $n_{x \max}$ двигателя измеряют параметр	Обобщенная оценка состояния ЦПГ, ГРМ и воздухоподачи всего ДВС. Для ЦПГ малоинформативна	0,26
3. Расход масла на угар	Суммируют объемы доливок масла в ДВС и расход топлива за один период, относят расход масла к расходу топлива	Требуется период времени не менее полной рабочей смены	0,85–0,95
4. Дымность ОГ дизелей	Определяют цвет и оптическую плотность ОГ в различных условиях работы дизелей	Трудно объективно выявить интенсивность и оптическую плотность белого, голубого, синего, серого, черного дыма	—
5. Максимальное давление сжатия (компрессия)	Прочно присоединяют наконечник прибора к свечному/форсуночному	Трудоемок для многоцилиндровых дизелей; выявляет в основном	0,30–0,53

1	2	3	4
в каждом цилиндре	отверстия в головке цилиндра	аварийные дефекты	
6. Расход газов, прорывающихся из кольцевого уплотнения поршня в картер ДВС	Прогревают дизель, устанавливают номинальную частоту вращения коленчатого вала (коленвала), определяют среднее значение и вариацию расхода	Обобщенная оценка состояния всех цилиндров. Требуется определенность параметров газов по составу, температуре и влажности	0,65–0,78
7. Давление газов в картере, скорость его нарастания	То же, измеряют давление газов до 1000 мм вод. ст., время или скорость его нарастания	То же. Высокая погрешность измерения малых давлений	–
8. Утечки воздуха из камеры сгорания через кольцевое уплотнение поршня и клапаны ГРМ	Подают под давлением 1,6 атм воздух из пневмосети через прибор и измеряют перепад давления на диафрагме прибора	Информативен для дифференциальной оценки ЦПГ, ГРМ, уплотнений камер сгорания. Требуется источник сжатого воздуха	0,85–0,90
9. Амплитуда пульсаций давления газов в картере	Получают осциллограмму пульсаций давления при минимальной частоте вращения коленвала прогретого дизеля	Пригоден для низкооборотных судовых дизелей (частота вращения коленвала – 60–120 мин ⁻¹)	0,65
10. Концентрация в масле продуктов износа деталей ЦПГ	Индуктивными датчиками определяют концентрацию Fe, спектральным анализом – Al, Fe, Cr, а магнитными феррографами – количе-	Индуктивный метод малочувствителен; спектральные установки дороги; феррографы в России не производятся	0,30 0,9–0,96 0,90

1	2	3	4
	ство и фракционный состав частиц износа		
11. Температура газов в камере сжатия на такте сжатия	Измеряют импульсы температур в камере сжатия при прокрутке коленвала ДВС	Трудоемок. Необходима импульсная термоизмерительная аппаратура	Не распространен
12. Соотношение C_xH_y , O_2 , CO_2 и N_2 в ОГ и в картерных газах	Определяют концентрации в картерных газах C_xH_y , O_2 , CO_2 , N_2 и сравнивают их с концентрациями этих газов в ОГ и в воздухе	Требуется сложная газоаналитическая аппаратура. Метод за рамки исследований не вышел	То же
13. Виброакустический параметр	Требуется виброизмерительная аппаратура с индивидуальной частотной и фазовой селекцией вибросигналов	Большие помехи измеряемому вибросигналу от ударных пересопряжений других деталей	0,3–0,5
14. Вакуум в цилиндрах полный	Операции аналогичны контролю компрессии	Трудоемки для многоцилиндровых дизелей	0,6 для ГРМ и гильз
15. Вакуум в цилиндрах остаточный			0,7 для колец
16. Радиоактивность продуктов изнашивания ЦПГ	В моторном масле измеряется радиоактивное излучение изотопов металлов вставок в деталях ДВС или деталей после их нейтронной активации	Требуется специальная аппаратура регистрации и детектирования излучений и особые меры предосторожности	0,90

*Величины отношений пределов изменения диагностических параметров к их предельным (браковочным) значениям.

В табл. 3.5 приведена информативность диагностических параметров ЦПГ различных дизелей по данным кандидата технических наук И. Н. Аринина [3].

Таблица 3.5

Информативность диагностических параметров ЦПГ дизелей

Диагностические параметры автотракторных дизелей	Относительное изменение в эксплуатации		Коэффициент информативности
	минимальное	максимальное	
Угар моторного масла к расходу топлива для обобщенной оценки изношенности ЦПГ всего дизеля, %	0,05	2–5	0,945
Расход картерных газов, л/мин	10	180	0,704
Утечка воздуха из цилиндров, %	10	85	0,706
Компрессия в цилиндрах, кгс/см ²	15	36	0,303
Длительность прокрутки при пуске, с	3	60	–
Дымность ОГ, %	15	100	–
Изменение мощности дизеля, %	85	110	0,06

По многим методам и средствам диагностирования ЦПГ накоплен большой исследовательский и практический опыт с оценками практиков.

Новым методом является установка свечей накаливания с датчиками давления в цилиндре. Примером служат высокотехнологичные свечи BERU 0103010907 для автомобилей OPEL.

На разрежение во впускном тракте бензиновых ДВС наибольшее влияние оказывает не износ ЦПГ, а состав рабочей смеси, угол опережения зажигания, тепловые зазоры ГРМ, дефекты сопряжения «клапан–седло», износ направляющих втулок, когда разрежение может уменьшиться на 60 %. В связи с этим диагностирование дизелей по разрежению во впускном тракте не применялось, но развивался контроль разрежения в цилиндрах приборами типа КИ-5315-ГОСНИТИ.

Учет расхода масла на угар, как показывают исследования и эксплуатационная проверка, является весьма надежными методом и подлежит всеобщему применению.

По результатам наблюдений в условиях рядовой эксплуатации за группой тракторов «Беларус» в течение 6 лет (наработка 6–7 тыс. ч на один трактор) установлена зависимость расхода масла на угар от наработки T дизеля, ч [3]:

$$g_m = 0,34 + 0,27T. \quad (3.8)$$

В условиях Нечерноземной зоны угар масла дизелей при наработке 2 тыс. ч не превышал 1,2 %, при 5,5 тыс. – достигал 2,5 %, а при 6 тыс. ч – 2,8 %. Для этих дизелей при угаре 3 % дальнейший его рост ускорялся и в отдельных случаях удваивался за несколько десятков часов. Минский моторный завод (МТЗ) рекомендовал замену поршневых колец дизелей при расходе масла на угар в 2,5 % от расхода топлива. По исследованиям ГОСНИТИ, угар масла достигает 5 % (рис. 3.30).

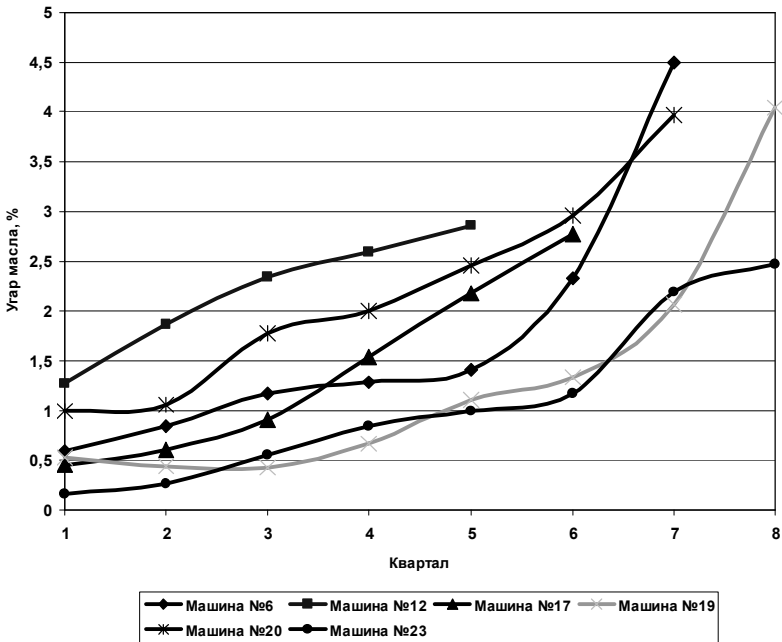


Рис. 3.30. Примеры нарастания уга­ра моторного масла дизелей 8ДМ-21А автосамосвалов БелАЗ (дизель автосамосвала № 23 – новый, остальные – отремонтированные)

Угар моторного масла в течение 7 лет служил надежным диагностическим параметром для определения сроков переборки различных ДВС, в т. ч. дизелей карьерных автосамосвалов (до 6 %), грузовых автомобилей (до 3 %), дорожно-строительных машин (до 4 %), пассажирского и легкового автотранспорта (до 6 %).

При измерении *максимального давления сжатия* популярны компрессиметры и компрессографы для бензиновых ДВС, где степень сжатия невысока, а стартерный пуск резко сокращает трудоемкость контроля. Но невысокая разрешающая способность метода и трудоемкость контроля ЦПГ дизелей представляют скорее исследовательский интерес к методу, а практики обходятся качественными органолептическими методами.

Нормативами ГОСНИТИ 60–70-х гг. предельное значение компрессии для дизелей составляло 2,157 МПа. Но по данным профессора ЧГАУ А. К. Ольховацкого в дизеле ЯМЗ-240Б, для которого был удачно проведен безразборный ремонт, среднее давление компрессии составляло 1,83 МПа, а по данным профессора МГАУ В. А. Чечета такому же ремонту поддавались дизели с компрессией 1,67 МПа, поэтому были уточнены предельные и номинальные значения компрессии, соответствующие данным ГосавтотрансНИИ-Ипроект, МГАУ и ГНУ ВИМ, по которым максимальные величины составляют 3,53–4,0 МПа.

Для обоснования предельных величин использована зависимость компрессии P_k в ДВС от степени сжатия ϵ и доли утечек воздуха ΔQ_v из камеры сжатия (КС) при диабатическом сжатии двухатомных газов и воздуха, приведенная И. П. Терских [125]:

$$P_k = P_a \epsilon^{\eta^1} (1 - \Delta Q_v)^{\eta^1}, \quad (3.9)$$

где P_a – давление в конце такта впуска в КС, $P_a = 83,35$ – $94,14$ кПа; η^1 – показатель политропы сжатия на пусковых оборотах дизеля, $\eta^1 = 1,32$; ΔQ_v – доля утечек из КС (по данным НАТИ, предельное значение – 35 %, а номинальное – 5 %).

Уравнению предельной величины компрессии придан вид:

$$P_{\text{кмин}} = 0,93 \epsilon^{1,32} (1 - 0,50)^{1,32} = 0,3999 \epsilon^{1,32}, \quad (3.10)$$

а результаты расчетов нормативов компрессии приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Нормативы компрессии для ЦПГ автотракторных ДВС

Давление сжатия в цилиндрах	Абсолютное давление на впуске, атм	Значения компрессии, МПа, в зависимости от степени сжатия						
		8	9,0	9,5	13,5	16	16,5	17
Минимальное (предельное)	0,93; утечки 50 %	0,62	0,73	0,78	1,24	1,55	1,62	1,68
Допускаемое	0,97; утечки 35 %	0,88	1,03	1,11	1,76	2,20	2,29	2,38
Максимальное (номинальное)	0,985; утечки 5 %	1,45	1,70	1,83	2,90	3,63	3,78	3,93
Двигатели	–	ДВС ВАЗ и другие бензиновые			Транспортные дизели	Д-243, Д-245, Д-260	ЯМЗ	КамАЗ-740

Самый распространенный метод диагностирования ЦПГ – *контроль расхода картерных газов*, исследованный в работе [11], а в конце 60-х гг. развитый в ГОСНИТИ с прибором КИ-4887-II (рис. 3.31).

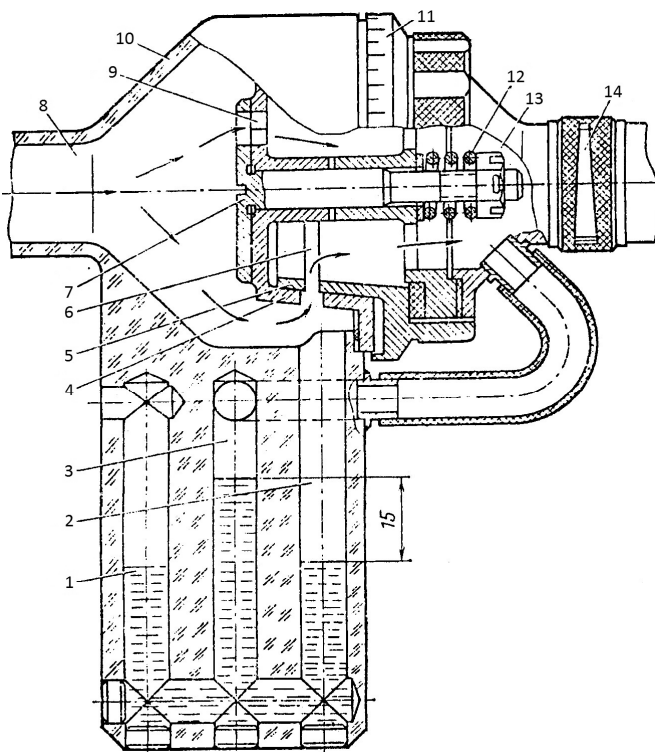


Рис. 3.31. Индикатор расхода картерных газов КИ-4887-II-ГОСНИТИ:
 1–3 – каналы пьезометра; 4–6, 14 – детали дросселей; 7, 8, 13 – детали впуска-выпуска газов; 9 – дополнительное калиброванное отверстие; 10 – корпус; 11 – шкала

Далее были разработаны методы диагностирования элементов КС и индикатор КИ-4887-II-ГОСНИТИ (а. с. РФ № 253417, 282715 и 282716). Однако из-за необходимости применения для отсоса газов тяжелой для передвижной диагностической установки КИ-4270-ГОСНИТИ компрессорно-вакуумной станции КИ-13907-ГОСНИТИ и сложной процедуры оперирования с дизелем и двумя дросселями прибор КИ-4887-II-ГОСНИТИ и компрессорно-вакуумная установка были отвергнуты диагностами. Последняя, вызывавшая поломки

днища автомобиля УАЗ-456 передвижной установки КИ-4270-ГОСНИТИ, и сам прибор КИ-4887-II-ГОСНИТИ к концу 70-х гг. были сняты с производства, а метод обобщенного контроля ЦПГ оказался не обеспечен. В конце 70-х гг. была начата разработка простого портативного индикатора расхода газов.

Метод контроля состояния ЦПГ *по давлению газов в картере* научно апробирован для контроля обкатки дизелей Д-21 в ЛСХИ и дизелей СМД-60/62 на харьковском ПО «Серп и молот». Метод считался некорректным из-за трудности измерения малых давлений газов (до 60 Па для дизеля Д-21 и до 220 Па для дизелей СМД-60/62 по данным ЛСХИ; до 600 Па по данным ЧТЗ), а в особенности из-за неопределенности, как и при контроле расхода картерных газов, условий их контроля, состава, температуры, плотности и влажности картерных газов.

Картерные газы при изношенной ЦПГ могут содержать и пары масел и топлива, а температура газов может варьироваться от температуры масла и охлаждающей жидкости ДВС до температуры деталей ЦПГ. Так, на выходе из картера дизеля Д-243 температура газов при заводских и контрольных испытаниях индикатора расхода газов КИ-13671-ГОСНИТИ составляла 65–150 °С. Доказательством сложности состава картерных газов служат и следующие обобщенные результаты испытаний [30, 36]:

- прозрачный сигнализатор давления газов в первых моделях индикатора КИ-13671-ГОСНИТИ быстро запотевал от конденсации паров воды и моторного масла;

- при подаче потока картерных газов из дизеля Д-243 последовательно через три прибора (ротаметр РЭ-0,025, термоанемометр, индикатор КИ-13671-ГОСНИТИ) каждый последующий показывал меньшие значения;

- при неоднократной проверке индикаторов КИ-4887-II-ГОСНИТИ в них обнаруживалось до 5 мл воды;

- при подаче картерных газов в одних и тех же непрерывных условиях измерения, но без ресивера и через 100-литровый ресивер их выход из ресивера уменьшался вдвое. Все это потребовало более корректного подхода к разработке нового индикатора расхода газов.

Контроль давления газов в картерном пространстве автотракторных дизелей проводился с помощью установки ДИПС КИ-13940-ГОСНИТИ с двумя типами переходных устройств к датчику давления

ИПД-2-0,06: в первых исследованиях – контроль давления в герметичном картере дизелей, а позже – перед сужающим устройством (рис. 3.32).

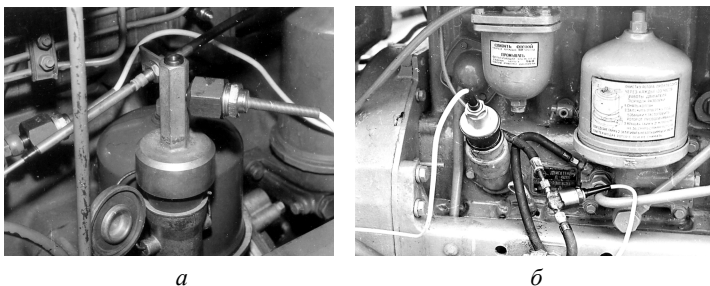


Рис. 3.32. Контроль давления картерных газов с помощью ДИПС КИ-13940-ГОСНИТИ:

а – контроль установившегося давления перед диафрагмой;
б – контроль величины давления через заданное время или скорости нарастания давления в загерметизированном картере

В первом варианте контроля (*а*) измерялось нарастание давления газов за 10 с, но имелись случаи протечки масла из заднего коренного подшипника дизеля, поэтому был сделан переход к контролю меньшего по величине давления перед диафрагмой (*б*). Диафрагмы (табл. 3.7) были взяты в соответствии с данными лаборатории диагностики УкрГОСНИТИ (использованы в диагностической автоматизированной установке «Урожай-1Т»).

Таблица 3.7

Данные ВНИИВИД для измерения давления картерных газов системами «Урожай-1Т», КИ-13940-ГОСНИТИ и АМТ КИ-13950-ГОСНИТИ

Номер диафрагмы	Диаметр, мм	Марка дизеля	Давление перед диафрагмой, кПа*	
			допускаемое ориентировочное	предельное
1	5,1	ЯМЗ-240Б	15	25
2	4,8	СМД-60, СМД-62	15	20
3	4,4	ЯМЗ-238НБ	20	35
3	4,4	А-41	15	25
4	3,5	СМД-14А	14	23
4	3,5	Д-242, Д-243	14	23

*Номинальное значение – 5,0 кПа.

По методу определения *утечки воздуха из камеры сгорания* хорошие отзывы получили пневмокалибратор К-69М Новгородского завода «ГАРО» и его модернизация – прибор К-272М (рис. 3.33, 3.34). Приборы позволяли выявить на неработоспособном ДВС дефекты поршневых колец, прогары поршней и клапанов, неплотности прокладок головок цилиндров и другие дефекты. Разрешающая способность метода и приборов К-69 (К-69М) Ленфилиала НИИАТ высока, но требуется источник сжатого воздуха.

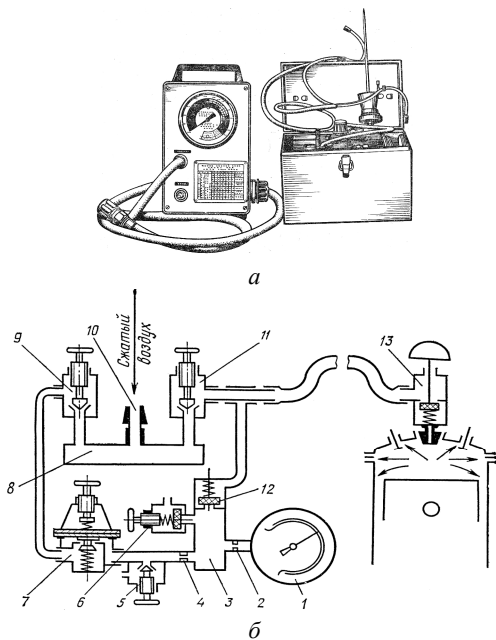


Рис. 3.33. Прибор Ленфилиала НИИАТ:

a – внешний вид; *б* – схема:

- 1* – манометр, проградуированный в процентах величины расхода воздуха из прибора (при давлении 0,16 МПа показания 0 %, при давлении 0 МПа расход 100 %);
- 2, 4* – диафрагмы; *3* – демпферная камера; *5* – регулировочная игла;
- 6* – регулируемый предохранительный клапан; *7* – редуктор для снижения давления воздуха из пневмосети до диагностического 0,16 МПа;
- 8* – демпферная камера; *9* – вентиль канала диагностирования;
- 10* – впускной штуцер; *11* – вентиль канала продувки и прослушивания мест утечек воздуха из камеры сгорания; *12* – нерегулируемый предохранительный клапан; *13* – рукоятка с краном для подачи воздуха в свечное/форсуночное отверстие головки цилиндров ДВС

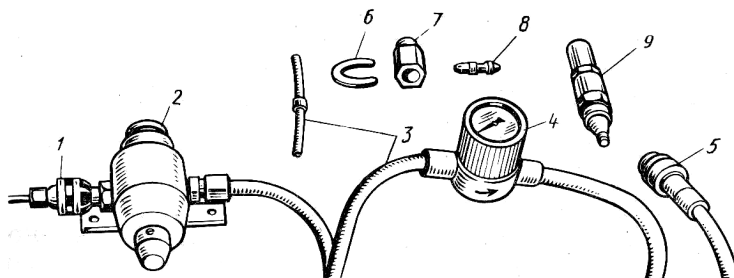


Рис. 3.34. Прибор К-272 как модификация прибора К-69М:
 1, 5 – соединительные муфты; 2 – блок питания (редуктор давления
 и фильтр тонкой очистки воздуха); 3 – воздуховоды; 4 – манометр;
 6, 7, 9 – принадлежности; 8 – калибровочный дроссель

Упрощенный вариант этого пневмотестера – прибор К-272 – производился Новгородским заводом «ГАРО». В настоящее время он может быть заменен приборами ПТ-1 New. Метод может быть рекомендован и широкому применению, когда сжатый воздух получают из пневмосистем машин, что и реализовано на практике.

Метод *контроля амплитуд давления газов в картере ДВС* обусловлен их импульсным прорывом из КС в картерное пространство на тактах сжатия и рабочего хода поршня ДВС. Для тепловозных тихоходных дизелей с небольшим газодинамическим фоном в картере этот метод защищен десятком авторских свидетельств СССР и зарубежными патентами.

В ЛСХИ пульсации давления картерных газов исследованы с помощью специально созданного электронного прибора. Импульсы давления газов в картерном пространстве воспринимались емкостным датчиком, а регистрация давления производилась на шлейфный или электронно-лучевой осциллограф или индикатор. Для идентификации импульсов по принадлежности к какому-либо цилиндру на осциллографической ленте регистрировали отметки ВМТ цилиндров.

Однако импульсы давления картерных газов величиной 10–200 Па надежно выявляются только на тихоходных судовых дизелях, где возможно достоверное фазовое выделение полезного сигнала из интенсивного газодинамического фона в картере. Для средне- и высокооборотных ДВС метод непригоден из-за высокого газодинамического фона в картере (чередуются амплитуды ударного давления газов от возвратно-поступательно движущихся поршней). Данный метод для автотракторных ДВС предлагалось реализовать

в режиме их прокрутки стартером или пусковым ДВС, если подавать сигнал с микрофона в картерном пространстве на измеритель через фильтр с полосой пропускания 1–2 Гц для регистрации только колебаний давления газов без шума в картере.

Концентрация в масле продуктов износа деталей ЦПГ определяется путем анализа проб моторного масла на наличие частиц металлов – продуктов износа. Использование индуктивных датчиков в протоке масла в главной масляной магистрали тракторных дизелей при их обкатке исследовалось в ГОСНИТИ в 60-х гг. Из-за слабой измерительной базы того времени и потому малой чувствительности метод развития не получил.

Спектральный анализ моторных масел для определения содержания продуктов изнашивания ДВС является высокочувствительным методом раннего предупреждения о повышении интенсивности, а главное, в отличие от других, – методом выявления причин повышенного изнашивания деталей, в т. ч. ЦПГ. Однако он требует наличия спектральной установки, которая при обслуживании более 50 энергонасыщенных машин окупает себя за один сезон.

В зарубежных феррографах визуально определяется количество и распределение по размеру ферромагнитных частиц в следе стекания пробы масла по наклонной прозрачной пластине. Феррографы дополняют спектральный анализ масел, позволяют выявить крупные частицы аварийного изнашивания, что не осуществляется спектральными установками. Так, в установках МФС-7М, МФС-10 и ДФС-500, где в электрической дуге сжигается прилипшее к кварцевому диску масло, в анализ попадают частицы не более 20 мкм.

В связи с этим является актуальной разработка и освоение производства простых феррографов, которые при отсутствии спектральных установок могли бы широко использоваться для экспресс-анализа работавших масел.

Виброакустический метод интенсивно изучался во многих НИИ (авиации, морского флота и др.), а также в вузах. На кафедрах ДВС и ЭМТП ЛСХИ под руководством и при участии профессоров А. В. Николаенко, Н. С. Ждановского и В. А. Аллилуева метод исследован приборами ЭМДП-2, ЭМДП-М с вибродатчиками ИС-313А, а также диагностическим комплексом К-736.

Повторные исследования вибродиагностики ЦПГ были проведены в ГОСНИТИ. Однако при контроле виброимпульсов в полосе 29–32 кГц с датчиков Д-14 на головках болтов крышек блоков

цилиндров многих тракторных дизелей комплексом К-736 ленинградского ВНИИЭП (в составе установки КИ-13940-ГОСНИТИ), комплексом К-539 киевского ПО «Точэлектроприбор» (в составе АМТ КИ-13950-ГОСНИТИ) оказалось, что слабые сигналы ЦПГ были скрыты мощными сигналами от процессов сгорания и выпуска, ударов в газораспределительном механизме и форсунках. В современных дизелях с малыми зазорами «поршень–гильза» эти вибросигналы без тщательной частотной и фазовой селекции недоступны в еще большей мере.

В литературе известны идентичные описания органолептического диагностирования ЦПГ по стукам при перекладке поршня в верхней мертвой точке и шумам его колец. Возможно, такой прием оправдывал себя на первых ДВС с большими зазорами в ЦПГ. Практика ослушивания современных автотракторных дизелей не дает оснований для такой проверки. В 6-, 8- и 12-цилиндровых дизелях сильные вибросигналы порождают удары 12–48 клапанов, 6–12 форсунок, 4–5 шестерен. Удары от перекладки поршней при малых зазорах с гильзами, с масляной прослойкой в их сопряжении в современных ДВС на слух и с помощью стетоскопов практически не слышны.

В целом инструментальная виброакустическая диагностика ЦПГ ДВС, требующая соответствующих вибродатчиков, избирательной микропроцессорной частотной и фазовой селекции вибросигналов, дополнительных трудоемких исследований, дорогих приборов, затрудненная доступностью к оптимальным точкам контроля, на современном этапе состояния инженерной службы АПК имеет ограниченное применение.

Определение *полного и остаточного вакуума в цилиндрах* – новые вакуумные методы контроля разрежения в КС, возникающего при прокрутке коленчатого вала ДВС с последовательной работой атмосферного и вакуумного клапанов приборов типа КИ-5973-ГОСНИТИ.

Методы используются с 90-х гг. профессором МГАУ В. А. Чечетом с более совершенным, разработанным им же прибором КИ-5973-ГОСНИТИ.

Методы и последний прибор оправдали себя полностью, широко распространены среди практиков по безразборному ремонту ДВС (изготовлено более 3000 шт.).

Установлено, что диагностирование ЦПГ необходимо, когда выявлены: значительная наработка ДВС; снижение мощности

дизеля и трудность его пуска; повышенный угар масла и ярко-синий цвет ОГ; большой расход картерных газов; выброс из сапуна, из маслосаливной горловины паров и брызг масла; выброс масла в выпускную трубу; наличие масла на поршне, в ТКР, во впускном коллекторе; блестящие металлы в срезе осадка в центробежном маслоочистителе и на маслофильтрах; повышенное загрязнение маслом воздушного фильтра; ускоренное старение масла и его шлам на деталях ДВС; появление ненормальных стуков и шумов в ЦПГ; замасливание, закоксовывание свечей зажигания или форсунок; бело-голубой дым (не все топливо загорается из-за пониженных компрессии и температуры сжатого воздуха); повышенный удельный расход топлива.

Конечной цели не достигает определение износного состояния ЦПГ без выявления возможных дефектов поршня (прогар), поршневых колец (износ, закоксовывание, залегание, поломки), гильз цилиндров (износ, овальность, прогары), клапанов ГРМ (износ, сколы, трещины, коррозия и прогар фасок, ослабление вставок в гнездах, неполное закрытие из-за отсутствия тепловых зазоров), трещин в головках и гильзах цилиндров, прогара прокладок и других возможных неисправностей.

Таким образом, необходимо проверять все элементы ЦПГ и КС, а также картерное масло по информативной *«капельной пробе»*. Следует принимать во внимание наличие над поршнем таких лжеуплотнителей, как масло, вода, топливо, иначе результаты контроля будут некорректными. Сопоставление результатов контроля пневмоплотности сухих цилиндров и после вливания в них 50 мл масла (другой вариант: вначале замасленных цилиндров, а затем их же после удаления масла, например продувкой воздухом) позволяет уточнить состояние ЦПГ и ГРМ.

Состояние ЦПГ существенно зависит от закоксованности колец. Оценка их изношенности и уплотняющей способности без раскоксовывания ЦПГ при длительной наработке ДВС зачастую оказывается недостоверной. Поэтому во всех рекомендациях ГОСНИТИ по диагностированию ЦПГ [11, 30, 35, 36, 39] указано, что трактор должен отработать полную смену на вспашке, чтобы в длительном нагруженном и тепловом режиме выжечь нагар и кокс в ЦПГ, и только после этого трактор ставится на техническое диагностирование. В последние годы раскоксовывание ЦПГ облегчено благодаря выпуску

промывочных масел ВНИИ НП, препаратов (например, «Лавр» МЛ-202 и многие другие зарубежного производства).

Для расширяющейся практики безразборного ремонта ДВС трибосоставами нужно в первую очередь убедиться в безаварийном состоянии ЦПГ, поэтому значимость раскоксовывания усиливается. Необходимо обеспечить максимальную пневмоплотность, которую могут дать кольца, освобожденные от залегания, закоксованности, защемления в канавках поршня, что происходит при длительной малонагруженной работе машин. Как показал анализ практики безразборного ремонта, если после раскоксовывания параметры ЦПГ улучшились, то ЦПГ безаварийна и РВС-обработка будет эффективна. Если параметры не изменились, то целесообразно проверить герметичность клапанов ГРМ, если ухудшились – возможна поломка колец, поэтому РВС-обработку до ревизии ЦПГ проводить не следует. Только после раскоксовывания ЦПГ результаты диагностирования соответствуют истинной ее изношенности, а значит, можно определить потребность и вид ее ремонта [11, 30, 35, 36, 39].

Проведенные ГОСНИТИ исследования и испытания различных автотракторных ДВС показали, что достаточно достоверными, нетрудоемкими и доступными методами обобщенного контроля изношенности и темпов изнашивания ЦПГ являются расход масла на угар и расход картерных газов.

Анализом результатов измерений утечек воздуха из КС дизеля Д-243, выполненных ГОСНИТИ, подтверждено, что для точного диагноза кольцевого уплотнения поршня пневмокалибраторами К-69М или К-272 необходимо выдувать масло из сопряжений колец, поршня и гильзы – точность диагноза становится идеальной. Стандартное применение этих приборов без продувки несколько дискредитировало пневмотестирование нестабильностью показаний приборов и необходимостью сжатого воздуха.

По приблизительной оценке, разрешающая способность пневмотестирования находится на уровне 0,85, но не учитывается сопутное выявление неисправностей всех элементов КС, что недостижимо другими методами. В качестве подтверждения на рис. 3.35 приведено графическое сравнение основных методов диагностирования, составленное по результатам форсированных износных испытаний двигателя ЗИЛ в МАДИ. Данные графика подтверждают пригодность угара масла и расхода картерных газов для реализации в диагностировании автотракторных дизелей.

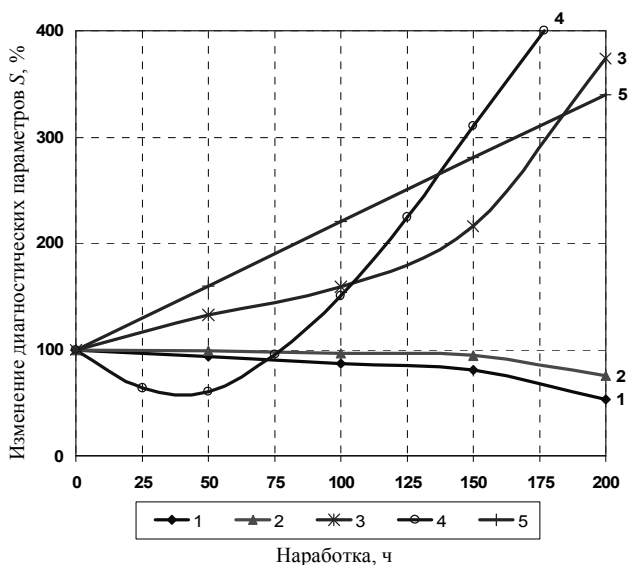


Рис. 3.35. Изменение параметров ЦПГ по наработке ДВС при форсированных износных испытаниях:

- 1 – компрессия; 2 – разрежение во впускном тракте; 3 – прорыв газов в картер; 4 – угар масла; 5 – утечка сжатого воздуха при положении поршня в ВМТ

После снятия с производства индикатора КИ-4887-II-ГОСНИТИ для оснащения служб диагностики АПК встала задача разработки более практичного индикатора. В Целинном филиале ГОСНИТИ был предложен макет прямоточного дроссельного индикатора с поршеньковым сигнализатором давления газов [30, 36].

Для устранения выявленных недостатков макета индикатора ГОСНИТИ совместно с Целинным филиалом ГОСНИТИ составил ТЗ на корректный индикатор, провел заводские и приемочные испытания. Результатом разработки стал индикатор КИ-13671-ГОСНИТИ (рис. 3.36), параметры которого приведены в табл. 3.8.

Согласно исследованиям ТФ ЦОКТБ ГОСНИТИ по сумме показателей (востребованность, удобство применения, ценность и достоверность диагностической информации) индикатор КИ-13671-ГОСНИТИ из 30 средств во всех диагностических комплектах ГОСНИТИ поставлен на третье место (после дроссель-расходомера ДР-70 и прибора электроизмерительного комбинированного Ц-4324).

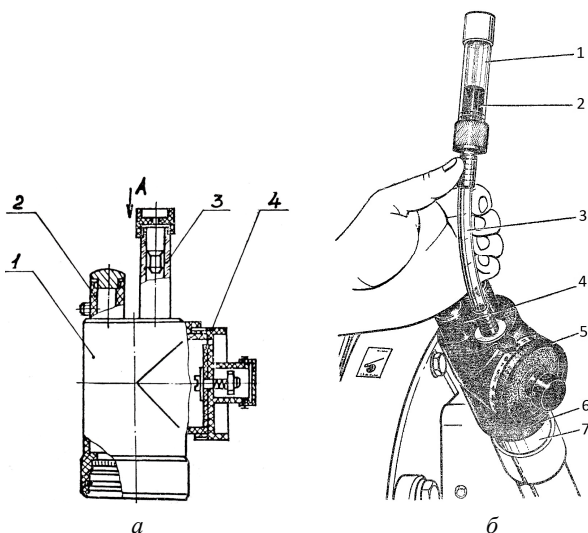


Рис. 3.36. Индикатор КИ-13671-ГОСНИТИ:
а – схема; *б* – вид в работе на дизеле Д-243 на тракторе «Беларус-80»;
 1 – корпус; 2 – дополнительное отверстие на 100 л/мин;
 3 – сигнализатор; 4 – дроссель со шкалой расхода

Таблица 3.8

Характеристика индикатора расхода газов КИ-13671-ГОСНИТИ

Параметр	Значение
1. Пределы измерения, л/мин	30–160
2. Цена деления шкалы расхода, л/мин	5
3. Предел допускаемой основной приведенной погрешности, %	5
4. Давление газов перед дроссельной щелью, мм вод. ст.	16
5. Габаритные размеры, мм	115×75×90
6. Масса, кг, не более:	
– в исполнении со стальным корпусом	0,7
– в исполнении с алюминиевым корпусом	0,4
– в исполнении с пластмассовым корпусом	0,25
7. Принадлежности: комплект конических втулок-переходников и конических пробок из пластмассы в количестве, шт.	6
8. Габариты футляра, мм	150×200×80
9. Полная масса, кг, не более	1,75

По сравнению с индикатором КИ-4887-II-ГОСНИТИ габариты и масса индикатора КИ-13671-ГОСНИТИ меньше соответственно в 1,5 и 10 раз при примерно равных возможностях и с несколько меньшей погрешностью измерений. Трудоемкость измерения сократилась в несколько раз до 2–3 мин, визуально определялось среднее значение расхода.

После дальнейших испытаний и доработок по ТЗ ГОСНИТИ индикатор вместо стального корпуса вначале получил корпус из алюминиевого сплава, затем из полистирола, а также сетчатый фильтр перед цилиндром сигнализатора, уплотнительное кольцо в основании корпуса, геометрически правильную дроссельную щель. Переходники для вертикальной установки индикатора впоследствии были исключены и заменены пластмассовой трубкой – удлинителем к сигнализатору давления, которая, защищая его от паров масла и воды, позволяла устанавливать сигнализатор в вертикальное положение. До перехода на полистирол внутренность корпуса прибора для предотвращения конденсации влаги покрывали пленкой солидола.

В связи с ограниченным пределом измерений дроссельной щели на крышку индикатора ввели 4 цилиндра с пробками так, чтобы открытие каждой увеличивало диапазон измерений на 100 л/мин. Испытания индикатора показали, что для диагностирования дизелей ряда маломощных достаточно одного дополнительного отверстия с общим диапазоном расхода 260 л/мин.

К индикатору КИ-13671-ГОСНИТИ в составе автоматизированных средств диагностирования было разработано несколько модификаций (рис. 3.37).



Рис. 3.37. Индикаторы КИ-13671.01-ГОСНИТИ:
а – для ДИПС КИ-13940-ГОСНИТИ; б – для АМТ КИ-13950-ГОСНИТИ

Прибор КИ-13671.01-ГОСНИТИ с потенциометром ПТП-21К к автоматизированным установкам ДИПС и АМТ имел 4 дополнительные отверстия и угловое присоединительное устройство для вертикальной установки индикатора.

Основные характеристики индикатора для автоматизированных установок:

- пределы измерений 1-го диапазона – 30–160 л/мин, 2-го – 130–260 л/мин;
- габаритные размеры – 115×75×190 мм;
- масса – 1,3 кг.

Высокая приведенная погрешность индикатора КИ-13671-ГОСНИТИ (6,5 %), объективно обоснованная при ведомственных приемочных испытаниях, невозможность включения индикатора в Госреестр средств измерений побудили выявить возможности совершенствования индикатора. Главным образом – расширить диапазон расхода на одном сужающем устройстве с постоянством коэффициента истечения C , что было невозможно в конструкции индикатора КИ-13671-ГОСНИТИ, где дуговая дроссельная щель имела максимальный угол раскрытия 170° , увеличить который было нельзя. Увеличение ширины достаточно большой щели на 1,5 мм нарушало требование расходомерии, устанавливало нестабильность потока, т. к. из турбулентного, требуемого по правилам расходомерии, поток становился ламинарным, что снижало коэффициент Re и точность соответствия расхода перепаду давления.

В результате дальнейшего совершенствования конструкции с учетом выявленных недостатков была предложена и поставлена на производство серийная конструкция индикатора расхода картерных газов КИ-17999-ГОСНИТИ, которая защищена а. с. № 1763928 (рис. 3.38, табл. 3.9)



Рис. 3.38. Серийная конструкция индикатора расхода картерных газов КИ-17999-ГОСНИТИ по а. с. СССР № 1763928

Техническая характеристика индикатора КИ-17999-ГОСНИТИ

Параметр	Значение
Диапазон измерения расхода на одном обороте крышки индикатора, л/мин	20–260
Предел основной допускаемой приведенной погрешности, %	±3
Нормативное давление газов перед кольцевой щелью, мм вод. ст	16
Габаритные размеры, мм	86×221
Размеры в рабочем положении на дизеле, мм, не более	100×250
Масса индикатора, кг, не более	1,0
Масса с принадлежностями, кг, не более	1,5
Наработка на отказ, ч, не менее	500
Контролируемые дизели	ЯМЗ, КамАЗ, ММЗ

Для обоснования комплекса нормативов расхода картерных газов как наиболее оперативного ресурсного параметра ЦПГ ДВС проведено исследование зависимости расхода от эффективной мощности автотракторных дизелей и установлена соответствующая корреляционная зависимость (рис. 3.39), что позволило разработать соответствующие нормативы, актуальные и в настоящее время (табл. 3.10) [36].

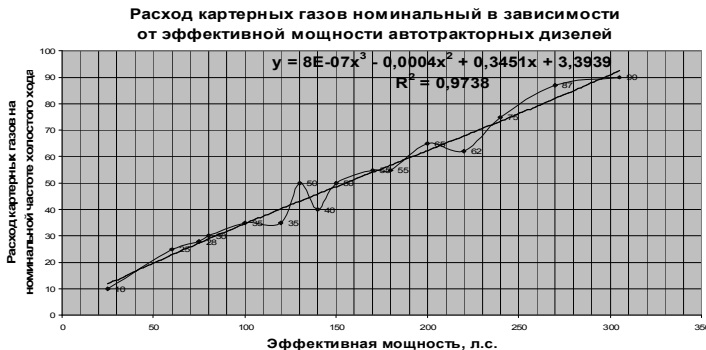


Рис. 3.39. График экспериментальной зависимости номинального значения расхода картерных газов автотракторных дизелей от номинального значения их эффективной мощности по результатам измерений с помощью индикаторов расхода газов КИ-13671-ГОСНИТИ

Таблица 3.10

Нормативные значения расхода картерных газов тракторных дизелей, установленные исследованиями

Марки дизелей	Объем ЦПГ, л	Объем картерного пространства, л	Частота вращения коленвала, мин ⁻¹	Значения расхода, л/мин		
				номинальное	допускаемое	предельное
ЯМЗ-8423	22,3	90	1900	90	145	268
ЯМЗ-240Б	22,3	90	1900	90	180	250
ЯМЗ-8423.10	22,3	90	1900	75	165	235
ЯМЗ-238НБ/НД	14,86	60	1700	65	130	180
Д-260.1	7,125	40	2100	55	120	170
Д-245.12С	4,75	30	2400	35	80	110
Д-243, Д-243Л	4,75	30	2200	28	68	95
Д-144-07, 10, 32	4,15	30	2000	35	80	95
КамАЗ-740	10,85	45	2600	40–45	140	185
ЯМЗ-238М	14,86	60	1900	65–75	130	180
ЯМЗ-236М	11,15	55	1900	45–55	100	145

При диагностировании значительно изношенных ДВС возможны: неудовлетворительная достоверность контроля расхода картерных газов из-за потери некоторого их количества, уходящего из картера, минуя индикатор; неплотности картерного пространства в переднем и заднем уплотнениях коленвала; утечки газов через каналы в блоке цилиндров, связывающие картерное пространство с полостью крышки головки блока и крышки шестерен распределения; утечки через неплотно закрытый сапун и в других местах. Расход газов, измеренный в таких случаях, меньше действительного.

Для обеспечения учета утечек картерных газов через неплотности картерного пространства ДВС предложен наиболее простой индикатор расхода газов (рис. 3.40) со сменными диафрагмами (патент РФ № 2266524, А. В. Дунаев и В. А. Чечет).

В предложенном индикаторе отпадает необходимость измерений при минимально возможном перепаде давления картерных газов (измерения возможны во всем диапазоне – от 10 мм до 1 м вод. ст.), поэтому обеспечиваются более стабильные показания индикатора. Это позволяет получить более достоверные результаты измерений, несмотря на двукратное измерение ΔP с двумя установками диафрагм.

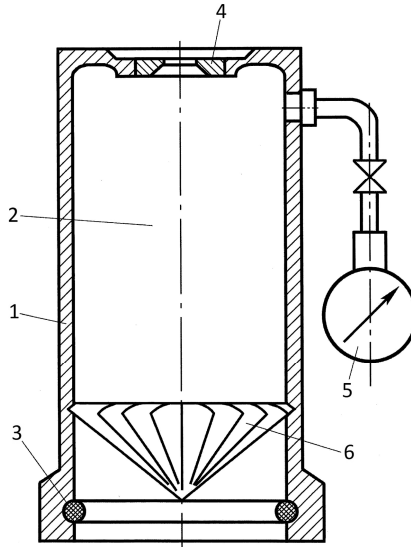


Рис. 3.40. Схема индикатора расхода картерных газов со сменными диафрагмами:

1 – корпус; 2 – внутренняя полость; 3 – уплотнение;

4 – сменная диафрагма; 5 – манометр на давление до 0,01 МПа;

6 – экран с развернутыми лопастями для осаждения брызг масла

3.5. Экспресс-оценка остаточного ресурса цилиндро-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания

Определение полного, а при ТО и ремонте остаточного срока службы актуально для большого класса машин и оборудования.

Оптимальный метод определения полного ресурса машин массового изготовления – технико-экономический: находят момент времени эксплуатации, при котором наступает минимум суммарных удельных затрат и издержек на использование, ТО и ремонт машины.

Для определения оптимального срока службы машин академик А. И. Селиванов, один из основателей науки о ремонте машин в АПК, выразил суммарные затраты потребителей, связанные с использованием машин, агрегатов, более простой функцией:

$$Y = A + Bt + Ct^{\delta}, \quad (3.11)$$

где $A = Q_m - O_1$ – первоначальная стоимость Q_m машины/агрегата, уменьшенная на стоимость O_1 реализованных остатков при снятии

машины/агрегата с эксплуатации; B – коэффициент затрат потребителя на эксплуатацию машины, пропорциональных времени t ; C – коэффициент прогрессирующих затрат потребителя на эксплуатацию машины/агрегата; δ – показатель степени роста прогрессирующих эксплуатационных затрат.

Отыскание оптимального срока службы машины/агрегата сведено к нахождению минимума функции удельных затрат

$$U = \frac{A}{t} + B + Ct^{\delta-1}. \quad (3.12)$$

Приравняв производную функции (3.12) к нулю и решив равенство относительно t , А. И. Селиванов получил более точное выражение для определения оптимального срока службы машины или другого объекта:

$$t = \delta \sqrt{\frac{A}{(\delta-1)C}}. \quad (3.13)$$

Технико-экономический метод оптимизации показателей использования машин глубоко развит В. М. Михлиным, доведен им до универсального использования по номограммам, таблицам и представлен в виде компьютерной программы «Турбо-НЭК», что получило признание за рубежом. Целевая функция, например функция оптимизации остаточного ресурса объекта через минимум суммарных удельных затрат и потерь C в зависимости от искомого остаточного ресурса, выражена в виде:

$$C(t_{\text{ост}}) = \min \left\{ \frac{Q(t_{\text{ост}})A}{t_{\phi}(t_{\text{ост}})} + \frac{[1-Q(t_{\text{ост}})]C}{t_{\phi}(t_{\text{ост}})} \right\}, \quad (3.14)$$

где Q – вероятность отказа элемента (объекта исследования); A и C – показатели затрат на устранение последствий вероятного отказа элементов и на замену элементов (со значениями их параметров выше допускаемых) для предотвращения отказов соответственно; $t_{\text{ост}}$, t_{ϕ} – искомый остаточный и фактический ресурсы объекта исследований соответственно.

Плавные равномерные изменения во времени t ресурсных параметров u , как и у академика А. И. Селиванова, описаны В. М. Михлиным в виде элементарной степенной функции

$$u(t) = v_c t^\alpha, \quad (3.15)$$

где v_c – скорость изменения/нарастания параметра; α – показатель степенной функции нарастания параметра: при $\alpha = 1$ линейное нарастание параметра, при $\alpha < 1$ – асимптотическое его уменьшение, при $\alpha > 1$ – прогрессирующий рост значения параметра.

В частном случае в соответствии с формулой (3.14) В. М. Михлиным предложено вычислять остаточный ресурс детали, сопряжения, узла (при $t_{\text{ост}}$ оптимальный срок службы агрегата и машины косвенно определяется равным нулю, если использовать соответствующие ресурсоопределяющие параметры) по уравнению

$$t_{\text{ост}} = t \left[\left(\frac{u_n}{u(t)} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right], \quad (3.16)$$

где u_n – заданное предельное значение параметра.

Универсальный математический аппарат для оптимизации искоемых параметров по минимуму суммарных удельных затрат и издержек основан на необходимости регистрации постепенного изменения в эксплуатации ресурсоопределяющих параметров деталей, контроле отказов и неисправностей, учете непрерывных и дискретных затрат на обслуживание и устранение отказов, издержек и потерь от простоев машин и оборудования. В связи с этим реализация универсальной методики требует сбора немало по объему и времени диагностических и технико-экономических данных.

В 2010 г. в лаборатории № 14 ГОСНИТИ была предпринята попытка обосновать методику определения остаточного ресурса дизелей по параметрам их топливной экономичности. Но при анализе было выявлено, что такой подход, основанный лишь на одном измерении дымности ОГ на неинформативном холостом ходу дизелей, не только неправилен, но и не связан ни с топливной экономичностью, ни с ресурсными параметрами ЦПГ и кривошипно-шатунного механизма (КШМ). Методика сводится к расчету оста-

точного ресурса по измеренной на холостом ходу дымности ОГ с опорой на номинальные и предельные ее значения, взятые по приблизительным данным ГОСТ 21393–75, ГОСТ 17.2.2.02–98.

Однако показания дымности зависят не столько от удельного расхода топлива и угара масла, сколько от других факторов состояния дизеля и условий его контроля, в т. ч. от регулировочных параметров топливной аппаратуры (давление впрыска 4–12 форсунок, угол начала подачи) и ГРМ (8–24 клапанов), не имеющих отношения к ресурсу дизеля, обусловленному потребностью в капитальном ремонте по состоянию КШМ и ЦПГ. Кроме того, показания дымности в анализируемой методике измеряются на нехарактерном для контроля дымности ОГ режиме, не являются показательными и используются только для экологического контроля, а номинальные и предельные значения дымности для методики, обоснованные в ЕЭС в 70-х гг., сугубо ориентировочны. Такая методика несостоятельна.

Вместе с тем на практике в полевых условиях и для мастерских хозяйств требуется оперативное и достоверное определение остаточного ресурса ЦПГ, который обычно определяет потребность ДВС в ремонте со снятием его с машины. Растет актуальность экспресс-метода и в связи с ширящимся для увеличения ресурса ДВС успешным применением различных трибосоставов неорганической и органической природы.

Важная роль в подготовке, отслеживании результатов и корректировке так называемого безразборного ремонта принадлежит углубленному диагностированию ЦПГ. Применяемый для этого контроль компрессии, дополняемый контролем вакуума в цилиндрах по методике профессора В. А. Чечета (РГАУ-МСХА), позволяет определять как исправность деталей, образующих камеру сгорания, так и аварийные дефекты клапанов газораспределения, износы, аварийные дефекты поршневых колец и гильз по отдельным цилиндрам ДВС даже в полевых условиях.

Широкое применение контроля полного и остаточного вакуума приборами типа КИ-5973-ГОСНИТИ марок АГЦ, АГЦ-2 и АПЦ позволило накопить необычный статистический материал диагностирования ЦПГ. Сопоставив в его материалах 100 значений полного, 100 – частичного вакуума со 100 соответствующими значениями компрессии, получили диагностическую информацию, позволяющую оценивать израсходованный и остаточный ресурсы каждого

цилиндра в отдельности (патенты РФ № 2479830 и 2479831). Кроме того, можно определять условия, при которых целесообразно восстанавливать работоспособность ЦПГ добавками в моторное масло.

Наиболее наглядная зависимость полного и остаточного вакуума от компрессии для основных марок бензиновых ДВС приведена на рис. 3.41, где верхняя кривая – по остаточному вакууму, а нижняя – по полному. Здесь долю остаточного ресурса ЦПГ конкретного цилиндра определяют как отношение длины кривой от точки результатов его диагностирования (точка А или Б) до зоны предельного состояния ЦПГ (точка С) к общей длине кривой графика (ОС), т. е. отношением АС/ОС или БС/ОС.

Начальная часть кривой от зоны номинальных значений параметров (точка О) до точки конкретного технического состояния (точка А или Б) аналогично определяет долю израсходованного ресурса. Зная наработку ДВС при контроле, можно примерно оценить остаточный ресурс $T_{\text{ост}}$ в ее единицах:

$$T_{\text{ост}} = T_{\text{контр}} \frac{L_{\text{АС}}}{L_{\text{ОА}}}, \quad (3.17)$$

где $T_{\text{контр}}$ – наработка тракторного дизеля, ч, или пробег автомобиля на момент определения остаточного ресурса, тыс. км; $L_{\text{АС}}$ – длина линии графика на рис. 3.41 от точки А момента диагностирования до точки С предельного состояния ЦПГ по предельным значениям параметров компрессии (табл. 3.11) (полного и остаточного вакуумов, установленных профессором В. А. Четом); $L_{\text{ОА}}$ – аналогично длина линии графика от точки О номинального состояния до точки А или Б момента диагностирования ЦПГ.

Предпочтительнее пользоваться верхней кривой, а нижнюю задействовать для уточнения результатов диагностирования.

Рис. 3.41 и табл. 3.11 показывают пример реализации изложенного метода, где у автомобиля ВАЗ-21013 с пробегом 88 500 км расход моторного масла на угар повысился до 0,85 л на 1000 км и возникла необходимость определить техническое состояние цилиндров и меры по уменьшению расхода масла.

Диагностирование и восстановление ЦПГ было совмещено путем введения в каждый цилиндр 20 мл, а в картерное масло – 100 мл масляно-керосиновой суспензии серпентинового препарата Recovery от НПФ «ЭСКО» при ГНУ ВИЭСХ. При снятых свечах зажигания

шесть раз прокручивали ДВС стартером по 5–7 с с интервалом 1,5–2 мин. Далее двигатель запустили, и на частоте вращения 700–800 мин⁻¹ он работал примерно 68 мин до паровыделения из выпускной трубы. Для ускорения процесса несколько раз увеличивали частоту вращения до 3000–3500 мин⁻¹. Такая процедура сочетает подготовку ЦПГ к диагностированию и ее восстановление. В табл. 3.11 приведены значения параметров ЦПГ после всех работ.

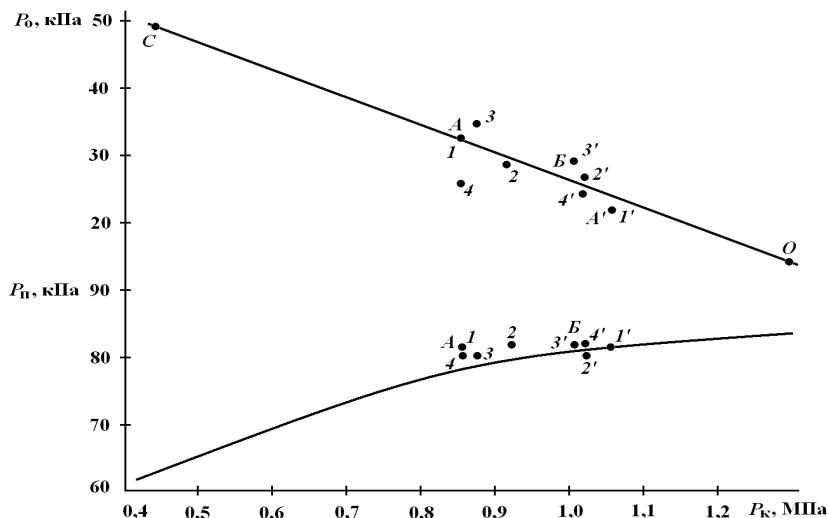


Рис. 3.41. График для определения остаточного ресурса отдельных цилиндров бензиновых ДВС со степенью сжатия 8–12 по диагностическим параметрам: P_o и P_n – остаточный и полный вакуум в цилиндрах соответственно, кПа, определяемый приборами типа АГЦ; P_k – компрессия в цилиндрах, МПа

Таблица 3.11

Пример реализации экспресс-метода определения остаточного ресурса ЦПГ бензинового ДВС при безразборном ремонте, кПа

Показатели	Цилиндры			
	1-й	2-й	3-й	4-й
Первое диагностирование до обработки (пробег – 88 500 км)				
Компрессия	850	920	870	850
Полный вакуум	81	82	80	80
Остаточный	32	28	34	25

Показатели	Цилиндры			
	1-й	2-й	3-й	4-й
Второе диагностирование после первой обработки (пробег – 88 996 км)				
Компрессия	900	950	890	900
Полный вакуум	82	82	80	82
Остаточный	20	24	30	26
Третье диагностирование после второй обработки (пробег – 89 960 км)				
Компрессия	1050	1010	1000	1010
Полный вакуум	81	80	81	82
Остаточный	22	26	28	24
Контроль, пробег (92 037 км)				
Компрессия	1050	1020	1020	1100

По результатам первого диагностирования (см. рис. 3.41) наименьшим был остаточный ресурс ЦПГ первого цилиндра (точка А) и составил 27 %, а израсходованный был наибольшим – 73 %. После двух воздействий по результатам третьего диагностирования наименьшим стал остаточный ресурс третьего цилиндра (точка Б), но составил уже 49 % (до обработки – 28 %), а наибольшим – остаточный ресурс первого цилиндра (55 %, точка А'). Таким образом, минимальный остаточный ресурс ДВС (по третьему цилиндру) составил 86,4 тыс. км.

После первой обработки угар масла уменьшился, а после второй стал незаметным. Окончательный контроль подтвердил стабильность хорошего результата обработки, и к пробегу 130 тыс. км ухудшения работы мотора не наблюдали. Получены подобные зависимости и для дизелей (рис. 3.42).

По тем же статистическим данным и полученным кривым выявлено, что если точка результатов контроля не укладывается на кривые, то это означает, что ЦПГ в данном цилиндре имеет аварийный дефект. Чем больше точка удалена от линии естественного изнашивания ЦПГ, тем значительней этот дефект. Кроме того, если положение точек результатов контроля для одного цилиндра на обеих кривых противоречиво, то это свидетельствует об ошибках измерений и требует перепроверки.

Разработанный метод экспресс-оценки остаточного ресурса ЦПГ ДВС защищен патентами № 2479830 и 2479831 «Способ определения остаточного ресурса цилиндро-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания».

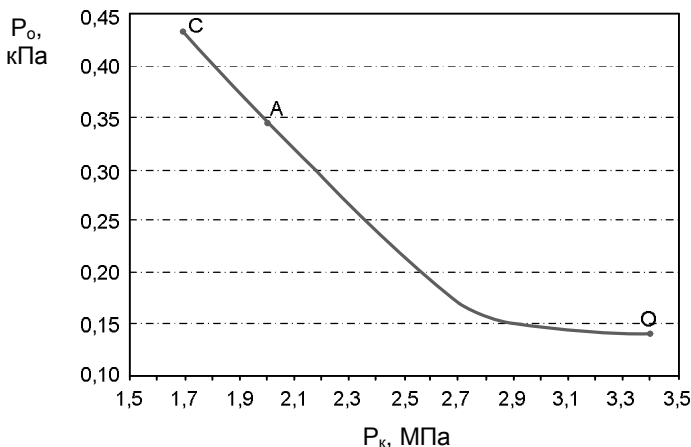


Рис. 3.42. График определения остаточного ресурса отдельных цилиндров дизелей степенью сжатия 13,5–17:

P_0 – остаточный вакуум в цилиндре, определяемый приборами типа АГЦ, АЦП по методу, защищенному патентом № 2184360 В. А. Чечета и Н. Т. Иванова, кПа;

P_k – компрессия в цилиндре по компрессиметру, МПа

Точка О ($P_k = 3,4–3,6$ МПа) – начало эксплуатации дизеля, остаточный ресурс – 100 %. Точка С ($P_k = 1,5–1,7$ МПа) – выбраковка ЦПГ, остаточный ресурс – 0 %. Отношение расстояния L_{OA} от точки О до точки А при контроле к полной длине L_{OC} определяет отношение израсходованного ресурса T (ч или км пробега) к полному ресурсу, а отношение длины L_{AC} к L_{OC} оценивает остаточный ресурс $T_{ост}$ отдельного цилиндра.

Дизелю в целом назначают наименьший остаточный ресурс какого-либо цилиндра. Первое диагностирование проводят после раскоксовывания ЦПГ перед началом РВС-ремонта, например введением в дизель по нормативной технологии РВС-трибосостава. Затем пускают дизель на наработку около 50 ч или пробег 500 км и проводят второе диагностирование. Если первое диагностирование не показало аварийного состояния деталей ЦПГ, то эффективность дальнейшего РВС-ремонта по данным второго диагностирования оценивают по смещению диагностических точек вправо, к «омоложению» дизеля.

Опыт безразборного ремонта ДВС минеральными добавками в масла более чем за 25-летний период доказал его безусловную эффективность, но при условии, что в ДВС нет аварийных дефектов, а его остаточный ресурс составляет не менее 20 % от номинального,

т. е. если компрессия в бензиновом моторе не менее 5 атм, в дизеле – не менее 15 атм, а расход масла на угар – не более 10 % от расхода топлива, хотя предельным значением угара масла считалось 3,5–5 %.

В работе [30] приведен обобщающий практический опыт по выявлению неисправностей дизелей, предотвращению их интенсивного изнашивания и отказов.

Так, внешний осмотр, слушивание, оценка срока службы машины и квалификации оператора дадут первую характеристику дизеля, вторую – эмоциональная оценка оператором мощности и расход ТСМ. Продолжают контроль оценкой моторного масла. Необходимо взять пробу масла – не шупом из верхнего, нехарактерного слоя масла, а донного, в котором может быть вода. Контроль донной и средней долей масла существенно уточнит его состояние, хоть и не послужит для арбитражной оценки. Масло проверяют на:

– *цвет, прозрачность, расслоение, взвеси*: свежее масло прозрачно, сине-зеленого или светло-коричневого цвета, а долго работавшее – коричневого, серого или черного цвета. Последний не всегда является браковочным, он свидетельствует о моющих свойствах как следствие насыщения масла отмытыми загрязнениями и сажей неполного сгорания топлива. Если масло белесое, мутное, то оно обводнено и испорчено. Чрезмерно вязкое масло, оставляющее на фильтровальной бумаге густое черное пятно с отблеском или нерасплывающуюся каплю, – брак. Если масло расслаивается – верх обманчиво прозрачен и золотист, а низ мутен, содержит взвеси, осадок, шлам – то масло также является браком;

– *металлические частицы*, извлекаемые сильным магнитом, блестящие металла в срезе осадка в масляной центрифуге, на маслофильтрах, на дне картеров;

– *абразивные механические примеси*: при истирании масла с абразивными частицами между стеклянными пластинками или пластинками из закаленной стали слышен скрип, а на пластинах образуются риски;

– *обводненность*: по паровыделению из сапуна, запотеванию его крышки, крышки маслозаливной горловины, внутренности крышки головок цилиндров. Если нанести каплю масла на запястье в теплом помещении, то по вытеканию микроструек по бороздкам кожи выявляют воду. В стационаре можно капнуть маслом на разогретую электроплитку с закрытой спиралью, или поджечь промасленный фитиль, или опустить нагретое жало паяльника в масло. Вода в масле закипит, пламя фитиля с обводненным маслом будет потрескивать;

– *моюще-диспергирующую способность* по «капельной пробе» как интегральную проверку, позволяющую за 15 мин проверить рабочие показатели масла и предупредить запоздалую его смену. Каплю горячего или теплого масла наносят на фильтровальную бумагу (ГОСТ 11026) и выдерживают 15 мин в тепле. Вначале можно использовать любую бумагу, белый и черный ситец.

По наработке диаметр пятна масла уменьшается из-за потери моюще-диспергирующих и моторных свойств и укрупнения мех-примесей. По мере порчи масляное пятно из светло-серого превращается в темно-черное и неуклонно уменьшается в диаметре. Если капля не растекается вообще, представляя собой шлам грязи и воды, то это признак аварийного или предаварийного состояния ДВС.

Шестидесятипятилетняя практика показала, что «капельная проба» в любых условиях и без какого-либо оборудования позволяет быстро и эффективно контролировать масло, а по нему и состояние ДВС, предотвращать его интенсивное изнашивание и аварии. «Капельная проба» введена в руководства по эксплуатации транспортных, судовых и некоторых тракторных дизелей, а фирма Shell – разработчик метода – компьютеризировала его, предоставив возможность измерения оптической плотности масла. Диагностирование, как правило, определяет только текущее состояние объекта контроля, а должно в первую очередь выявлять причины неисправностей и давать рекомендации по их устранению. Поэтому контроль загрязненности, обводненности и «капельной пробы» масла как главных индикаторов повышенного или аварийного изнашивания ДВС является главным;

– *вязкость* – показатель, определяемый по скорости стекания масла с масломерного шупа, по истиранию масла пальцами, но таким образом выявляют только очень разжиженное масло. При необходимости можно использовать стеклянную трубку с шариком из подшипника. Разница между внутренним диаметром трубки и шарика может составлять 0,5–2,0 мм. Вязкость оценивают сравнением времени падения шарика в эталонном и проверяемом масле.

В завершение контроля при малом давлении в системе смазки следует проверить его механическим манометром на прогревом ДВС при минимальной частоте вращения, т. к. это самый опасный для ДВС режим.

Виброакустический контроль так же важен, как и визуальный. В предаварийном состоянии ДВС проводить контроль следует

осторожно, чтобы не вызвать аварию. Требуются навык, память на нормальные и ненормальные звуки, стуки и вибрации, умение настраиваться на шумы высокого тона – сплошные, прерывистые, импульсные от ГРМ, форсунок, а низкого – от подшипников коленвала. Удобен медицинский фонендоскоп, защищающий уши от низкочастотного гула выхлопа и позволяющий выявлять слабые стуки низкого и высокого тона. У него удаляют мембранный датчик, заглушают трубку пробкой, прижимают трубку к местам контроля с разным усилием, что позволяет различать глухие и звонкие стуки. Навык такого контроля сформирован у опытных механизаторов и водителей.

Предварительная оценка силы, характера и условий проявления стуков по времени и режимам работы ДВС по данным тракториста с анализом других проверок необходима до перепроверки стуков на повышенной частоте вращения коленвала, чтобы избежать аварии ДВС при диагностировании.

Аварийные стуки в ДВС редки и обусловлены чрезмерной изношенностью КШМ только при нарушении правил эксплуатации. Они прослушиваются простейшим стетоскопом и на слух в зоне коренных подшипников при средних и малых частотах вращения коленчатого вала. Стуки в ЦПГ трудноразличимы. Резко выделяются звонкие стуки ГРМ, частые, высокого тона. Они прослушиваются издали и на любой частоте вращения коленчатого вала. У мощных низкооборотных дизелей стуки ГРМ сопоставимы с так называемыми форсуночными стуками, которые можно выделить отключением форсунок.

Контроль ЦПГ для предремонтного и послеремонтного анализа можно выполнять различными методами [30, 35]:

– по *дымности ОГ*. Начинающееся интенсивное изнашивание ЦПГ сопровождается повышенным угаром моторного масла, т. е. его сгоранием в ЦПГ, и проявляется бело-голубым, а при большом износе ЦПГ – синеватым цветом ОГ. В ОГ возможны капли масла, что проверяется их отпечатком на бумаге или на ладони.

Черный цвет дыма говорит о неполном сгорании топлива из-за его избытка или недостатка воздуха (загрязнены воздушные фильтры и/или снижено давление наддува) и к износу ЦПГ отношения не имеет. В ОГ возможно наличие крупинки сажи, проверяемых отпечатком ОГ так же, как и капли масла.

Белый «холодный» дым непрогретых дизелей возникает при неисправности топливной аппаратуры из-за плохого распыла топлива, когда часть его в цилиндрах не загорается;

– по расходу масла на угар. Суммируют объемы доливок масла в ДВС по мере снижения его уровня и заливки топлива, например за квартал – при небольшом угаре или чаще – при большом. Метод не требует приборов, но информативен.

При суммировании доливок масла исключают явные протечки, видимые на деталях ДВС, унос масла с картерными газами системой вентиляции, потери с брызгами из сапуна, осадок масла в поддоне воздухоочистителя, а особенно – расход через ГРМ при неисправных маслоотражательных колпачках. При чрезмерном износе ЦПГ может наблюдаться прямой унос масла с ОГ. Однако возможно и повышение уровня масла в картере из-за попадания в него топлива (протечки из системы питания, пропуски из камеры сгорания несгоревшего топлива).

Контроль обобщенно оценивает износ компрессионных и маслоъемных колец всех поршней. Его полезно сочетать с контролем давления газов в картере U-образно смонтированной прозрачной трубкой с водой, присоединяемой к картерному пространству, или с контролем расхода газов, прорывающихся из камер сгорания в картер ДВС, но это требует даже простейшего индикатора расхода газов КИ-17999-ГОСНИТИ. При исправных маслоотражательных колпачках и отсутствии протечек достаточно контроля угара масла. Если значения угара масла и прорыва газов не противоречивы и выше допустимых, нужна замена колец или ЦПГ в целом.

Для плановой переборки ДВС нормами угара масла были 3,5–5 % от расхода топлива, для современных автотракторных дизелей это 2,5–3 %, для импортных – 2,5 % при номинальном значении угара 0–0,05 %. ПО «ЯМЗ» считает, что у новых дизелей ЯМЗ начальный угар масла составляет не более 0,5 % (на некоторых дизелях на протяжении квартала/полугода угар может быть незаметен). Приведенные нормативы относятся именно к угару масла в ЦПГ при исправном состоянии систем питания (отсутствие разжижения масла несгоревшим топливом), воздухоподачи (без отсоса масляного тумана при загрязненных воздухоочистителях) без потерь масла в ТКР и в воздушном компрессоре.

Дизель может устойчиво, но неэкономично работать при угаре масла до 10 %, поэтому экономическим пределом угара масла может быть превышение затрат на его долив, например за рабочий сезон, к затратам на замену поршневых колец или полную замену ЦПГ.

Органолептический контроль по давлению или расходу картерных газов может выявить только повышенный износ ЦПГ, когда

значителен выход газов из сапуна и они даже выносят брызги масла. Более точен контроль по давлению газов в картере, но при герметичном картерном пространстве.

На рис. 3.35 показано изменение параметров состояния неаварийной ЦПГ. Менее показательные компрессия и разрежение во впускном воздушном тракте, определяемые на неработающих ДВС, уменьшаются только на 15–50 %, а более информативные, определяемые на работающих ДВС, увеличиваются в 3–5 и более раз, как, например, угар масла и расход картерных газов. Кривая 4 на рис. 3.35 показывает уменьшение угара масла в начале эксплуатации, что соответствует приработке ДВС, поэтому более полувека этот параметр считается очень достоверным.

Высокая информативность расхода масла на угар (рис. 3.43) позволяет обобщенно оценить износное состояние ЦПГ и предотвратить работу ДВС в предаварийном режиме. Сопоставляя фактический угар масла с допустимыми (2–3 %, ремонт не требуется) и предельными (3,5–5 %, ремонт требуется) нормами, можно планировать для дизеля сроки и виды ремонтно-обслуживающих воздействий.

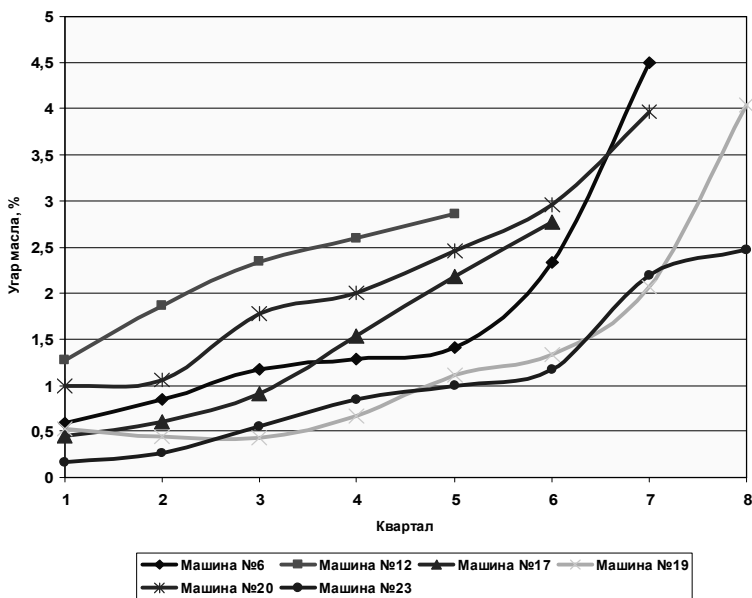


Рис. 3.43. Среднеквартальный угар масла дизелей 8ДМ-21А автосамосвалов БелАЗ: дизели машин № 19 и 23 – новые, остальных – отремонтированные

Есть и другие обобщенные методы оценки состояния ЦПГ, например по времени прокрутки ДВС для пуска. При снятии свечей зажигания или форсунок нужно оценить их внешний вид (без разрушений и прогара, без замасливания, без отложений присадок к бензину для свечей, без нагара, кокса и ржавчины для форсунок), заглянуть в цилиндры или проверить щупом чистоту поршня, отсутствие на нем масла, а в крайних случаях – воды или дизельного топлива. Разнообразие состояния свечей зажигания информативно для диагностирования систем питания и зажигания ДВС, о чем имеются подробные рекомендации.

Для бензиновых ДВС оценили работу цилиндров по снижению частоты вращения коленвала при отключении их зажигания. Отключение топливоподачи в быстроходных маломощных дизелях с малым моментом инерции коленвала и маховика, не имеющих всережимного регулятора ТНВД, проводится аналогично отключению зажигания. А в многоцилиндровых низкооборотных мощных дизелях с большим моментом инерции коленвала и маховика при работе ТНВД отключение топливоподачи в один-два цилиндра ощутимого снижения частоты вращения коленвала не дает.

Силовую передачу прослушивают издали от движущейся машины, контролируют смещение ее деталей при приложении радиальных, вращающих и осевых усилий, подтеки масла, нагрев мест подшипников простейшим дистанционным термометром IR Thermometer, а при смене масел – наличие металлических частиц на магнитах сливных пробок.

В мастерской должны присутствовать контрольный манометр, фильтровальная бумага, стетоскоп из деревянного или высушенного растительного стержня, который при контроле зажимают в зубах, магнит, электроплитка или паяльник и другие средства по опыту, накопленному за 100-летнюю эксплуатацию автотранспорта.

Таким образом, имеется арсенал приемов регулярного органолептического контроля ДВС, позволяющий выявить причины неисправностей и предотвратить повышенное изнашивание и аварии без средств диагностирования.

При устойчивом финансовом состоянии приобретают простой комплект средств диагностирования, включающий тестеры состояния ЦПГ, давления масла и топлива, ручной пресс для форсунок и ТНВД, компрессиметр и набор переходников.

3.6. Методы и средства диагностирования топливной аппаратуры дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин

В процессе эксплуатации дизеля большое число нарушений рабочего процесса двигателя связано с неисправностями топливной аппаратуры – 25–50 % от общего числа. Однозначное распознавание неисправности топливной аппаратуры даже при нормальной работоспособности других систем дизеля невозможно. Следует учитывать и то, что плотная компоновка моторного отсека (особенно дизелей импортного производства) и сложность топливной системы являются основными причинами высокой трудоемкости демонтажа узлов топливной аппаратуры. Поэтому принимать решение о необходимости снятия ТНВД и форсунок с дизеля для ремонта нужно весьма осторожно и только по результатам их диагностирования.

Одни и те же внешние признаки нарушения рабочего процесса дизеля могут быть вызваны неисправностями топливоподачи как низкого, так и высокого давления, а также отсутствием компрессии в цилиндрах двигателя. Кроме того, неисправности топливоподачи низкого давления являются причиной нарушения работоспособности элементов системы топливоподачи высокого давления. Аналогичное воздействие наблюдается и внутри системы топливоподачи высокого давления.

Во избежание ошибок при диагностировании предлагается следующий порядок поиска неисправностей, связанных с нарушением нормального рабочего процесса дизельного двигателя:

– диагностирование топливоподачи низкого давления в последовательности: контроль наличия воздуха в системе → проверка топливоподкачивающего насоса → фильтра тонкой очистки топлива → перепускного клапана;

– диагностирование топливоподачи высокого давления в последовательности: ТНВД → форсунки.

Одним из методов диагностирования топливной аппаратуры является оценка по параметрам ОГ. Вместе с тем указанные параметры являются функцией как топливной аппаратуры, так и технического состояния агрегатов наддува, цилиндро-поршневой группы и др. Только по параметрам ОГ оценить состояние топливной аппаратуры трудно.

Регулировку топливной аппаратуры дизелей во многих случаях контролируют по максимальному давлению сгорания, температуре ОГ за каждым цилиндром и выходу рейки топливного насоса высокого давления. По этим же параметрам осуществляют и оценку технического состояния. Однако повышение температуры ОГ по мере эксплуатации дизеля неизбежно вследствие ухудшения технического состояния других узлов и агрегатов, в т. ч. цилиндро-поршневой группы, газораспределительного механизма, системы воздухообеспечения.

Ухудшение технического состояния дизеля, происходящее в процессе эксплуатации, приводит к тому, что определенные на каком-либо фиксированном режиме параметры и показатели двигателя имеют отличные от исходных значения. Общее снижение индикаторного КПД определяется как изменением состояния внешних по отношению к цилиндру систем, приводящих к отклонению параметров, так и ухудшением состояния топливной аппаратуры в целом.

На рис. 3.44 представлены закономерности изменения индикаторного КПД во втором и третьем цилиндрах судового дизеля 8ЧН 26/26 с учетом наработки. Через 200 ч после начала испытаний индикаторный КПД третьего цилиндра несущественно отличается от исходного значения (сплошная кривая). После 1200 ч работы это отличие составляет всего 0,005. При значительном общем снижении индикаторного КПД, равного 0,038, на долю топливной аппаратуры приходится очень незначительная часть (13 %) этого изменения. Таким образом, ухудшение экономичности вызвано не топливной аппаратурой, а другими элементами конструкции двигателя.

Для второго цилиндра характерно значительное ухудшение экономичности через 1200 ч работы (разность индикаторного КПД равна 0,051) при сравнительно малом изменении состава смеси. Как видно из данных рис. 3.44, основная доля снижения индикаторного КПД приходится на топливную аппаратуру второго цилиндра (примерно 80 %), а остальная часть обусловлена изменением режимных параметров вследствие изменения состояния других агрегатов дизеля.

Приведенная методика и результаты ее опытной проверки позволяют сделать вывод о возможности оценки состояния топливной аппаратуры указанным способом, однако он имеет недостатки. Для оценки конкретных цилиндров необходимо знать температуру газов и состав смеси каждого из них. Оценить состав газов в i -м цилиндре сложно, особенно для дизелей с импульсной системой наддува при наличии продувки. Неизбежность применения автоматических устройств усложняет систему диагностирования.

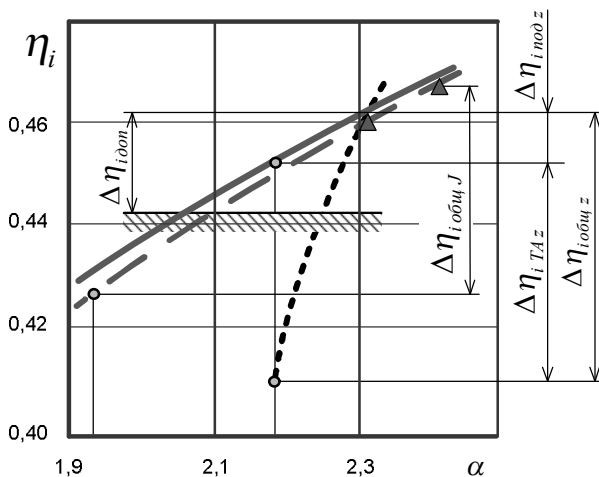


Рис. 3.44. Изменение индикаторного КПД дизеля в зависимости от состава смеси и наработки

Важным параметром, характеризующим работу системы топливоподачи, является продолжительность и опережение подачи топлива. В процессе эксплуатации угол опережения впрыска топлива изменяется вследствие износа прецизионных деталей насоса высокого давления. При эксплуатации автомобильных дизелей рекомендуется определять угол опережения подачи топлива по моментоскопу (метод дает удовлетворительные результаты только при новой плунжерной паре и новом нагнетательном клапане).

Известны методы диагностирования топливных насосов высокого давления, базирующиеся на определении углов опережения подачи топлива и продолжительности впрыска, использование которых связано с минимальным вмешательством в работу топливной аппаратуры. Общий их принцип – датчик монтируют в трубопровод высокого давления или устанавливают в ответвление трубопровода форсунки.

Отрицательная сторона методов определения угла начала впрыска – необходимость доступа к маховику или какому-либо шкиву двигателя, имеющему угловые метки, по которым стробоскопом делают замеры. Перспективу устранения этого неудобства видят в установке на двигатель импульсного датчика, соответствующего верхней мертвой точке.

Еще один метод диагностирования топливной аппаратуры – с помощью прибора для проверки дизельных форсунок ДД-2110. Прибор позволяет провести диагностику практически всех типов дизельных форсунок и проводить измерения: давление начала впрыска и качество распыления топлива, герметичность запорного конуса (по появлению капли топлива на носике распылителя), гидроплотность (по запорному конусу и направляющей цилиндрической части).

Виброакустический метод дает наиболее достоверные и исчерпывающие результаты диагностирования при использовании комплекта виброакустической аппаратуры. Универсальность метода позволяет использовать разработанные алгоритмы в различных отраслях техники. Недостаток заключается в том, что из-за большой стоимости и сложности, требующей высокой квалификации операторов-диагностов, ее применение возможно только на высокотехнологичных предприятиях технического сервиса.

Спектрографический метод диагностирования предусматривает анализ проб масла и иных жидкостей из полостей механизмов машины с целью выявления интенсивности изнашивания деталей, работающих в соответствующей среде.

Средствами электрографии можно установить темп износа движущихся и сопряженных с ними деталей, трансмиссии и ходовой части машин. Для специального анализа масел применяется установка КИ-13955.

Диагностирование с помощью встроенных контрольно-измерительных приборов (функциональное диагностирование) осуществляется в процессе использования машин по назначению. По указателям температуры судят о состоянии системы охлаждения и режимах загрузки машины; по указателям и сигнализаторам давления – об исправности системы смазки; с помощью тахометров и спидометров контролируют скоростные режимы и степень загрязненности воздушного фильтра и т. д.

Недостаток метода – необходимость частичной или полной разборки, увеличивающей интенсивность изнашивания, нарушение приработки, большая трудоемкость.

Магнитоэлектрический метод диагностирования основан на регистрации изменяющегося магнитного потока в датчике диагностического прибора, взаимодействующего с вращающимися деталями механизмов машины. Метод позволяет регистрировать

перемещения, фазовые параметры (момент впрыска, начала подачи топлива, фазы газораспределения) и определять отношение этих параметров к номинальным значениям.

Недостаток метода – большая трудоемкость и невозможность комплексного контроля сложных систем.

Газоаналитический метод заключается в определении скорости потока воздуха, его температуры, давления, а также химического состава выхлопных газов. Имея эталонные данные, можно определить техническое состояние дизельных и бензиновых двигателей и т. д.

Более глубокая проработка данных методов с учетом требований, предъявляемых к ним на основе проведенных выше анализов, позволит получать более полную и точную информацию о работоспособности ТА, ее функционировании и техническом состоянии с учетом всех элементов системы. Поэтому необходимо повышать эффективность использования современных бесконтактных и неразборных методов диагностирования, основанных на анализе выходных параметров, функционально связанных со структурными параметрами.

Рынок оборудования предлагает достаточно широкий спектр приборов как импортного, так и отечественного производства, стоимость которых различна. Рассмотрим оборудование отечественного производителя, предлагающего максимально возможный спектр необходимых приборов для оснащения участка по ремонту топливной аппаратуры.

Спектр выбираемого оборудования должен обеспечить диагностику неисправностей двигателя и топливной аппаратуры, проведение регулировочных и ремонтных работ.

Один из основных приборов на участке по ремонту топливной аппаратуры – стенд для испытания и регулировки ТНВД. Это самый дорогостоящий инструмент в мастерской, и к нему предъявляются жесткие требования. Существуют различные модификации и производители данного типа оборудования, и выбор стенда зависит только от целей и задач топливного участка.

С введением в эксплуатацию современных впрысковых систем Common Rail на стенд возлагается функция проверки и ТНВД, и форсунок, поэтому к стендам предъявляются такие требования, как оснащение современными блоками управления ТНВД и форсунками, способными генерировать сигналы не только для электромагнитных, но и для пьезоэлектрических инжекторов; безмензурочными высоко-

точными измерительными системами; системами фильтрации калибровочного масла (соответствие жидкости стандарту ISO 4113 обязательно, запрет на использование дизельного топлива); системой термостабилизации; защитными экранами, т. к. струя тестовой жидкости легко может прошить слой кожи оператора.

Базовым прибором для проведения оперативной диагностики дизельной топливной аппаратуры является механотестер топливной аппаратуры МТА-2 (ДД-2120). Это простой компактный переносной прибор позволяет проводить тестирование состояния форсунок, нагнетательных клапанов и плунжерных пар ТНВД без снятия их с двигателя, что позволяет существенно сэкономить время и средства на проведение диагностики. Вначале осуществляется экспресс-диагностика всех форсунок дизеля, затем с двигателя снимаются только неисправные форсунки.

Мелкое распыливание подаваемого в цилиндр топлива достигается в современных топливных системах за счет больших давлений. Высокое давление обеспечивается наличием малых зазоров между плунжером и втулкой (не более 1–5 мкм). Простота решения герметичности уплотнения является одновременно и недостатком насосов высокого давления, т. к. увеличение кольцевого зазора вследствие износа снижает плотность пары «плунжер–втулка», что сказывается на величине развиваемого давления. Из этого следует основное контрольное мероприятие, определяющее возможность дальнейшей эксплуатации, – проверка плотности. Это относится к прецизионным парам насоса и форсунки. Существует способ проверки плотности плунжерных пар непосредственно на двигателе: необходимо подключить механотестер МТА-2 к секции топливного насоса (можно через трубку высокого давления), выставить проверяемую плунжерную пару в положение, соответствующее середине пути нагнетания топлива, обеспечить в полости нагнетания давление 25 МПа и измерить с помощью секундомера продолжительность снижения давления в интервале от 20 до 15 МПа. Также можно, запустив двигатель, оценить максимальное давление, создаваемое данной плунжерной парой. Проверка проста и не требует больших затрат времени.

Стенд позволяет производить регулировку и диагностику ТНВД дизельных двигателей отечественного и зарубежного производства с количеством секций до 8.

Асинхронный электропривод с преобразователем частоты позволяет плавно регулировать частоту вращения выходного вала станда, осуществляет стабильность поддержания частоты вращения с минимальными отклонениями, удовлетворяющую стандартам ISO, компактен и прост в управлении.

Стенд оснащен электронной системой управления с обратной связью, что позволяет поддерживать высокую точность вращения выходного вала независимо от нагрузки. Позволяет обслуживать ТНВД двигателей автомобилей, тракторов, комбайнов и другой самоходной сельскохозяйственной техники.

По специальному заказу стенд комплектуется оснасткой для диагностики и регулировки ТНВД зарубежного производства: RabaMan («Икарус»), BoshPes, NP-PE, KP-PE и др.

Техническое состояние форсунок проверяют при выполнении ТО-2, ТО-3 и заявочно. Неисправную форсунку можно определить путем последовательного отключения цилиндров: ослабить гайку у топливопровода высокого давления проверяемой форсунки так, чтобы топливо выходило наружу, минуя форсунку, что вызовет выключение цилиндра двигателя. Если при выключении двигателя изменения в работе двигателя нет, то форсунка неисправна, если же увеличатся перебои и неравномерность работы – исправна.

Для объективной проверки технического состояния форсунки с целью определения герметичности, давления начала подъема иглы форсунки и качества распыливания используют прибор КП 1609А (рис. 3.45). В настоящее время для испытания и регулировки форсунок авто-тракторных дизельных двигателей на стационарных и передвижных установках используется настольный стенд с ручным приводом PS400A/S60H в диапазоне измерения давления 0–60 МПа (рис. 3.45, б).

При определении герметичности форсунки прибором КП 1609А необходимо:

- установить форсунку на прибор;
- закручивая регулировочный винт форсунки, одновременно рычагом 4 увеличивать давление до 30 МПа;
- прекратить подкачку, наблюдая за снижением давления;
- при достижении значения 28 МПа включить секундомер, а при 23 МПа – выключить.

Время падения давления топлива для изношенных форсунок должно составлять не менее 5 с, а для новых распылителей – не менее 15–20 с.

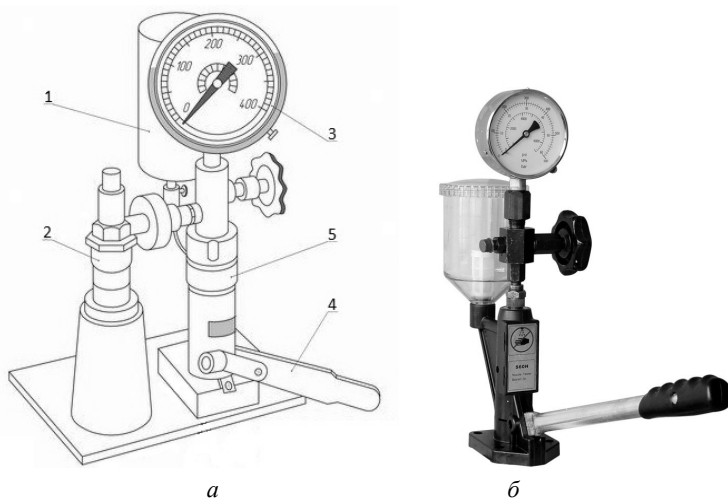


Рис. 3.45. Прибор КП 1609А (а) и настольный стенд PS400А/S60Н (б) для проверки и регулировки форсунок:

- 1 – бачок для топлива; 2 – проверяемая форсунка;
3 – манометр; 4 – рычаг; 5 – корпус прибора

Быстрое падение давления указывает на нарушение герметичности сопряжений форсунки. Увлажнение носика распылителя свидетельствует о неплотном прилегании запорной части иглы, что устраняется притиркой. Выход топлива из-под гайки пружины указывает на неплотность прилегания направляющей части иглы к корпусу распылителя форсунки.

Давление начала подъема иглы форсунки, равное $(15 \pm 0,5)$ МПа, проверяют по его значению в момент начала впрыска топлива в следующей последовательности:

- установить форсунку на прибор;
- снять колпак форсунки и отпустить контргайку регулировочного винта пружины;
- рычагом 4 прибора медленно повышать давление, наблюдая за показаниями манометра 3, и определить давление начала подъема иглы, при котором начинается впрыск топлива;
- установить требуемое давление форсунки регулировочным винтом. При малом давлении впрыска регулировочный винт с помощью отвертки вворачивают, при большом – отворачивают;
- затянуть контргайку (момент затяжки – 7–8 Н·м) и вновь проверить давление начала подъема иглы.

Качество распыливания топлива считается удовлетворительным, если топливо впрыскивается в атмосферу в туманообразном состоянии и равномерно распределяется по поперечному сечению конуса струи. Начало и конец впрыска должны быть четкими, понижение давления при впрыске топлива должно составлять 0,8–1,7 МПа без подтекания топлива.

Для проверки качества распыливания топлива необходимо рычагом 4 прибора сделать несколько резких впрысков топлива через форсунку, а затем, качая рычагом 70–80 ходов в минуту, наблюдать за характером впрыска. Если качество распыливания плохое, необходимо отремонтировать или заменить форсунку.

Для диагностирования прецизионных пар ТНВД и форсунок дизеля предлагается устройство КИ-28180-ГОСНИТИ (рис. 3.46, табл. 3.12). Оно предназначено для диагностирования топливной аппаратуры дизелей при ТО и ремонте тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. Устройство позволяет диагностировать, производить простейшие регулировки и дефектацию элементов, сопряжений топливной аппаратуры дизелей, работающих при давлении до 25 МПа. Обеспечивает контроль и регулировку:

- без снятия с дизеля (давление начала впрыска топлива распылителя форсунки, оценка гидроплотности сопряжений нагнетательного клапана, плунжерной пары ТНВД, исправность топливных трубок);
- при снятии форсунки с дизеля (качество распыла, герметичность запирающего конуса и иглы распылителя).

Устройство может использоваться при ТО и экспресс-ремонте топливной аппаратуры в полевых условиях.

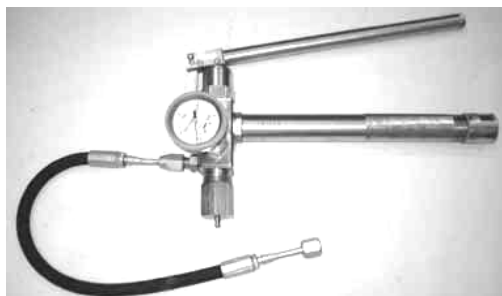


Рис. 3.46. Устройство для диагностирования прецизионных пар ТНВД и форсунок дизеля КИ-28180-ГОСНИТИ

Техническая характеристика КИ-28180-ГОСНИТИ

Параметр	Значение
Максимальное усилие на рычаге, Н	117,6
Емкость резервуара для топлива, л	0,12
Диапазон измерения топлива, МПа	0–39,2
Количество обслуживающего персонала, чел.	1
Габаритные размеры, мм	82×182×475
Масса, не более, кг	2,3
Срок службы, лет	10

Механотестер МТА-2 (рис. 3.47) позволяет оценить текущее состояние форсунки (давление начала впрыска топлива, герметичность запирающего конуса, герметичность корпуса и иглы распылителя, качество распыла топлива, гидроплотность распылителя), состояние ТНВД (проверка гидроплотности нагнетательного клапана, плунжерной пары, гидроплотности сопряжений «плунжер–дозатор», «плунжер–гильза», определить максимальное давление, создаваемое плунжерной парой (на рядом насосе с создаваемым давлением до 500 атм). При установке на верстаке механотестер МТА-2 превращается в стационарный аналог ДД-2110.

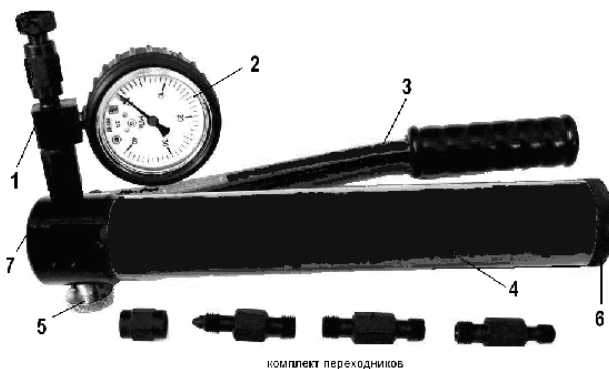


Рис. 3.47. Механотестер МТА-2:

- 1 – корпус; 2 – манометр; 3 – подвижная рукоятка (рычаг);
4 – топливный бачок; 5 – дроссельный винт

Внутри корпуса механотестера установлена плунжерная пара, обеспечивающая создание давления рабочей жидкости в полости «Р»,

которое фиксируется манометром 2 за счет перемещения рукоятки 3. Рабочая жидкость находится в бачке 4 и подается в полость плунжерной пары. В корпусе установлен дроссельный кран, его положение («Открыть» – «Закрыть») регулируется поворотом дросельного винта 5: при повороте в положение «Открыть» открывается запорный клапан и сбрасывается давление в полости «Р», удаляя топливо обратно в бачок. Для создания испытательного давления необходимо при помощи рукоятки привести плунжер в возвратно-поступательное движение. Под воздействием разряжения топливо из бачка-резервуара по трубопроводу поступает в полость плунжерной пары и через нагнетательный клапан подается к переходнику. Наличие набора переходников различной конфигурации и с различными резьбами позволяет после отсоединения трубопровода высокого давления подсоединить механотестер к форсунке дизеля или ТНВД и провести диагностирование непосредственно на двигателе.

Последовательность работы механотестера:

1. *Подключение механотестера к форсунке.*

1.1. Отсоедините топливопровод высокого давления от штуцера форсунки, отсоедините от механотестера заглушку (выкрутив соединительную гайку), и подсоедините механотестер к форсунке напрямую или через удлинитель.

1.2. В момент начала жесткого закрепления тестера ориентируйте его таким образом, чтобы уровень топлива в топливном бачке МТА-2 превысил входной канал. Обеспечьте полноамплитудную свободу перемещения рукоятки.

1.3. Если проверяемые элементы системы топливоподачи высокого давления идентичны по геометрическим условиям подключения, то при повторении подключения откручивайте гайку только у штуцера форсунки или у штуцера топливного насоса. По завершении проверки перед полным отключением тестера необходимо ослабить и крепление переходного устройства.

2. *Оценка технического состояния форсунки.*

2.1. Оценка качества распыла и давления начала впрыска. Выполните с помощью рукоятки привода плунжера несколько плавных возвратно-поступательных движений, обеспечив в полости нагнетания давление $(8,0 \pm 2,0)$ МПа. Затем быстро, но с применением малых усилий (во избежание падения достигнутого давления и по-

вреждения устройства) переместите рукоятку привода плунжера до момента начала нагнетания топлива. На оставшемся пути активного хода плунжера переместите рукоятку резко – у исправной форсунки должен прослушиваться четкий прерывистый звук высокого тона. Операцию выполните два раза. Отсутствие упомянутого звука или изменение его характера указывает на плохое качество распыливания топлива и, как следствие, на необходимость выяснения причины неисправности или затяжки гайки распылителя после демонтажа форсунки. Зафиксируйте значение показания манометра, соответствующее давлению начала впрыска топлива форсункой, при необходимости отрегулируйте форсунку. Давление начала впрыска топлива форсунками должно соответствовать значениям, приведенным в эксплуатационно-технической документации на соответствующий двигатель. При несоответствии величины давления начала впрыска установленным значением отрегулировать форсунку. Наиболее вероятная причина пониженного давления впрыска – уменьшение упругости пружины форсунки. Пониженное давление впрыска топлива форсункой вызывает увеличение удельного расхода топлива.

2.2. Проверка качества распыливания топлива со снятием форсунок с дизеля. Снимите форсунку с двигателя, поместите носиком в прозрачную цилиндрическую колбу и подсоедините механотестер. Наблюдайте за процессом впрыскивания. Хороший распыл топлива при впрыскивании в атмосферу как при испытании форсунок на дизеле, так и при их проверке на стенде характеризуется следующими признаками: туманообразное состояние топлива в струе; отсутствие различных глазом отдельных вылетающих капель и местных сгущений топлива; четкий, резкий звук (отсечка) при впрыскивании; отсутствие подтекания топлива при выходе струй из отверстий распылителя перед началом и по окончании впрыскивания. Для удобства наблюдения за качеством распыливания рекомендуется направить форсунку на лист чистой бумаги. Следы топлива на бумаге должны быть одинаковой густоты и располагаться на равном расстоянии от центра. Если форсунка не дает равномерного по окружности распыливания, ее разбирают, отверстия сопла прочищают тонкой мягкой проволокой. При большой разработке сопловых отверстий увеличивается их суммарное сечение и нарушается правильная форма сверления, что вызывает снижение скорости выхода

топлива из форсунки и, следовательно, ухудшает качество распыла. В этом случае сопло обычно заменяют запасным.

2.3. Оценка гидроплотности распылителя (проверка герметичности (зазора) цилиндрической части иглы и корпуса распылителя). Выполните несколько плавных возвратно-поступательных движений рукоятки, обеспечив в полости нагнетания давление 25 МПа. Измерьте с помощью секундомера время падения давления в интервале от 20 до 18 МПа – не менее 10 с. Время снижения давления у форсунок с многодырчатыми распылителями замеряют при давлении от 35 до 30 МПа – не менее 15 с. При несоответствии значения параметра или качественного признака заданным условиям принимают, что сопряжение «игла–корпус распылителя» негерметично. Негерметичность возникает преимущественно из-за износа цилиндрической части иглы и корпуса распылителя, а также из-за наличия на сопрягаемых поверхностях грязи и частичек металла.

2.4. Проверка герметичности запирающего конуса иглы распылителя:
– по времени падения давления в форсунке: Выполните несколько плавных возвратно-поступательных движений рукоятки, обеспечив в полости нагнетания давление 17 МПа. Определите время падения давления в интервале от 15 до 10 МПа – не менее 15 с. Если быстрое падение давления наблюдается при малых и больших давлениях, то распылитель подлежит замене. При несовпадении признаков, во избежание ошибочного диагноза, выполните 1–2 резких впрыскивания топлива и повторите испытания на герметичность. Если распылитель по признакам качества распыливания и гидравлической плотности удовлетворяет требованиям, а давление впрыскивания не соответствует допускаемым значениям и отличается на 0,5–0,75 МПа от номинального, то отрегулируйте натяжку пружины форсунки, не снимая ее с дизеля;

– по обнаружению топлива на торце (носике) корпуса распылителя. Снимите форсунку с дизеля, подсоедините ее к механотестеру, создайте в форсунке давление (например, завинчивая ее регулировочный винт при отпущенной контргайке) на 1,0–1,5 МПа больше давления начала впрыска и проверьте герметичность по условию: в течение 20 с на торце (носике) корпуса распылителя не должно наблюдаться подтекания топлива или потения указанной части форсунки. При несоответствии значения параметра или качественного признака заданным условиям принимают, что запирающий

конус иглы распылителя негерметичен. Негерметичность возникает из-за значительного ослабления пружины, заедания иглы в направляющем отверстии распылителя, наличия на поверхности седла распылителя грязи и частичек металла, из-за неравномерной выработки уплотняющего конуса иглы и седла распылителя.

3. Проверка гидроплотности нагнетательного клапана (кроме топливного насоса типа НД).

3.1. Отсоедините топливопровод высокого давления от штуцера секции ТНВД и присоедините к нему механотестер.

3.2. Переведите рычаг управления регулятором топливного насоса высокого давления в положение, соответствующее выключенной подаче топлива.

3.3. Выполните рукояткой несколько плавных рабочих движений, обеспечив в полости нагнетания давление 18,0–20,0 МПа. Измерьте с помощью секундомера продолжительность снижения давления в интервале от 15 до 10 МПа – не менее 10 с. В случае, если после подтяжки штуцера нагнетательного клапана и повторной проверки результаты измерения повторяются, необходима замена клапана.

Таблица 3.13

Техническая характеристика механотестера

Параметр	Значение
Давление на выходе, МПа, номинальное/максимальное	17,0–20,0/25,0
Подача плунжерной пары, см ³	0,59
Усилие на рычаге, кН, при номинальном/максимальном давлении	9–11/13,7
Рабочая жидкость	Дизельное топливо
Емкость резервуара, л	0,132
Размеры резьб для подсоединения	M12×1,5/M14×1,5/M16×1,5
Габаритные размеры (длина×высота×ширина), мм	187×394×60
Масса, кг	3

4. Оценка гидроплотности плунжерных пар топливного насоса высокого давления.

4.1. Отсоедините топливопровод высокого давления у штуцера топливного насоса. Удалите воздух из системы топливоподдачи низкого давления с помощью насоса ручной подкачки.

4.2. Установите рычаг управления регулятором топливного насоса в положение включенной подачи топлива и, прокручивая коленчатый вал вручную, поставьте проверяемую плунжерную пару в положение, соответствующее середине пути нагнетания топлива. Момент подачи топлива определяют по началу подъема уровня топлива в конусном канале штуцера и дополнительному повороту вала топливного насоса на одно деление угловой отметки на лимбе вала регулятора.

4.3. Подсоедините механотестер к штуцеру топливного насоса высокого давления. Выполните рукояткой несколько плавных рабочих движений, обеспечив в полости нагнетания давление 25 МПа.

4.4. Измерьте с помощью секундомера продолжительность снижения давления в интервале от 20 до 15 МПа – не менее 15 с. В противном случае плунжерная пара требует замены.

Компьютерное диагностирование топливной аппаратуры дизелей

Оптимальным способом выяснения факторов, которые приводят к поломкам дизеля, является компьютерное диагностирование его электронных систем. Оно позволяет оценить общее техническое состояние двигателя, проверить все блоки управления, отдельные узлы и детали при помощи мощного компьютера-сканера. Такой сканер выполняет многоступенчатое обследование агрегата, проверяя по очереди работу топливной системы, а затем и управляющей. Важной частью обследования является именно диагностирование топливной аппаратуры дизельных двигателей, неполадки в которой встречаются достаточно часто.

В ходе диагностической процедуры обязательно выполняются следующие действия:

- анализ функционирования форсунок (их электрической части);
- снятие показаний со всех имеющихся датчиков температуры;
- установление показателей компрессии в блоке двигателя (в цилиндрах);
- замер величин вакуумных преобразователей.

Основные дефекты форсунок Common Rail (рис. 3.48):

- а) засорение топливных каналов;
- б) нестабильная работа соленоида электромагнитного клапана;
- в) неисправность электронного блока управления;
- г) износ уплотнительных колец;
- д) зависание иглы распылителя;
- е) большая неравномерность подачи топлива;

- ж) износ клапана;
- и) образование нагара на корпусе распылителя;
- к) износ запорного конуса иглы и корпуса распылителя;
- л) закоксовывание сопловых отверстий корпуса распылителя.

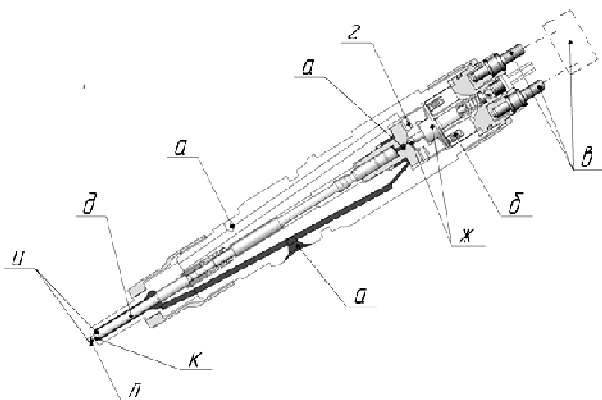


Рис. 3.48. Основные дефекты форсунки Common Rail

Компьютерное диагностическое оборудование для дизельных двигателей собирает сведения о выявленных неполадках, выводит данные о них на дисплей и дает подробные инструкции по устранению дефектов.

Преимущество компьютерного диагностирования дизельного двигателя заключается в том, что двигатель не требуется разбирать. Компьютерное оборудование подключается к агрегату и через некоторое время выдает данные об ошибках в функционировании системы и всех имеющихся неисправностях узлов.

На практике широко используются сканеры «АВТОАС-КАРГО», Cummins INLINE 5, Bosch KTS TRUCK, TEXA, JALTEST, предназначенные для диагностирования и обслуживания полного спектра дизельных двигателей автомобилей и автобусов КамАЗ, МАЗ, ГАЗ, ПАЗ, ЛиАЗ, УРАЛ (рис. 3.49).

Для испытания форсунок Common Rail производства Bosch, Delphi, Denso, Siemens с рабочим давлением до 180 МПа (1800 бар) в условиях дилерских технических центров и ремонтных предприятий как один из вариантов можно использовать стенд CR-JET 4E (рис. 3.50).



a



б



в



г

Рис. 3.49. Сканыеры для диагностики систем управления двигателей:
a – автосканыер «АВТООАС-КАРГО»; *б* – системыый сканыер Bosch KTS TRUCK;
в – системыый сканыер TEXA; *г* – сканыер JALTEST

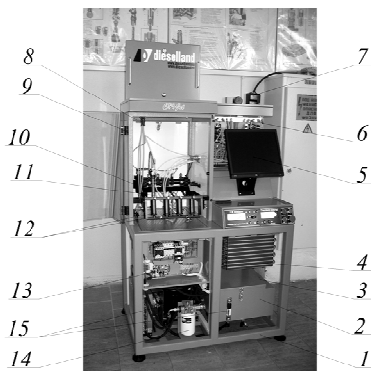


Рис. 3.50. Диагностический стэнд для испытания форсунок CR-JET 4E:
1 – рама; *2* – бак тестовой жидкости; *3* – электродвигатель; *4* – радиатор охлаждения; *5* – монитор компьютера; *6* – системыый блок; *7* – блок питания;
8 – контроллер управления; *9* – защитный экран; *10* – накопитель давления «РЭИЛ»;
11 – держатель форсунок; *12* – адаптеры установки форсунок; *13* – контроллер управления форсунками; *14* – фильтр тестовой жидкости;
15 – датчик контроля тестовой жидкости

Определение параметров работы форсунок производится по электронной программе, состоящей из тест-планов для каждого типа форсунок в ручном или автоматическом режиме.

Техническая характеристика стенда:

- количество диагностируемых форсунок – 4;
- система измерения – электронная;
- диапазон импульсов открытия форсунки – $60\text{--}1500\text{ мин}^{-1}$;
- диапазон длительности импульса открытия форсунки – $100\text{--}3000\text{ мкс}$;
- диапазон регулирования давления тестовой жидкости – $0\text{--}180\text{ МПа}$;
- мощность электродвигателя – 4 кВт.

Тест проводится для одной форсунки последовательно на следующих режимах:

- LEAK TEST – тестирование гидроплотности форсунки путем замера времени изменения давления от одного порога до другого. Задается два порога давления: верхний и нижний. Время, за которое давление снизится от верхнего до нижнего порога, отображается на дисплее;
- VL – тестирование форсунки при максимальной нагрузке;
- EM – тестирование форсунки при средних нагрузках в режиме «точка эмиссии»;
- LL – тестирование форсунки при пусковой подаче в режиме холостого хода;
- VE – тестирование предварительного (пилотного) впрыска топлива.

По окончании испытаний программа сравнивает полученные результаты с данными выбранного тест-плана и в основном меню окрашивает изображение мерной пробирки зеленым цветом для исправной форсунки или красным – для неисправной.

Перед диагностированием форсунок рекомендуется произвести их очистку на стенде для ультразвуковой очистки форсунок ДД-2200 (рис. 3.51).



Рис. 3.51. Стенд для ультразвуковой очистки ДД-2200:

1 – панель управления; 2 – ультразвуковая ванна; 3 – кассета; 4 – крышка; 5 – форсунка

Техническая характеристика стенда:

- количество одновременно очищаемых форсунок – до 8;
- объем ультразвуковой ванны – 1 л;
- рабочая жидкость – «Прима Люкс»;
- частота ультразвуковых колебаний – 40 кГц;
- количество программ очистки – 3.

Для очистки форсунки устанавливаются в кассету и погружаются в ультразвуковую ванну. Нажатием на кнопки «Выбор» и «Уст» на панели управления производится выбор и установка режима «Очистка», а затем с их же помощью – выбор и установка одной из программ очистки («500», «Волна 1», «Волна 2») и времени очистки.

После диагностирования и выявления дефектов работоспособность форсунок восстанавливается заменой дефектных деталей и сборочных единиц: иглы и корпуса распылителя; электромагнитного клапана; уплотнительных колец; седла и клапана; электронного блока управления.

Особенность сборки форсунок – соблюдение размеров утопания (выступания) деталей в корпусе с точностью 0,01 мм, что требует применения фирменного измерительного инструмента и приспособлений.

Также многообразие стендов для проверки ТНВД и форсунок представлено не только различными предприятиями-изготовителями, но и странами, на территории которых изготавливают высокоточное оборудование:

– Республика Беларусь: оборудование торговой марки «ПОТОК» – стенды для тестирования инжекторов ПОТОК-CRI-SMART, блоки дооснащения для модернизации всех типов дизельных стендов (ПОТОК CR-2 – блок управления стендом, инжекторами и ТНВД, FMx – безмензурочная система измерения производительности форсунок, PF – безмензурочная система измерения производительности ТНВД с применением высокоточных датчиков типа OVAL);

- Германия: Bosch EPS 815, EPS 708, EPS 200, флагман – DCI 700;
- Великобритания: HARTRIDGE IFT 70, CRI-PC, AVM-2PC;
- Италия: RABOTTI TEC PUMP, TEC101, TEC201;
- Греция: CARBON ZAPP CRU-4R, CRU-2R, DS2-R2;
- Турция: Maktest, C-MAX.

Актуальными являются вопросы модернизации стендов с доведением их до современного уровня. Пример модернизации устаревшего дизельного стенда C-MAX-2012-CR-PC, выполненной сотрудниками

БГАТУ с использованием блоков управления и измерения «ПОТОК» белорусского производства приведен на рис. 3.52.



Рис. 3.52. Общий вид стенда до модернизации (а) и после (б)

После выполнения работ по модернизации точность измерения существенно выросла, практически в 10 раз увеличилось количество тест-планов, появилась возможность измерять производительность тестируемого ТНВД электронными блоками, проверять насос-форсунки с определением ВР-сигнала, кодировать электромагнитные и пьезоэлектрические инжекторы и др.

3.7. Методы и средства контроля приборов и агрегатов бортового электрооборудования машин

Методы контроля, как правило, включают измерения постоянного, переменного и пульсирующего низкого и высокого напряжения (до 50 кВ) на выходе из их источников и в бортовой сети. Для углубленного диагностирования проводят измерение силы тока, выдаваемого аккумуляторной батареей на электростартер или на нагрузочную вилку, напряжения и силы тока генераторов, тока, параметров работы приборов управления и исполнительных механизмов (реле-регуляторов, индукционных катушек, электродвигателей и др.). Проводится и контроль сопротивления датчиков и приборов управления.

Для диагностирования АТЭ тракторов и самоходных комбайнов могут использоваться общепромышленные тестеры (Ц-4324, 43102-М1), универсальный модуль контроля и регулировки АТЭ КИ-28246-ГОСНИТИ или КИ-28120М.01-ГОСНИТИ, портативные импортные

и отечественные мультиметры, оборудование завода «ГАРО» (установки мод. 537, Э-205, К-517, К-518, автотестер К-297.01 и др.), комплексный переносной прибор КИ-11400-ГОСНИТИ. Для испытания отремонтированных агрегатов АТЭ используются стенды Э-205, Э-242, Э-250, Э-250-07 от завода «ГАРО».

Ранее для диагностирования АТЭ и топливной системы бензиновых ДВС автомобилей применяли многочисленные мотор-тестеры стран Европы (Венгрии, Чехословакии, Англии), США от СКБ завода «ГАРО» (К-518), мотор-тестеры ГОСНИТИ (КИ-4897-ГОСНИТИ, Хитека-ГОСНИТИ КИ-5820), нагрузочные вилки Э-107, Э-108, ЛЭ-2, КИ-5514-ГОСНИТИ и др. Актуален контроль плотности электролита аккумуляторных батарей разнообразными ареометрами, например поплавковым КИ-13951.06-ГОСНИТИ.

В настоящее время многочисленные импортные и немногие отечественные (завод «ГАРО») комплексные мотор-тестеры компьютеризированы, автоматизированы, обеспечивают контроль блоков управления автомобилями и некоторыми марками зарубежных тракторов, а также бортовых систем их диагностирования. Современные мотор-тестеры обеспечивают диагностирование по параметрам напряжения, активного электрического сопротивления и частоте генерируемых и принимаемых сигналов практически всех приборов и агрегатов АТЭ, электроники, систем топливно-воздухоподачи, нейтрализации ОГ, пневмосистемы, рулевого управления и тормозов машин, которые подготовлены к автономному движению почти без участия водителя.

В связи с хорошей проработанностью проблемы приборного и стендового диагностирования АТЭ на автотранспорте и в АПК [56, 128] поставлена задача измерять в отечественных СТД (рис. 3.53, табл. 3.14) только напряжения в приборах автотракторного электрооборудования (АТЭ) – постоянные и переменные, – токи срабатывания реле-регуляторов и анализировать осциллограммы переходных процессов в генераторах переменного тока.

На практике используется комплект приборов для очистки и проверки свечей зажигания Э-203П и Э-203О (рис. 3.54, табл. 3.15), предназначенный для удаления нагара и других загрязнений при помощи пескоструйной очистки и продувки сжатым воздухом. Для очистки применяется формовочный песок с размером зерна 0,14–0,18 мм. Подключается к сети сжатого воздуха.



Рис. 3.53. Универсальный модуль контроля и регулировки автотракторного и комбайнового электрооборудования КИ-28246-ГОСНИТИ

Таблица 3.14

Техническая характеристика КИ-28246-ГОСНИТИ

Параметр	Значение
Диапазон измерения постоянного тока, А	0–1500
Диапазон измерения постоянного напряжения, В	0–30
Диапазон измерения частоты вращения вала генератора (для всех типов двигателей), мин ⁻¹	0–5000
Диапазон рабочих температур, С	0...+40
Относительная влажность воздуха, %, не более	95
Габаритные размеры, мм	460×340×150
Масса, кг, не более	7



Рис. 3.54. Приборы Э-2030 и Э-203П для очистки и проверки искровых свечей зажигания

Техническая характеристика приборов Э-203О и Э-203П

Параметр	Прибор	
	Э-203О	Э-203П
Резьба на корпусе	М14×1,25/М18×1,5	
Длина резьбовой части, мм	12–19	
Диапазон измерения давления, атм	0–16	
Искровой промежуток контрольного разрядника, мм	12	
Пневмопитание, атм	4–6	–
Продолжительность очистки одной свечи, с	10	
Расход сжатого воздуха, л/мин	100	
Электропитание, В	–	220
Габариты, мм	215×176×288/350×260×105	
Масса, кг	4/7	

С помощью прибора проводятся испытания свечи на герметичность и на бесперебойность искрообразования при заданном давлении в испытательной камере. Давление создается ручным насосом, а искрообразование инициируется встроенным источником высокого напряжения. Для удобства пользования на панели прибора имеется таблица значений испытательного давления в зависимости от зазора между электродами свечи. В комплект входят комбинированные щупы от 0,6 до 1 мм (через 0,1 мм) и специальный ключ для регулировки искрового промежутка свечей.

3.8. Методы и средства диагностирования и испытания гидрооборудования тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин

Контроль гидроприводов рулевого управления, навесной системы, коробок передач, гидростатической трансмиссии комбайнов в связи со сложностью и опасностью их испытаний под высоким давлением проводят только заявочно.

Методы контроля включают измерения давления и пульсации давления рабочих жидкостей на линиях нагнетания и слива в контрольных отверстиях или при разъединении маслопроводов с вклю-

чением в работу агрегатов гидроприводов, контроль температуры, вспенивания жидкостей и их загрязненности (КИ-28067-ГОСНИТИ ИЗЖ Жигулевского филиала ВНИИРЭА), а также контроль утечек визуально и ультразвуковым индикатором ИКУ-1Д.

В настоящее время для испытания гидрооборудования сельскохозяйственной техники используются стенды КИ-4815М-ГОСНИТИ, КИ-28097-01М-03М-ГОСНИТИ, СГН-2м ЗАО ПО «Стендовое оборудование», стенд УГИ 400-16-С01 «ССМ-Тяжмаш», СИ-НМ-В-1-20/250/60,5-Т Уральского инжинирингового центра, универсальный стенд для обкатки, регулировки и проверки гидроагрегатов Пензенского РМЗ, стенд ООО «Мастер Механика», стенд, используемый сервисными центрами ОАО «Пневмостроймашина», испытательный стенд «Бош Рексрот» (Германия).

Особенность универсального стенда для обкатки, регулировки и проверки гидроагрегатов Пензенского РМЗ заключается в возможности проверки, настройки и регулировки большого количества гидравлической аппаратуры: насосов, гидромоторов, распределителей и др. Стенд рассчитан также на испытание насосных и моторных многопоточных установок и агрегатов типа УНА с возможностью изменения частоты вращения от 400 до 1500 об/мин при помощи пускового масляного реостата, создания сопротивления в нагнетающей магистрали до 40 МПа, измерения температуры рабочей жидкости, частоты вращения приводного вала и мощности приводного двигателя.

Недостатками стенда являются его громоздкость, требующая больших площадей; ограниченный диапазон регулирования частоты вращения, не позволяющий испытывать современные высокооборотистые гидромашин; длительный процесс проверки из-за большого количества операций по настройке стенда.

Стенды КИ-4815М-ГОСНИТИ, КИ-28097-01М-03М-ГОСНИТИ (рис. 3.55) для испытаний объемных гидроприводов и аксиально-поршневых гидромашин с мощным приводным двигателем и дополнительной приставкой также имеют большие габариты и изготавливаются на базе стендов КИ-4815-ГОСНИТИ, выпускаемых ранее серийно, поэтому на данных стендах возможно испытание только небольшой номенклатуры гидромашин. Двигатели стендов имеют мощность в 22 и 45 кВт, в то время как гидромашин с рабочим объемом более 90 см³ потребляют мощность не менее 70 кВт. Одна

линия высокого давления также не позволяет применять стенд для испытания многопоточных гидромашин, отсутствует возможность проверки регуляторов насоса, а также регулирования частоты вращения приводного двигателя, что не позволяет использовать на данном стенде методики проверки заводов-изготовителей и не дает возможности проверить все технические характеристики гидроагрегатов.



Рис. 3.55. Стенд КИ-28097-ГОСНИТИ

Стенды «ССМ-Тяжмаш» и «УГИ» предназначены для испытания насосов и гидромоторов после текущего и капитального ремонта, для определения следующих параметров: отсутствие повышенной вибрации, ударов, стуков, резкого шума, толчков давления в магистралях, повышенного нагрева (функциональные параметры); отсутствие каплеобразования из-под крышек, пробок, фланцев, через стыки корпусных деталей (параметры герметичности); величина подачи рабочей жидкости и ее равномерность при заданном направлении вращения выходного вала, изменение значения подачи рабочей жидкости при работе механизмов регулирования, реакция на изменение нагрузки (давления на выходе), изменение частоты вращения выходного звена гидромотора при изменении расхода рабочей жидкости, подводимого к рабочим полостям. Но данные стенды, как и стенд Пензенского РМЗ, громоздки, имеют небольшой диапазон регулирования частоты вращения и измерения крутящего момента, несмотря на то что имеют мощные приводные двигатели – 60,5 кВт. К недостаткам стендов можно отнести и невозможность регулирования температуры рабочей жидкости в большом диапазоне, отсутствие второй гидролинии для испытания регуляторов насосов.

Наиболее полно оценивают работоспособность аксиально-поршневых гидромашин стенды ПО «Стендовое оборудование» и ООО «Мастер Механика».

Стенд СГН-2м производства ПО «Стендовое оборудование» (рис. 3.56) предназначен для послеремонтной обкатки, регулировки и контрольных испытаний насосов и распределительно-регулирующей гидроаппаратуры рабочего оборудования тракторов, грузовых автомобилей и машин сельскохозяйственного назначения.

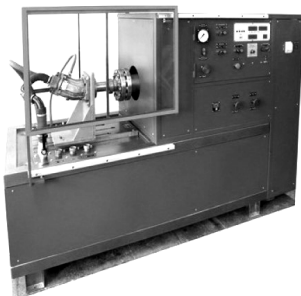


Рис. 3.56. Стенд СГН-2м

Основная отличительная особенность стенда СГН-2м – применение электропривода с микропроцессорным блоком управления частотой вращения и электронной системой измерения.

К преимуществам стенда относится то, что регулируемая частота вращения выходного вала дает возможность проводить щадящую послеремонтную обкатку аксиально-плунжерных и поршневых насосов, имеющих прецизионные соединения деталей качающих узлов, обеспечивая тем самым повышенный ресурс их работы (особенно актуально для дорогостоящих насосов производства зарубежных фирм). Есть возможность проводить испытания разных типов насосов в соответствии с техническими требованиями на испытания при номинальной частоте вращения приводного вала.

Применение статопараметрического метода диагностирования гидропривода требует обязательного измерения расхода задресселированного потока жидкости.

Учеными сделан большой вклад в развитие расходомерии. Особо следует отметить труды П. П. Кремлевского, П. В. Лобачева, Б. М. Левина, А. М. Лопатина, Н. И. Бражникова, И. Д. Вельта, В. Г. Цейтлина, Н. Bluschke, R. G. Folsom, F. Herning, H. Kruppe,

G. Ruppel, C. Scott, T. J. Williams, R. Witte. Благодаря их исследованиям созданы и применяются в различных отраслях промышленности расходомеры с большим разнообразием конструкций, основанных на различных методах измерений. Их можно условно разделить на четыре группы:

1) приборы с механическим движением рабочего объема: тахометрические и силовые;

2) приборы, основанные на гидродинамических методах: переменного перепада давления, переменного уровня, обтекания, вихревые, парциальные;

3) приборы, в которых используются физические явления, не относящиеся к механическим и гидродинамическим: тепловые, электромагнитные, акустические, оптические, ядерномагнитные, ионизационные;

4) приборы, основанные на особых методах: корреляционные, концентрационные.

Оценивая существующие приборы для измерения расхода, нужно прежде всего учитывать условия, в которых проводится ТО мобильных машин. Не только в поле, но и на территории машинного двора практически невозможно обеспечить надежную защиту этих приборов от повреждающего воздействия таких внешних факторов, как низкие температуры, атмосферные осадки, запыленность воздушной среды, вибрации, случайные удары при монтаже.

Небольшой имеющийся опыт применения импортных переносных приборов для контроля технического состояния МТП свидетельствует о том, что эти приборы несовместимы с условиями эксплуатации машин, т. к. содержат легко повреждаемые электрические преобразователи, элементы электроники и сложные коммуникации. По этой причине эксплуатационные и ремонтные предприятия часто отказываются от приобретения таких средств диагностики.

Предварительный анализ показывает, что большинство из перечисленных выше приборов не нуждается в подробном рассмотрении, т. к. явно не соответствует условиям применения в гидроприводе мобильных машин. Отдельные средства, не отраженные в научных работах, нашли достаточное широкое практическое применение и требуют определенного внимания. Далее рассматриваются только расходомеры переменного перепада давления, тахометрические и вихревые.

Расходомеры переменного перепада давления основаны на зависимости расхода от перепада давления, создаваемого специальным

сопротивлением внутри трубопровода или самим элементом трубопровода. В состав такого расходомера входят: сужающее устройство, создающее перепад давления; дифманометр, преобразующий этот перепад сначала в перемещение подвижного элемента, а затем с помощью индукционного преобразователя – в электрический сигнал; измерительный прибор, регистрирующий величину этого сигнала.

Тахометрическими называют расходомеры, имеющие вращающийся элемент, частота вращения которого пропорциональна объемному расходу. По конструкции вращающегося элемента эти расходомеры подразделяют на камерные, турбинные, шариковые и роторно-шаровые.

Камерные тахометрические расходомеры снабжаются ротором в виде блока цилиндров, шестерен или др. Жидкость заполняет рабочие камеры и таким образом разделяется на порции, перемещаемые от входа к выходу за счет вращения ротора. По этому принципу построены, например, счетчики количества топлива в раздаточных бензоколонках. В составе стационарного оборудования для диагностирования гидроприводов часто используют обычные серийные низкомоментные гидромоторы, соединенные с тахогенераторами. Наряду с простотой, достаточной точностью, доступностью и сравнительно небольшой стоимостью таких расходомеров у них есть существенные недостатки – громоздкость и тяжеловесность, что исключает возможность их применения в качестве переносных средств диагностирования.

Турбинные тахометрические расходомеры применяются для трубопроводов диаметром от 0,004 до 0,750 м. Они работают в широком диапазоне температуры и давления. Датчик такого расходомера представляет собой корпус в виде патрубка, внутри которого помещена турбинка, выполненная из ферромагнитного материала. На наружной поверхности корпуса устанавливается индукционный преобразователь. Отечественная промышленность выпускала ряд турбинных датчиков расхода с диапазоном измерения от 0,12 до 6,0 дм³/с при рабочем давлении до 40 МПа.

Основной недостаток турбинных расходомеров, затрудняющий их широкое применение в гидроприводе мобильных машин, – требование строгого ограничения загрязненности рабочей жидкости, что часто оказывается невыполнимым.

Свободными от этого недостатка считаются шариковые тахометрические расходомеры. Наиболее широкое применение имеют

шариковые расходомеры с винтовым направляющим аппаратом. Поток жидкости, закрученный этим аппаратом, приводит во вращение ферромагнитный шарик. Частота вращения шарика по кругу внутри трубы преобразуется индукционным или индуктивным преобразователем в электрический частотный сигнал.

Анализ существующих конструкций шариковых тахометрических расходомеров позволяет сделать вывод о принципиальной возможности их применения в составе переносных средств измерения расхода рабочей жидкости мобильных машин. Следует, однако, учитывать, что общим недостатком всех тахометрических приборов, ограничивающим их применение, является значительная зависимость точности измерений от вязкости контролируемой жидкости и необходимость использования электрических преобразователей.

К расходомерам обтекания относят приборы, чувствительный элемент которых воспринимает динамическое давление потока и отклоняется под его воздействием, причем величина отклонения зависит от расхода. По принципу действия они разделяются на приборы постоянного перепада давления, поплавково-пружинные, шариковые и с поворотной лопастью.

Недостатком всех расходомеров обтекания является зависимость показаний прибора от его ориентации в пространстве, что исключает возможность их использования в составе переносных средств диагностирования гидропривода.

Вихревые расходомеры, предложенные сравнительно недавно, широкого распространения не получили. Эти приборы основаны на зависимости частоты колебаний давления от расхода. Колебания давления возникают в результате вихреобразования струи в потоке. Как показывает опыт, вихревые расходомеры имеют большую погрешность при измерении расхода в пульсирующих потоках, достигающую $\pm 40\%$. На работу вихревых расходомеров существенное влияние оказывают помехи, создаваемые различными элементами гидропривода при работе: вибрация, толчки, удары и т. п.

Все рассмотренные приборы, кроме расходомеров переменного перепада давления и камерных расходомеров, отличаются сложной конструкцией и высокой стоимостью. Обычные расходомеры переменного перепада давления имеют простые первичные преобразователи, но конструкция приборов сильно усложняется за счет наличия вторичного преобразователя – дифманометра, из-за чего исключается возможность применения этих расходомеров в составе переносных средств диагностики.

Эксплуатационные и ремонтные предприятия в первую очередь нуждаются в переносных средствах диагностики – простых, дешевых, защищенных от повреждений, даже в ущерб точности измерений. В этом смысле наибольший интерес представляют дроссели-расходомеры типа ДР-70, ДР-90, КИ-1078 и другие, построенные на принципе переменного перепада давления. Эти приборы особенно широко применяются в практике эксплуатации сельскохозяйственных машин.

Дроссель КИ-1078-ГОСНИТИ имеет прецизионную пару – поворотный плунжер и гильзу. Плунжер, соединенный с рукояткой и шкалой расхода, имеет на торце косой срез, который частично или полностью перекрывает дроссельное выходное отверстие гильзы. При выполнении измерений отверстие постепенно закрывают до тех пор, пока давление в гидросистеме не установится на уровне номинального (16 МПа). На шкале лимба отмечается фактический расход. Шкала построена в расчете на применение в гидроприводе дизельного легкого масла ДП-11 (М10В₂), которое имеет вязкость 60–70 мм²/с при 50 °С. К достоинствам этих приборов относится простота конструкции и компактность. Недостатком конструкции является сильное влияние вязкости жидкости на точность измерений, поэтому условия испытаний (сорт масла, температура) строго регламентированы. Другой недостаток – угол поворота плунжера ограничен (120°), вследствие чего приборы такого типа отличаются низкой чувствительностью. Кроме того, предел измерения расхода у ДР-90 – 1,5 дм³/с, что недостаточно для диагностирования гидроприводов большинства мобильных машин, в т. ч. комбайнов.

Цифровые гидротестеры Webtec (рис. 3.57) измеряют поток, давление и температуру. Тестеры предназначены для удобного контроля работы гидравлических насосов, двигателей, клапанов и гидростатических передач.



Рис. 3.57. Гидротестеры Webtec

Гидротестеры имеют упрощенные элементы управления и могут выявлять неисправности гидравлической системы, сокращать время простоя и помогать в профилактическом обслуживании.

Тестеры содержат блок турбинного расходомера до 800 л/мин и большой легко читаемый жидкокристаллический дисплей, который показывает поток и температуру. Блок турбины выполнен из высокопрочного алюминия, внутри размещается шестилопастная турбина, вращающаяся на валу и подшипнике из нержавеющей стали. Встроенные выпрямители потока уменьшают поток турбулентности и позволяет точно измерять расход в обоих направлениях.

Гидротестеры имеют встроенный нагружающий клапан для имитации рабочего давления машины. Встроенные защитные диски защищают машину и оператора в случае избыточного давления, позволяя маслу безопасно обходить нагружающий клапан без утечки из гидравлического контура.

В эксплуатационных условиях широкое применение нашли дроссели-расходомеры типа ДР-70, ДР-90, КИ-1078 и другие, построенные на принципе переменного перепада давления, особенно для диагностирования раздельно-агрегатной гидравлической системы тракторов (гидравлические насосы типа НШ, гидрораспределители, ГОРУ). Для диагностирования ГСТ не применяются из-за сильного влияния вязкости жидкости на точность измерений и низкого предела измерений расхода жидкости.

В некоторых райагросервисах и передовых хозяйствах Республики Беларусь встречаются стенды КИ-4815М, КИ-28097-01М-03М-ГОС-НИТИ. Они также применяются для диагностирования раздельно-агрегатной гидравлической системы тракторов, однако только в частичном режиме с низкой точностью. Электродвигатели стендов имеют мощность в 22 и 45 кВт, что недостаточно для нагружения ГСТ.

Гидротестеры Webtec применяются в основном специализированными сервисными службами ввиду их большой стоимости. Данными гидротестерами возможно диагностировать гидроагрегаты непосредственно на мобильном энергетическом средстве. К недостаткам следует отнести то, что турбинный расходомер имеет строгие ограничения по диапазону измерений и загрязненности рабочей жидкости, что часто оказывается невыполнимым.

В БГАТУ разработано диагностическое устройство [25, 84] (рис. 3.58–3.59), позволяющее в эксплуатационных условиях проводить объективное безразборное диагностирование аксиально-плунжерных насосов и моторов и при необходимости производить их послеремонтную обкатку.

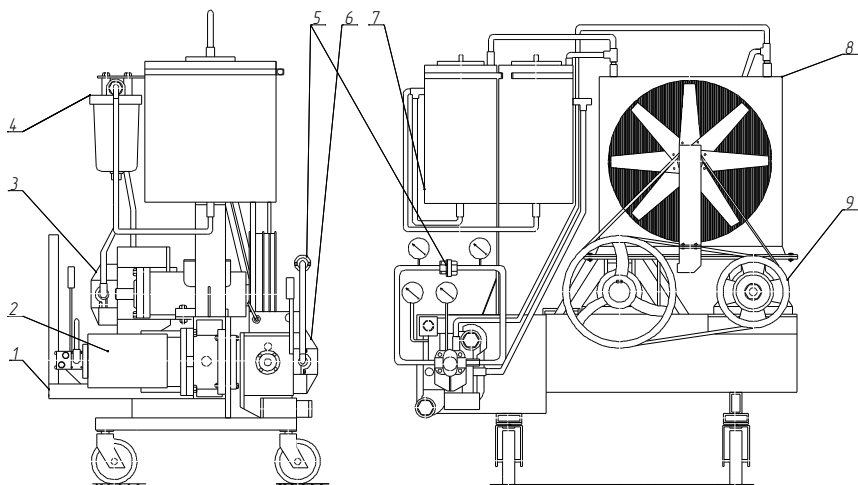
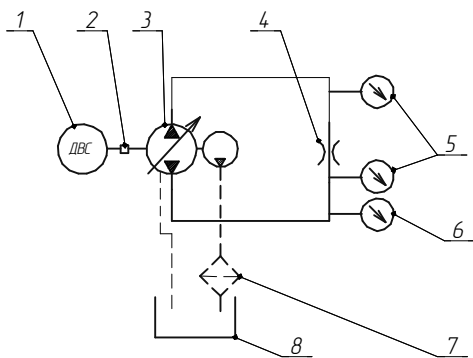


Рис. 3.58. Диагностическое устройство:

1 – рама с рамкой автосцепки; 2 – диагностируемый аксиально-плунжерный гидромотор; 3 – диагностируемый аксиально-плунжерный насос; 4 – фильтр; 5 – нагрузочный дроссель-расходомер; 6 – гидравлический тормоз; 7 – гидробаки; 8 – радиатор охлаждения рабочей жидкости; 9 – ременная передача



— гидрелиния высокого давления (напорная)
 — гидрелиния с давлением подпитки
 - - - гидрелиния всасывания
 - - - гидрелиния с давлением дренажа

Рис. 3.59. Схема диагностического устройства (диагностика гидронасоса):

1 – двигатель внутреннего сгорания трактора; 2 – тахометр; 3 – диагностируемый регулируемый аксиально-плунжерный насос; 4 – дроссель постоянного сечения; 5 – манометры; 6 – термометр; 7 – фильтр; 8 – гидробак

Работа устройства основана на использовании дросселирования потока жидкости через отверстие постоянного сечения для создания нагрузки на валу гидронасоса и гидромотора. Гидравлическая схема обкаточно-диагностического устройства приведена на рис. 3.60.

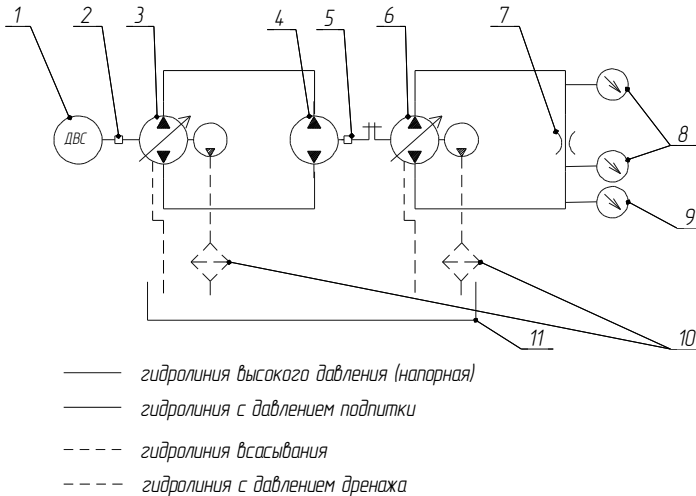


Рис. 3.60. Гидравлическая схема диагностического устройства (диагностика гидромотора):

- 1 – двигатель внутреннего сгорания трактора; 2 – тахометр;
 3 – эталонный регулируемый аксиально-плунжерный насос (объемный КПД 0,96);
 4 – проверяемый аксиально-плунжерный гидромотор; 5 – муфта с тахометром;
 6 – нагрузочный гидронасос; 7 – дроссель постоянного сечения; 8 – манометры;
 9 – термометр; 10 – фильтр; 11 – гидробак

Работает схема диагностики гидронасоса (см. рис. 3.59) следующим образом: привод гидронасоса 3 целесообразно осуществлять от двигателя внутреннего сгорания 1 посредством ВОМ трактора, т. к. диагностирование агрегатов гидрообъемной трансмиссии на предприятиях системы «агросервис» и в хозяйствах производится эпизодически и требует мощности привода свыше 75 кВт.

Так как подача аксиально-плунжерного насоса регулируемая, то представляется возможным для загрузки использовать дроссель постоянного сечения 4. ВОМ трактора вращает вал насоса 3. Рычаг гидрораспределителя диагностируемого гидронасоса 3 находится в вертикальном положении, когда его подача практически равна нулю.

Медленно поворачивая рычаг гидрораспределителя насоса 3, давление увеличивают до номинального значения и следят за дав-

лением по показанию манометров 5. При известных значениях площади сечения дросселя 4 с учетом вязкости жидкости и минимального допустимого объемного КПД насоса по развиваемому в системе давлению делают заключение о состоянии насоса.

Схема диагностики гидромотора (см. рис. 3.60) работает следующим образом: эталонный насос 3 с коэффициентом подачи $\eta_o = 0,96$, приводящийся от двигателя внутреннего сгорания 1 через ВОМ, по рукавам высокого давления подает рабочую жидкость в гидромотор 4 и вращает его вал, который через муфту с тахометром 5 соединен с гидронасом 6, выполняющим роль гидравлического тормоза.

Медленно наклоняя рычаг гидрораспределителя насоса 3 до максимальной подачи, достигают максимальной частоты вращения вала гидромотора. Рычаг гидрораспределителя нагрузочного гидронасоса 6 находится в вертикальном положении, когда его подача практически равна нулю.

Медленно поворачивая рычаг гидрораспределителя насоса 6, давление увеличивают до номинального значения. За давлением следят по показанию манометров 8 и контролируют температуру рабочей жидкости по термометру 9. По развиваемой валом гидромотора частоте вращения под номинальной нагрузкой делают заключение о его техническом состоянии.

3.9. Развитие диагностирования технического состояния машин на основе бортовых электронных средств

На тракторах и самоходных сельскохозяйственных машинах, выпускаемых ведущими фирмами стран ЕС и США, широко используются бортовые электронные средства (БЭС), выполняющие функции контроля, регулирования или автоматического управления различными системами и механизмами, а также обеспечивающие оператора необходимой информацией. Эти функции логически увязаны с особенностями устройства и функционирования соответствующих систем и механизмов трактора и с режимами работы как самого трактора, так и МТА в целом.

В последнее время на выпускаемых в Беларуси и России мощных тракторах класса 3–5 и комбайнах перспективных моделей БЭС получили широкое применение.

Современные системы управления энергонасыщенными тракторами позволяют провести диагностирование технического состояния основных узлов и агрегатов при подготовке трактора к работе,

а также в процессе работы. Для этого тракторы оборудуются как традиционными стрелочными (световыми, звуковыми) индикаторами, так и электронными бортовыми диагностическими приборами, которые постоянно отслеживают текущие рабочие параметры систем и агрегатов трактора и по запросу выдают информацию на дисплей монитора, находящегося в кабине трактора. В случае возникновения неисправности электронная система извещает об этом оператора световым или звуковым сигналом, а также высвечивает на экране монитора краткое описание неисправности либо сигнальной лампой выдает код неисправности.

К таким информационно-диагностическим приборам относятся контрольно-измерительные приборы, индикаторы комбинированные, информационные мониторы, электронные блоки самодиагностирования.

Контрольно-измерительные приборы тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин могут располагаться на приборной панели как по отдельности, так и в виде комбинации приборов. Комбинация приборов тракторов включает в себя стрелочные указатели и сигнальные лампы. Варианты комбинаций приборов, устанавливаемых на тракторы «Беларус», приведены на рис. 3.61.

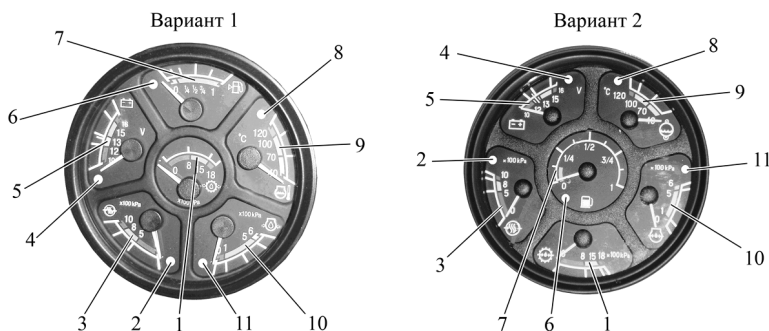


Рис. 3.61. Комбинация приборов бортового контроля тракторов «Беларус»: 1 – указатель давления масла в гидросистеме трансмиссии; 2 – сигнальная лампа аварийного давления воздуха в пневмосистеме; 3 – указатель давления воздуха в пневмосистеме; 4 – контрольная лампа зарядки дополнительной аккумуляторной батареи напряжением 24 В; 5 – указатель напряжения; 6 – сигнальная лампа резервного объема топлива в баке; 7 – указатель объема топлива в баке; 8 – сигнальная лампа аварийной температуры охлаждающей жидкости; 9 – указатель температуры охлаждающей жидкости; 10 – указатель давления масла в системе смазки; 11 – сигнальная лампа аварийного давления масла в системе смазки

Указатель давления масла в гидросистеме трансмиссии 1 (см. рис. 3.61) показывает значение давления масла в гидросистеме управления фрикционными муфтами трансмиссии трактора.

Шкала указателя давления масла в трансмиссии имеет три зоны:

- рабочая – 800–1500 кПа (зеленого цвета);
- аварийные – 0–800 кПа и 1500–1800 кПа (красного цвета).

Для тракторов «Беларус-3022/3522» рабочей зоной является участок шкалы от 1300 до 1500 кПа. На минимальных устойчивых оборотах двигателя давление масла в гидросистеме трансмиссии не должно быть менее 1000 кПа.

Давление масла в трансмиссии ниже 1300 кПа при оборотах двигателя не ниже 1400 об/мин для указанных моделей тракторов считается аварийным. Для остальных моделей тракторов «Беларус» аварийным давлением является 0–800 кПа и 1500–1800 кПа.

Причиной аварийного падения давления в гидросистеме трансмиссии может быть: недостаточный уровень масла в трансмиссии; неисправность клапанов фильтров гидросистемы трансмиссии (усадка пружин, залегание и др.); загрязнение фильтров; неисправность насоса гидросистемы; утечка масла в магистрали подвода к фрикционной муфте или в бустерах фрикционных муфт (только у тракторов с гидромеханической КП).

Причины аварийного повышения давления в гидросистеме трансмиссии: вязкость масла в трансмиссии не соответствует сезону (температуре воздуха) или сильно загрязнено; неправильно настроены или залегли клапаны фильтров.

Шкала указателя давления воздуха в пневмосистеме 3 имеет три зоны:

- рабочая – 500–800 кПа (зеленого цвета);
- аварийные – 0–500 кПа и 800–1000 кПа (красного цвета).

В шкалу указателя встроена сигнальная лампа 2 (красного цвета), которая загорается при понижении давления в пневмосистеме менее 500 кПа. Причиной аварийного снижения давления воздуха в пневмосистеме может быть: утечка воздуха в соединениях, клапанах и др.; нарушение настроечных параметров регулятора давления; неисправность всасывающего или нагнетательного клапана компрессора; большой износ или залегание поршневых колец компрессора.

Указатель напряжения 5 показывает напряжение аккумуляторных батарей при неработающем двигателе, когда ключ выключателя стартера и приборов находится в положении «Включены приборы».

При работающем двигателе указатель напряжения показывает напряжение на клеммах генератора. В шкалу указателя напряжения встроена контрольная лампа 4 красного цвета, которая используется только при системе пуска 24 В и показывает процесс зарядки дополнительной АКБ напряжением 24 В, т. е. диагностирует работоспособность преобразователя напряжения.

Контрольная лампа 4 должна загораться при повороте ключа выключателя стартера в положение «Включены приборы», а после запуска двигателя – гаснуть, что указывает на зарядку второй АКБ напряжением 24 В через преобразователь напряжения. Если контрольная лампа 4 после запуска двигателя продолжает гореть, это означает, что вторая батарея не заряжается. При наличии отклонений в системе электропитания, индицируемых стрелкой указателя напряжения 5 и контрольной лампой 4, необходимо выявить их причины и устранить в соответствии с рекомендациями руководства по эксплуатации на данную модель трактора.

Указатель объема топлива в баке. Шкала указателя 7 имеет деления « $0-1/4-1/2-3/4-1$ ». В шкалу указателя встроена сигнальная лампа 6 (оранжевого цвета), которая загорается при снижении количества топлива в баке до $1/8$ от общего объема бака. Не рекомендуется работа двигателя на остатке топлива, когда горит лампа оранжевого цвета.

Указатель температуры охлаждающей жидкости в двигателе 9 считывает информацию с блока управления двигателем (БУД). Шкала указателя имеет три зоны:

- рабочая – 70–105 °С (зеленого цвета);
- информационная – 40–70 °С (желтого цвета);
- аварийная – 105–120 °С (красного цвета).

В шкалу указателя встроена сигнальная лампа аварийной температуры (красного цвета) 8, которая работает в двух режимах:

- а) включается и работает в мигающем режиме при значениях температуры охлаждающей жидкости от 109 до 112 °С включительно;
- б) светится в постоянном режиме при значениях температуры охлаждающей жидкости от 113 °С и выше.

Указатель давления масла в системе смазки двигателя 10 считывает информацию с блока управления двигателем (БУД). Шкала указателя имеет три зоны:

- рабочая – 100–500 кПа (зеленого цвета);
- аварийные – 0–100 кПа и 500–600 кПа (красного цвета).

В шкалу указателя встроена сигнальная лампа аварийного падения давления масла *11* (красного цвета), которая загорается при понижении давления менее 100 кПа.

Боле точную информацию о температурном режиме, давлении масла в двигателе и устранении неисправностей можно получить по информационному монитору (для двигателей «Дойц») или с помощью электронной системы управления двигателем (для двигателей International DTA 530E).

Блок контрольных ламп включает в себя пять контрольных ламп, схема расположения которых представлена на рис. 3.62. Приведен блок контрольных ламп на щитке приборов тракторов «Беларус-3022ДЦ/3222/3522». На других моделях тракторов «Беларус» могут индцироваться другие параметры, которые расшифровываются в соответствующих руководствах по эксплуатации.

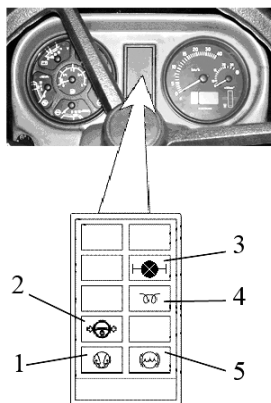


Рис. 3.62. Блок контрольных ламп:

- 1 – контрольная лампа максимальной засоренности фильтра воздухоочистителя (оранжевого цвета);
- 2 – контрольная лампа аварийного падения давления масла в системе ГОРУ (красного цвета);
- 3 – контрольная лампа блокировки дифференциала заднего моста (оранжевого цвета);
- 4 – контрольная лампа-индикатор работы подогревателя впускного воздуха (оранжевого цвета);
- 5 – контрольная лампа уровня тормозной жидкости (оранжевого цвета)

Принцип работы контрольных ламп БКЛ следующий:

– контрольная лампа максимальной засоренности фильтра воздухоочистителя *1* (см. рис. 3.62) загорается, когда превышен максимально допустимый уровень засоренности фильтра и необходима его очистка;

– контрольная лампа аварийного падения давления масла в системе ГОРУ 2 загорается при падении давления масла в гидросистеме ГОРУ ниже 0,08 МПа;

– контрольная лампа блокировки дифференциала заднего моста 3 загорается при включении блокировки дифференциала заднего моста;

– контрольная лампа уровня тормозной жидкости 5 загорается, когда уровень тормозной жидкости в бачках главных тормозных цилиндров ниже допустимого;

– контрольная лампа-индикатор работы предпускового подогревателя впускного воздуха (ППВВ) 4 отображает работу ППВВ, служащего для подогрева воздуха на входе в камеру сгорания при запуске холодного двигателя. ППВВ не включается если температура двигателя более +5 °С. Запуск двигателя необходимо произвести после того, как лампа по истечении определенного времени, зависящего от температуры двигателя, начнет мигать с частотой 1 Гц. После запуска двигателя подогреватель впускного воздуха продолжает оставаться некоторое время включенным, затем выключается автоматически.

При возникновении в ППВВ неисправности лампа 4 индицирует аварийные режимы (на тракторах «Беларус-3022ДЦ/3222/3522»):

– после запуска в процессе работы двигателя контрольная лампа 4 начинает непрерывно мигать с частотой 2 Гц. Это означает, что в системе ППВВ неисправность: подогреватель не отключился;

– контрольная лампа 4 включается при температуре двигателя выше +5 °С – это свидетельствует о неисправности датчика температуры ППВВ (обрыв или короткое замыкание), что приводит к включению ППВВ;

– при переводе ключа выключателя стартера и приборов из положения «Выключено» в положение «Включены приборы» контрольная лампа начинает мигать в медленном режиме – одно включение в три секунды. Это означает, что электрическое напряжение на ППВВ не подается. Если неисправность не устранить, запуск двигателя при низких температурах может быть затруднен.

Индикатор комбинированный (ИК) устанавливается на тракторах (самоходных сельскохозяйственных машинах) с целью отображения информации об эксплуатационных параметрах систем и агрегатов и предоставления оператору данных о возникшей неисправности какой-либо системы. ИК включает стрелочные указатели и лампы-сигнализаторы (рис. 3.63). Пульт управления ИК приведен на рис. 3.64.

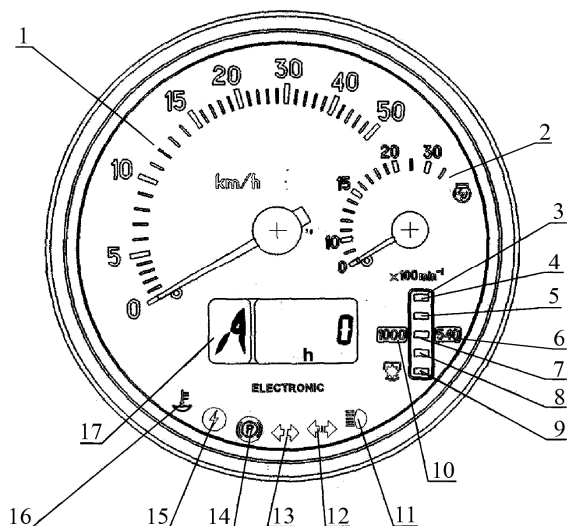


Рис. 3.63. Индикатор комбинированный:

1 – указатель скорости (стрелочный индикатор); 2 – указатель оборотов двигателя (стрелочный индикатор); 3 – указатель оборотов ЗВОМ (световой индикатор); 4, 9 – сегменты шкалы оборотов ЗВОМ (желтого цвета); 5, 7, 8 – сегменты шкалы оборотов ЗВОМ (зеленого цвета); 6, 10 – сигнализаторы диапазона шкалы оборотов ЗВОМ «540 мин⁻¹» и «1000 мин⁻¹» (желтого цвета); 11 – контрольная лампа-индикатор включения дальнего света фар (синего цвета); 12 – контрольная лампа-индикатор включения указателей поворотов прицепа (зеленого цвета); 13 – контрольная лампа-индикатор включения указателей поворотов трактора (зеленого цвета); 14 – контрольная лампа-сигнализатор включения стояночного тормоза (красного цвета); 15 – контрольная лампа-сигнализатор повышенного напряжения бортовой сети (красного цвета); 16 – контрольная лампа-сигнализатор низкого уровня охлаждающей жидкости (желтого цвета); 17 – многофункциональный индикатор

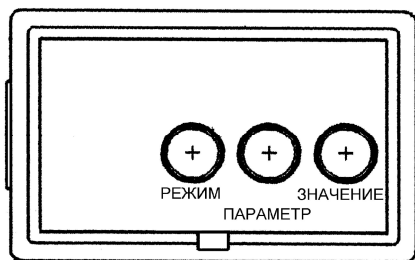


Рис. 3.64. Пульт управления ИК

Пульт управления ИК позволяет вручную программировать ИК с помощью кнопок «Параметр» и «Значение», а также с помощью кнопки «Режим» просматривать выводимые на многофункциональный индикатор параметры. Для доступа к кнопкам «Режим», «Параметр» и «Значение» необходимо снять крышку на пульте управления.

Многофункциональный индикатор (МИ) 17 отображает информацию одновременно в полях 1 и 2 (рис. 3.65).

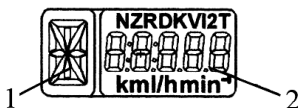


Рис. 3.65. Многофункциональный индикатор:

- 1 – цифровое обозначение номера включенной передачи КП (цифры от 0 до 6) или буквенное обозначение включенной ступени редуктора (буквы L, M, H, N);
- 2 – текущее числовое значение одного из параметров систем трактора

ИК получает информацию о номере включенной передачи КП от блока управления трансмиссией комплексной электронной системы управления (КЭСУ). Данный параметр отображается в информационном поле 1. При отсутствии сигнала с КЭСУ (неисправность в КЭСУ, обрыв провода, нарушение электрического контакта и т. д.) в информационном поле 1 отображается буква «А».

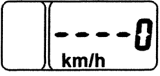

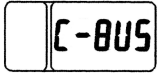
В информационном поле 2 отображаются следующие параметры: суммарное астрономическое время наработки двигателя; мгновенный расход топлива; напряжение бортовой сети; объем оставшегося топлива; время работы на остатке топлива; обороты ЗВОМ; наработка двигателя за выбранный период; диагностика работоспособности датчиков скорости; диагностика работоспособности частотного датчика объема топлива (ДОТ.Ч); диагностика работоспособности и подключения CAN-шины к ИК.

Переключение между режимами индикации «Суммарное астрономическое время наработки двигателя», «Мгновенный расход топлива», «Объем оставшегося топлива», «Время работы на остатке топлива», «Напряжение бортовой сети», «Обороты ЗВОМ» и между сообщениями о неисправностях осуществляется нажатием на кнопку «Режим» пульта управления ИК.

Примеры отображения на МИ сообщений о неисправностях и краткое описание отображаемой неисправности трактора приведены в табл. 3.16.

Таблица 3.16

Примеры отображения сообщений о неисправностях трактора на МИ

Диагностируемый параметр	Пример отображения неисправности на МИ	Описание неисправности
Диагностика работоспособности и подключения датчиков скорости	 датчик левого колеса  датчик правого колеса	При отсутствии сигналов от датчиков скорости в течение от 10 до 12 с на МИ отображается сообщение «0», характеризующее месторасположение неисправного датчика (левого или правого) или обрыва его электроцепи
Диагностика работоспособности частотного датчика объема топлива		При отсутствии частотного сигнала от ДОТ.Ч в течение 2 с на МИ отображается сообщение FUEL
Диагностика работоспособности и подключения CAN-шины к ИК с CAN-интерфейсом		Отсутствие сигналов по CAN-шине ИК сопровождается выводом на МИ сообщения C-BUS

При отсутствии сигналов, принимаемых от БУД, соответствующие режимы индикации автоматически отключаются и в информационном поле 2 появляется сообщение C-BUS.

Каждое из вышеперечисленных сообщений о неисправностях выводится по приоритету на информационное поле 2 независимо от отображаемой в текущий момент информации. При последовательном нажатии на кнопку «Режим» сообщения должны поочередно перелистываться. При просмотре последнего сообщения и повторном нажатии на кнопку «Режим» МИ переходит в режим отображения по циклу указанных ранее рабочих параметров.

Отображение на дисплее сообщений о неисправностях происходит при каждом включении прибора до момента устранения причины неисправности.

При включении питания ИК на МИ отображается информация в режиме индикации, выбранном до момента выключения питания ИК.

Принцип работы *контрольных ламп ИК*:

– контрольная лампа-индикатор включения дальнего света дорожных фар *11* (см. рис. 3.63) загорается при включении дальнего света дорожных фар;

– индикаторы включения указателей поворотов трактора *13* и его прицепа *12* работают в мигающем режиме при включении подрулевым многофункциональным переключателем сигнала правого или левого поворота или при включении выключателя аварийной сигнализации;

– контрольная лампа-сигнализатор включения стояночного тормоза *14* работает в мигающем режиме с частотой 1 Гц при срабатывании датчика включения стояночного тормоза;

– контрольная лампа-сигнализатор повышенного напряжения бортовой сети *15* включается при напряжении питания бортовой сети трактора свыше 19 В и выключается при уровне напряжения питания менее 17 В;

– контрольная лампа-сигнализатор низкого уровня охлаждающей жидкости *16* включается при уровне ОЖ ниже допустимой нормы.

В ИК при каждом подключении к питанию осуществляется проверка функционирования стрелочных указателей и элементов шкалы индикатора ЗВОМ. В течение не более 1 с стрелки указателей отклоняются от нулевых отметок (либо в течение не более 1 с происходит дрожание стрелок на нулевых отметках указателей), а также включаются оба сигнализатора диапазона шкалы ЗВОМ *6* и *10* (см. рис. 3.63) и все сегменты шкалы ЗВОМ.

Тракторы «Беларус», укомплектованные двигателями «Дойц», оборудованы электронной системой управления двигателем (ЭСУД).

ЭСУД (рис. 3.66) предназначена для текущего контроля рабочих параметров двигателя и информирования оператора о состоянии систем двигателя и возникших неисправностях. Она имеет встроенную систему диагностики неисправностей на работающем и неработающем двигателе.

Диагностирование двигателя «Дойц» проводится с помощью информационного монитора и панели электронной комбинированной (ПЭК), расположенных в кабине оператора.

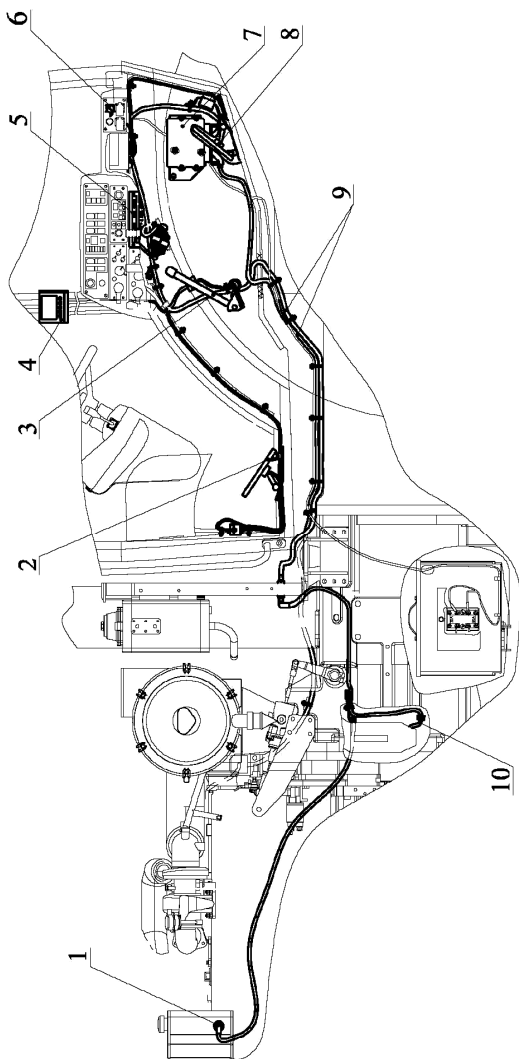


Рис. 3.67. Электронная система управления двигателям «Дойц»:

1 – датчик уровня охлаждающей жидкости; 2 – электронная ножная педаль подачи топлива на прямом ходу; 3 – рукоятка ручного управления подачей топлива; 4 – информационный монитор; 5 – электронная комбинированная панель; 6 – диагностический разъем; 7 – электронный блок управления двигателем; 8 – электронная ножная педаль подачи топлива на реверсивном ходу; 9 – жгут; 10 – датчик наличия воды в фильтре грубой очистки топлива

Информационный монитор (рис. 3.67), входящий в состав ЭСУД, позволяет контролировать параметры работы двигателя, сигнализирует о возникновении неисправностей в ЭСУД и дает их краткое описание.

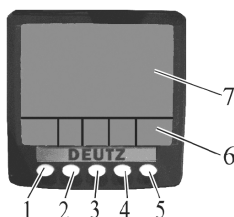


Рис. 3.67. Информационный монитор:

1 – кнопка вызова основного (трехсекционного) отображения и перебора индицируемых параметров; 2 – кнопка вызова четырехсекционного отображения и перебора индицируемых параметров; 3 – кнопка вызова графического отображения и перебора индицируемых параметров; 4 – кнопка вызова индикации списка ошибок (неисправностей); 5 – кнопка входа в режим настройки контрастности, яркости и PIN-кода/выхода из него; 6 – сменное отображение назначений кнопок; 7 – экран

Перед запуском двигателя после поворота ключа выключателя стартера и приборов в положение «Питание приборов» в электронную систему управления двигателем подается напряжение питания. После поступления напряжения питания ЭСУД постоянно проводит самодиагностику. При отсутствии неисправностей в работе ЭСУД информационный монитор функционирует в рабочем режиме – отображает реально измеренные параметры работы двигателя.

При обнаружении ошибок информационный монитор выдает звуковой сигнал и на экране появляется краткое описание выявленных ошибок (обозначение кода ошибки и ее описание), а на панели управления двигателем загорается либо мигает сигнализатор диагностики неисправностей. Выявленные неисправности необходимо устранить до запуска двигателя.

После запуска двигателя на информационном мониторе появляется та индикация, которая отображалась на нем перед предыдущей остановкой двигателя. Всего экран монитора может отображать четыре индикатора: основной индикатор по двигателю; четырехсекционный индикатор; графический; сигнальный.

Основной индикатор по двигателю объединяет три независимые секции и показывает самые важные и наиболее часто используемые

параметры двигателя: в левом верхнем углу экрана отображается шкала оборотов двигателя, в правом верхнем – шкала скорости движения трактора (или давление масла в системе смазки двигателя в зависимости от настройки прибора), в правом нижнем – температура охлаждающей жидкости, левом нижнем – текущий часовой расход топлива.

Повторным нажатием на кнопку 1 вместо текущего часового расхода топлива может быть вызвано время работы двигателя в часах.

Нажатием на кнопку 2 (предварительно вызвав отображение значений кнопок в зоне 6 – см. рис. 3.67) производится вызов четырехсекционного отображения параметров на экране индикатора. После первого нажатия на кнопку 2 на экране высвечивается четыре параметра в цифровом виде (рис. 3.68): в левом верхнем углу – обороты двигателя; в правом верхнем – температура охлаждающей жидкости; в правом нижнем – давление масла в системе смазки двигателя; в левом нижнем – напряжение в бортовой электросети.

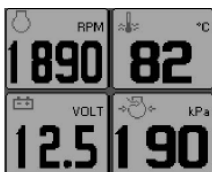


Рис. 3.68. Четырехсекционное цифровое отображение индицируемых параметров

При нажатии на кнопку 2 второй раз на экране отображаются те же параметры в аналоговом виде (рис. 3.69).

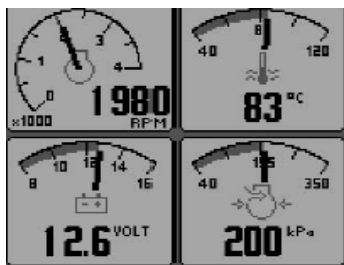


Рис. 3.69. Четырехсекционное аналоговое отображение индицируемых параметров

При третьем нажатии на кнопку 2 на экране отображаются четыре альтернативных параметра (рис. 3.70, начиная с верхнего левого угла по часовой стрелке): температура охлаждающей жидкости; температура наддувочного воздуха; атмосферное давление; давление наддувочного воздуха. С помощью режима настройки каждый отображенный на экране индикатор может быть настроен пользователем на любой желаемый параметр.

При возникновении какой-либо неисправности в процессе работы двигателя монитор выдает звуковой сигнал и на экране всплывает мигающее окно с описанием (рис. 3.71).

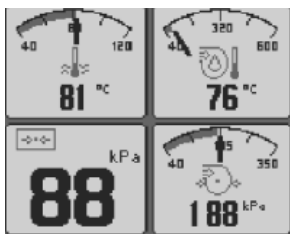


Рис. 3.70. Альтернативное аналоговое отображение индицируемых параметров



Рис. 3.71. Отображение информации о неисправности

При нажатии на любую кнопку отображается список всех предыдущих неисправностей. Неисправности, уже зафиксированные ранее, отображаются на сером фоне черными буквами. Новые сигналы, которые еще не были зафиксированы, отображаются на черном фоне серыми буквами (рис. 3.72).

TOTAL ALARMS : 13	
ENG. DESCRIPTION	FAIL MODE
13. 1 ENG FUEL MODULE ENG HRS : 0 SPN : 1077 OCC CNT : 13	SPECIAL INS. FMI : 14
12. 1 ENG FUEL MODULE ENG HRS : 0 SPN : 1077 OCC CNT : 12	RATE CHANGE FMI : 10
11. 1 PICKUP FAIL ENG HRS : 0 SID : 21 OCC CNT : 11	NOT AVAILABLE FMI : 5
↑	↓
TOTAL ALARMS : 13	
ENG. DESCRIPTION	
FAIL MODE	
13. 1 ENG FUEL MODULE ENG HRS : 0 SPN : 1077 OCC CNT : 13	SPECIAL INS. FMI : 14
12. 1 ENG FUEL MODULE ENG HRS : 0 SPN : 1077 OCC CNT : 12	RATE CHANGE FMI : 10
11. 1 PICKUP FAIL ENG HRS : 0 SID : 21 OCC CNT : 11	NOT AVAILABLE FMI : 5
↑	↓

Рис. 3.72. Отображение перечня неисправностей двигателя

Если на экран выведен индикатор часовой наработки трактора, то информация о неисправности дополняется временем подачи сигнала о неисправности.

Панель электронная комбинированная (ПЭК) содержит элементы управления электрогидравлическим распределителем, активизации электронных педалей подачи топлива на прямом и реверсивном ходу, а также различные сигнализаторы, информирующие оператора о возникновении аварийных ситуаций при работе двигателя (рис. 3.73).

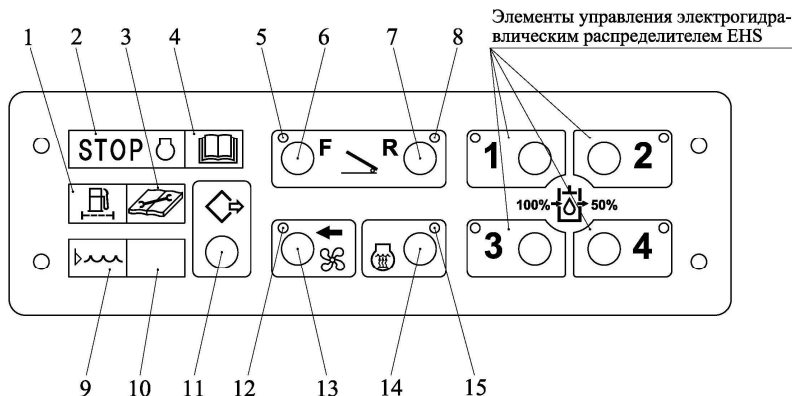


Рис. 3.73. Панель электронная комбинированная:

- 1 – сигнализатор наличия воды в топливном фильтре; 2 – сигнализатор аварийного давления масла в двигателе; 3 – сигнализатор ТО; 4 – сигнализатор диагностики неисправностей; 5 – сигнализатор активизации электронной ножной педали подачи топлива на прямом ходу; 6, 7 – кнопки активизации электронной ножной педали подачи топлива на прямом и реверсивном ходу; 8 – сигнализатор активизации электронной ножной педали управления подачей топлива на реверсивном ходу; 9 – сигнализатор аварийных температур или уровня охлаждающей жидкости; 10 – резервный сигнализатор; 11 – кнопка активизации диагностики; 12, 13 – сигнализатор и кнопка включения реверса вентилятора; 14, 15 – кнопка и сигнализатор включения подогревателя охлаждающей жидкости

Сигнализатор наличия воды в топливном фильтре 1 загорается при концентрации воды в фильтре грубой очистки топлива выше допустимой нормы. При срабатывании сигнализатора 1 необходимо слить отстой из фильтра грубой очистки топлива.

Сигнализатор аварийного давления масла в двигателе 2 загорается при давлении масла в двигателе ниже допустимой нормы.

Если сигнализатор 2 горит при работающем двигателе, необходимо немедленно остановить двигатель и устранить неисправность.

Сигнализатор аварийных температуры и уровня охлаждающей жидкости 9 загорается при температуре ОЖ выше допустимой нормы либо при уровне ОЖ ниже допустимой нормы.

Кнопка активизации диагностики 11 предназначена для вызова из памяти электронного блока управления двигателем активных ошибок путем световых кодов, отображаемых сигнализатором диагностики неисправностей 4. Этот способ диагностики является альтернативным по сравнению с информационным монитором. По считыванию и расшифровке световых кодов ошибок и рекомендуемым действиям по устранению неисправностей следует обращаться к руководству по эксплуатации двигателя, прикладываемому к трактору, поскольку эти коды могут отличаться в зависимости от модели двигателя. Выявленные неисправности необходимо устранить.

На некоторых модификациях тракторов «Беларус-3022/3522» в ПЭК при каждом подключении к питанию осуществляется проверка функционирования сигнализаторов. В течение около 2 с включаются все светодиодные сигнализаторы и срабатывает звуковой сигнализатор. Затем светодиодные сигнализаторы и звуковой сигнализатор переходят в рабочий режим: остается гореть только сигнализатор 5 или 8 (в зависимости от выбранной педали подачи топлива), звуковой сигнализатор отключается. На других модификациях может быть установлена ПЭК без проверки функционирования светодиодных сигнализаторов.

Диагностирование двигателей International DTA («Детройт») с помощью ЭСУД

На тракторах и самоходных сельскохозяйственных машинах, оборудованных двигателями International, контроль и диагностирование их работы также осуществляется посредством ЭСУД, предназначенной для текущего контроля рабочих параметров двигателя, управления процессом впрыска топлива, защиты двигателя, информирования о состоянии систем двигателя. ЭСУД имеет встроенную систему диагностики неисправностей на работающем и неработающем двигателе и подразделяется на две части:

– контролирующая часть, состоящая из устройства электронного управления и текущего контроля параметров двигателя (блок электронного контроля (БЭК)), датчиков, установленных на двигателе, и регулятора давления впрыска;

– регистрирующая часть – пульт визуального контроля работы двигателя, звукового оповещения и диагностирования, находящийся в кабине трактора.

Схема ЭСУД приведена на рис. 3.74.

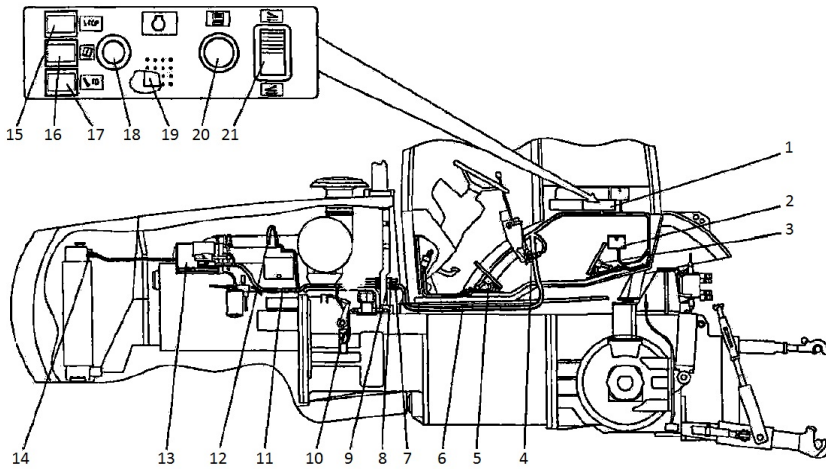


Рис. 3.74. Электронная система управления двигателем International DTA 530E: 1 – панель управления; 2 – щиток предохранителей; 3 – электронная педаль управления режимом работы двигателя на реверсивном ходу; 4 – датчик ручного управления режимом работы двигателя; 5 – электронная педаль управления режимом работы двигателя на прямом ходу; 6, 7, 11 – соединительные жгуты; 8, 9 – штепсельные разъемы; 10 – датчик барометрического давления; 12 – датчик температуры воздуха; 13 – блок электронного контроля; 14 – датчик уровня охлаждающей жидкости; 15 – световой сигнализатор аварийного останова двигателя; 16 – световой сигнализатор диагностики системы управления двигателем; 17 – световой сигнализатор ТО; 18 – кнопка активизации диагностики системы управления двигателем; 19 – зуммер; 20 – штепсельный разъем для подключения диагностического прибора Pro-Link 9000; 21 – переключатель выбора педали управления режимом работы двигателя

Перед каждым запуском двигателя поворачивают ключ выключателя стартера в положение «Включены приборы». Блок электронного контроля проводит самодиагностику электронной системы управления двигателем. В процессе работы двигателя БЭК постоянно проводит самодиагностику параметров ЭСУД и запоминает обнаруженные коды неисправностей.

При обнаружении неисправностей, нарушающих функционирование ЭСУД, система предупреждает оператора посредством включения светового сигнализатора 16 желтого цвета (постоянно горит), а также может выполнить корректирующие действия, направленные

на снижение мощности двигателя (при повышенной температуре охлаждающей жидкости). В случае обнаружения неисправностей, которые могут привести к повреждению двигателя при его дальнейшей эксплуатации, система при достижении предупреждающих уровней контролируемых параметров (давления масла в двигателе, уровня или температуры охлаждающей жидкости) активизирует световой сигнализатор 15 аварийного останова двигателя красного цвета в режиме постоянного горения, а при достижении критических уровней – в мигающем режиме. Включение светового сигнализатора 15 сопровождается параллельным включением зуммера 19. Активизация светового сигнализатора 15 предполагает немедленную остановку двигателя и проведение работ по выявлению зарегистрированной неисправности. При игнорировании оператором световых и звуковых сигналов о необходимости останова двигателя, система после превышения критических уровней контролируемых основных параметров (мигающий режим светового сигнализатора 15) автоматически произведет останов двигателя по истечении 30 с от начала работы светового сигнализатора 15 в режиме мигания. Отдельные неисправности, не требующие немедленного вмешательства оператора, система регистрирует без его оповещения через световую или звуковую сигнализацию в процессе работы двигателя.

Оператор может самостоятельно провести предварительное диагностирование ЭСУД при помощи считывания световых кодов неисправностей. Считывание оператором световых кодов зарегистрированных активных и неактивных неисправностей производится при остановленном двигателе и в положении ключа выключателя стартера и приборов «Включены приборы» при помощи кнопки диагностики системы управления двигателем 18, расположенной на панели управления 1, с использованием световых сигнализаторов 15 (красного цвета) и 16 (желтого цвета). При помощи кнопки 18 оператор запускает стандартный тест при включенном питании стартера и приборов и выключенном (неработающем) двигателе.

Для того чтобы самостоятельно провести процедуру диагностирования, оператору необходимо при остановленном двигателе нажать на кнопку диагностики системы управления двигателем 18 и, удерживая ее, повернуть ключ выключателя стартера и приборов в положение «Питание приборов». После того как ключ окажется в указанном положении, необходимо отпустить кнопку 18. Двигатель во время проведения процедуры диагностирования запускать

не нужно. После подачи таким образом сигнала оператором система управления проведет диагностику двигателя и однократным миганием светового сигнализатора 15 оповестит о начале вывода световых кодов неисправностей.

Световые коды неисправностей делятся на активные, которые регистрируются системой в момент проведения диагностирования (при остановленном двигателе), и неактивные, которые были зарегистрированы ранее, но в момент диагностирования не выявлены.

В процессе считывания кодов неисправностей сначала выводится группа активных кодов (один или несколько световых кодов), а затем – неактивных (один или несколько кодов). Последовательность выведения кодов внутри указанных групп осуществляется в порядке их появления по времени в процессе эксплуатации двигателя.

Номер светового кода состоит из трех цифр. Считывание номера кода осуществляется подсчитыванием количества миганий желтого светового сигнализатора 16: первая цифра кода – подсчитывается количество вспышек, затем следует пауза; вторая цифра – подсчитывается количество вспышек после первой паузы, затем следует вторая пауза; третья цифра – подсчитывается количество вспышек после второй паузы. Например, световой код неисправности – «232». Система будет активизировать желтый световой сигнализатор 16 следующим образом: две вспышки – пауза – три вспышки – пауза – две вспышки. Между собой номера световых кодов разделяются вспышкой красного светового сигнализатора 15. Выводу активных кодов предшествует мигание один раз, выводу неактивных – два раза. Завершение вывода всех кодов сопровождается миганием красного сигнализатора три раза. Включение данного сигнализатора всегда сопровождается параллельной подачей звукового сигнала зуммера 19.

Если в момент активизации процесса диагностирования система активные коды не выявила, то в начале процесса диагностирования она выведет световой код «111»: в момент диагностирования системой неисправностей по диагностируемым цепям не выявлено. Далее после двойного мигания красного светового сигнализатора 15 будут выведены неактивные коды.

Световой код отражает не механическую неисправность, а электрическую ошибку, выявленную в процессе диагностирования системы.

КЭСУ на тракторах «Беларус-3022ДЦ/3222/3522» предназначена для выполнения следующих функций:

– индикация включенной передачи в коробке передач (КП);

- управление режимом переключения передач КП;
- управление задним валом отбора мощности (ЗВОМ);
- управление передним валом отбора мощности (ПВОМ);
- управление приводом переднего ведущего моста;
- управление блокировкой дифференциала (БД) заднего моста;
- сигнализация аварийных состояний гидросистемы трансмиссии и гидронавесной системы (ГНС), диагностика аварийного напряжения бортовой сети;
- диагностика неисправностей электронных систем управления ЗВОМ, ПВОМ, ППВМ, БД заднего моста, управления переключением передач.

Расположение элементов управления, индикаторов и сигнализаторов КЭСУ представлено на рис. 3.75.

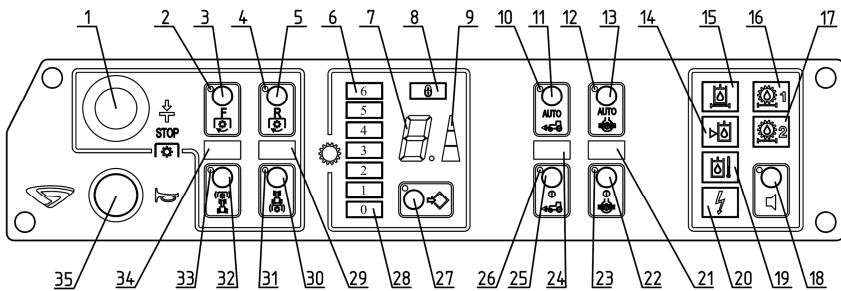


Рис. 3.75. Комплексная электронная система управления:

- 1 – кнопка аварийного выключения ПВОМ и ЗВОМ; 2, 3 – сигнализатор и кнопка включения ПВОМ; 4, 5 – сигнализатор и кнопка включения ЗВОМ; 6 – сигнализаторы включения передач 1–6; 7 – цифровой индикатор; 8 – сигнализатор аварийного режима работы КП; 9 – индикатор режима переключения передач; 10, 11 – сигнализатор и кнопка включения автоматического режима ППВМ; 12, 13 – сигнализатор и кнопка включения автоматического режима БДЗМ; 14 – сигнализатор аварийного уровня масла ГНС; 15 – сигнализатор засоренности фильтра насоса ГНС и аварийной температуры масла в насосе ГНС; 16 – сигнализатор засоренности сдвоенного фильтра гидросистемы трансмиссии; 17 – резервный сигнализатор; 18 – кнопка выключения звукового сигнализатора (зуммера); 19 – сигнализатор аварийной температуры масла в баке ГНС; 20 – сигнализатор аварийного напряжения питания КЭСУ; 21 – сигнализатор включенного состояния БДЗМ; 22, 23 – кнопка и сигнализатор включения принудительного режима БДЗМ; 24 – сигнализатор включенного состояния ППВМ; 25, 26 – кнопка и сигнализатор включения принудительного режима ППВМ; 27 – кнопка выбора режима переключения передач; 28 – сигнализатор нулевой передачи; 29 – сигнализатор включенного состояния ЗВОМ; 30, 31 – кнопка и сигнализатор выключения ЗВОМ; 32, 33 – кнопка и сигнализатор выключения ПВОМ; 34 – сигнализатор включенного состояния ПВОМ; 35 – кнопка включения звукового сигнала

Сигнализаторы аварийного состояния систем трактора:

1. Сигнализатор засоренности сдвоенного фильтра гидросистемы трансмиссии 16 (см. рис. 3.75) загорается при сильной степени засоренности фильтра. Необходимо заменить фильтрующие элементы сдвоенного фильтра.

2. Сигнализатор засоренности фильтра насоса ГНС 15 загорается (и далее работает в режиме непрерывного свечения) при сильной степени засоренности фильтра насоса ГНС. Необходимо заменить фильтр насоса ГНС.

3. Сигнализатор аварийного уровня масла в ГНС 14 загорается при уровне масла в баке ГНС ниже допустимой нормы.

4. Сигнализатор аварийной температуры масла в ГНС 19 загорается при температуре масла в баке ГНС выше допустимой нормы. Кроме того, при температуре масла в насосе ГНС выше допустимой нормы включается и работает в мигающем режиме сигнализатор 15.

В КЭСУ при каждом подключении к питанию осуществляется проверка функционирования индикаторов и сигнализаторов. В течение около 2 с включаются все светодиодные сигнализаторы и индикаторы, цифровой индикатор 7 (см. рис. 3.75) высвечивает цифру 8, срабатывает звуковой сигнализатор. Затем светодиодные сигнализаторы и индикаторы, цифровой индикатор и звуковой сигнализатор переходят в рабочий режим: остаются гореть сигнализаторы 28, 31, 33; индикатор режима переключения передач 9 отображает средний режим работы (горит средний сегмент индикатора); на цифровом индикаторе 7 индицируется цифра 0; остальные светодиодные сигнализаторы и звуковой сигнализатор отключаются.

Диагностика неисправностей электронной системы управления задним и передним навесными устройствами. Управление задним навесным устройством (ЗНУ) осуществляется пультом управления (рис. 3.76) и выносными кнопками 1 и 2 (рис. 3.77).

Управление передним навесным устройством (ПНУ) осуществляется таким же пультом (рис. 3.76) и выносными кнопками 1 и 2 (рис. 3.78). В системе управления ПНУ отсутствуют датчики усилия, следовательно нет силового и смешанного способов регулирования, отсутствует режим «демпфирование».

Электронная система управления ЗНУ и ПНУ обладает способностью самопроверки и при обнаружении неисправностей выдает кодовую информацию оператору при помощи сигнализатора диаг-

ностики неисправностей 9 (рис. 3.76) на соответствующем пульте управления ЗНУ или ПНУ. После запуска двигателя загорается сигнализатор диагностики 9, что говорит о работоспособности и заблокировании системы управления. Для разблокирования системы необходимо один раз установить рукоятку 7 в рабочее положение («Подъем» или «Опускание»). Сигнализатор диагностики 9 при этом гаснет.

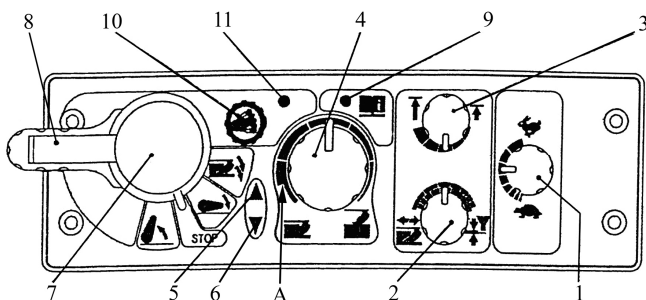


Рис. 3.76. Схема управления ЗНУ пультом управления:

- 1 – рукоятка регулирования скорости опускания; 2 – рукоятка выбора способа регулирования;
- 3 – рукоятка регулирования ограничения высоты подъема навески; 4 – рукоятка регулирования глубины обработки почвы;
- 5 – сигнализатор подъема навесного устройства (красного цвета);
- 6 – сигнализатор опускания навесного устройства (зеленого цвета);
- 7 – рукоятка управления навесным устройством; 8 – фиксатор блокировки рукоятки управления навесным устройством;
- 9 – сигнализатор диагностики неисправностей (красного цвета); 10 – кнопка включения режима «демпфирование»;
- 11 – сигнализатор включения режима «демпфирование» (красного цвета)

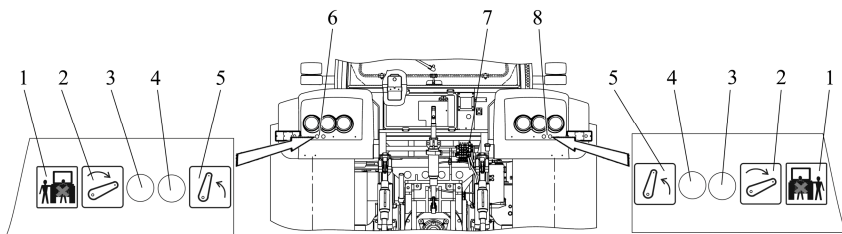


Рис. 3.77. Схема управления ЗНУ выносными кнопками:

- 1 – инструкционная табличка с правилами безопасности;
- 2, 5 – инструкционные таблички схемы управления ЗНУ; 3 – кнопка опускания ЗНУ; 4 – кнопка подъема ЗНУ; 6 – левый выносной пульт управления ЗНУ; 7 – регулятор; 8 – правый выносной пульт управления ЗНУ

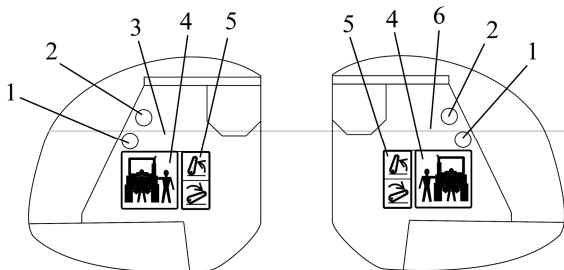


Рис. 3.78. Схема управления ПНУ выносными кнопками:
 1 – кнопка опускания ПНУ; 2 – кнопка подъема ПНУ;
 3 – правый выносной пульт управления ПНУ; 4 – инструкционная табличка о правилах безопасности; 5 – инструкционная табличка схемы управления ЗНУ; 6 – левый выносной пульт управления ПНУ

При наличии неисправностей в системе сигнализатор диагностики 9 (см. рис. 3.76) отображает на соответствующем пульте информацию о неисправности, и в случае необходимости происходит блокирование работы системы управления ЗНУ или ПНУ.

Код неисправности выдается в виде двузначного числа, первая цифра которого равна количеству миганий сигнализатора 9 после первой длинной паузы, а вторая цифра – количеству миганий после второй длинной паузы. Например, сигнализатор 9 работает в следующем алгоритме: запуск двигателя; непрерывное свечение; разблокировка системы – сигнализатор гаснет; трехразовое мигание сигнализатора; длинная пауза – отсутствие свечения; шестиразовое мигание сигнализатора; длинная пауза – отсутствие свечения. Это значит, что система имеет неисправность под кодом «36». При наличии нескольких неисправностей одновременно система индицирует коды друг за другом, разделяя их длинной паузой.

Все неисправности подразделяются на три группы: сложные, средние и легкие.

При обнаружении сложных неисправностей регулирование прекращается и система отключается. Система не управляется ни с пульта, ни выносными кнопками. Сигнализатор диагностики выдает код неисправности. После устранения неисправности и запуска двигателя работа системы восстанавливается.

При средних неисправностях регулирование прекращается и система блокируется. Система управляется только выносными кнопками. Сиг-

нализатор диагностики выдает код неисправности. После устранения неисправности запуска двигателя работа системы восстанавливается.

При легких неисправностях сигнализатор диагностики выдает код неисправности, но система управляется и не блокируется. В то же время система управления ЗНУ работает некорректно из-за неправильного считывания рельефа почвы. После устранения неисправности сигнализатор диагностики выключается.

Устранение неисправностей производится согласно руководствам по эксплуатации соответствующих моделей тракторов.

Диагностирование неисправностей гидрораспределителей EHS

На тракторах «Беларус-3022/3522» установлен электрогидравлический интегральный блок, состоящий из четырех секций распределителя типа EHS с электронно-гидравлическим управлением расходом жидкости, электрогидравлического регулятора EHR и электромагнитного редукционного клапана.

В каждой секции распределителя EHS в ее нижней части в области электрического разъема расположен индикатор кодов неисправностей (рис. 3.79). При наличии в секции неисправности индикатор выдает кодовую информацию. Код неисправности состоит из двух цифр. Считывание кода осуществляется подсчитыванием вспышек индикатора: первая цифра (количество вспышек с короткой паузой между ними) – длинная пауза – вторая цифра (количество вспышек с короткой паузой между ними). Например, для индикации кода «23» система активизирует индикатор следующим образом: две вспышки – пауза – три вспышки. При отсутствии неисправностей в распределительной секции индикатор включен.

В зависимости от степени сложности неисправности может происходить блокирование работы данной секции или одновременно нескольких секций.

Логическое содержание функции контроля технического состояния и режимов зарубежных тракторов БЭС заключается в том, что на основе измерений текущих значений ряда параметров оценивается ситуация по признаку наличия (или отсутствия) отклонений, требующих немедленного (или отложенного) вмешательства в виде изменения режимов работы или проведения необходимых операций обслуживания и ремонта. Во втором случае уровень идентификации причин возникших отклонений довольно неглубок и, как правило, требует от обслуживающего персонала дополнительных действий для конкретизации возникшей неисправности. Теоретических пределов для углубления этого уровня не существует.

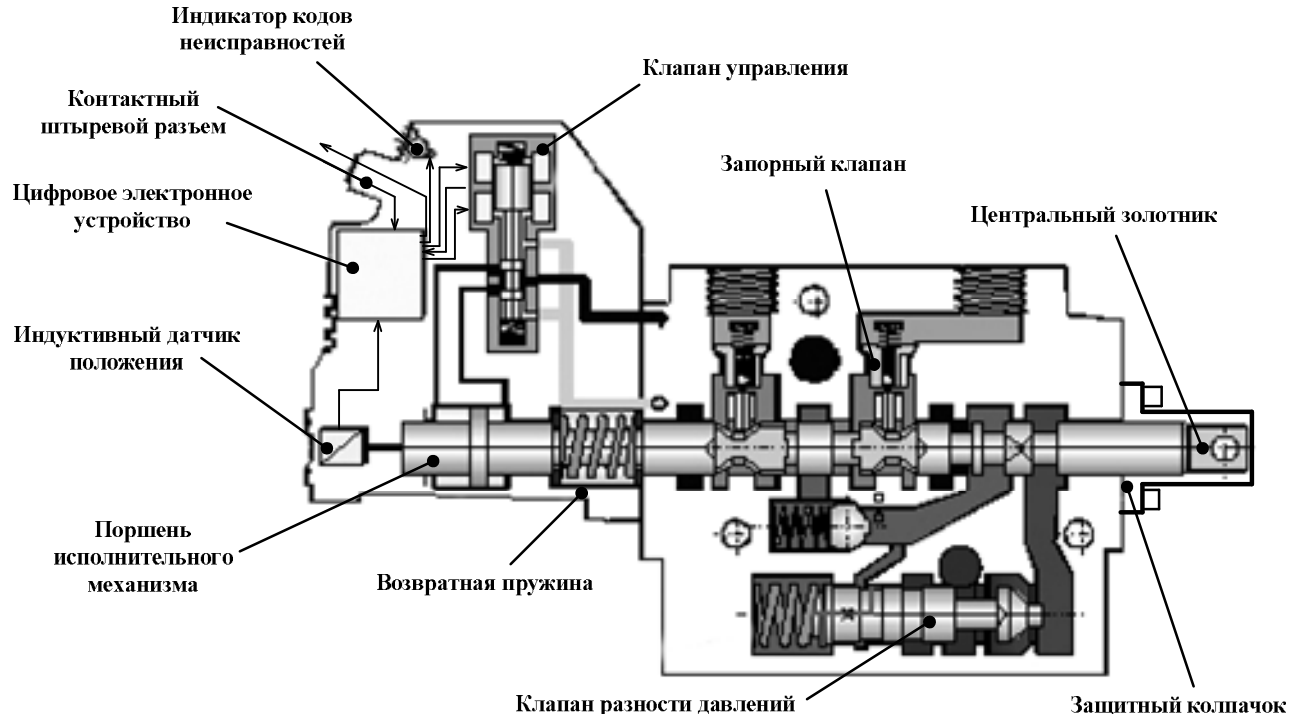


Рис. 3.79. Секция распределителя EHS

В советский период были разработаны специальные экспертные системы («базы знаний»), не только помогавшие принимать решения на основе объективных данных из внешних электронных диагностических устройств, но и позволявшие оператору вводить информацию качественного характера в целях углубленной диагностики и выявления причины отказа.

Естественное ограничение возможного углубления контроля и идентификации причин неисправностей с использованием БЭС – усложнение (а значит, и удорожание) конструкции трактора из-за расширения номенклатуры установленных датчиков, т. к. стоимость собственно электронного блока сравнительно невелика. Определенные ограничения накладывает и квалификация оператора, которая существенно ниже, чем квалификация мастера-диагноста. Рациональная загрузка квалифицированного специалиста с учетом реальной частоты возникновения отказов возможна только при обслуживании достаточно большого парка тракторов.

Практика обслуживания и ремонта современной автомобильной техники, активно оснащаемой за последние годы БЭС, показывает рациональность разделения функций бортовых технических средств, нацеленных на облегчение и информационное обеспечение оператора (водителя) и внешнего контрольно-диагностического оборудования (на станциях ТО), ориентированного на работу мастера-диагноста и позволяющего углубленно оценивать техническое состояние машины и ее составных частей.

Для тракторной и самоходной сельскохозяйственной техники, несмотря на особенности ее использования, сохранится на достаточно длительную перспективу целесообразность ограничения (в разумных пределах) функции контроля технического состояния, реализуемой БЭС. Функции БЭС современных мощных тракторов в части контроля технического состояния (диагностирования) должны ограничиваться решением следующих основных задач:

– непрерывный контроль предельных (критических) параметров основных агрегатов и узлов с индикацией выхода их за допустимые пределы и аварийная автоматическая остановка с учетом обеспечения безопасности (давление в главной масляной магистрали двигателя и в системе принудительной смазки трансмиссии, температура масла в гидросистеме и др.);

– непрерывный контроль параметров (состояний), выход которых за оптимальные пределы (переход в недопустимые состояния) существенно снижает ресурс основных агрегатов и узлов (например, засоренность фильтрующих элементов), с индикацией необходимости изменения режимов работы и/или проведения внеочередного обслуживания «так скоро, как это возможно»;

– учет наработки трактора с момента последнего ТО с индикацией величины допустимой наработки до очередного планового ТО (для заданной периодичности).

Наряду с этим должна быть обеспечена приспособленность конструкции трактора и другой самоходной сельскохозяйственной техники к проведению диагностирования с использованием внешних технических средств для углубленной оценки технического состояния и поиска неисправностей.

Перед началом сезона сельскохозяйственных работ или другого ответственного периода использования рачительный хозяин стремится провести обслуживание и ремонт машины по потребности, с учетом ее фактического технического состояния, выявленного без разборки с помощью встроенных или временно подключаемых средств диагностирования. Немаловажно выяснить, хватит ли оставшегося запаса работоспособности основных агрегатов и узлов для выполнения запланированного объема работ без необходимости их капитального ремонта. Ответ на этот вопрос должен иметь количественное выражение в любом устраивающем пользователя виде: например, в форме указания объема работы (в принятых единицах учета наработки), в течение которого вероятность ресурсного отказа агрегата или узла не превысит заданную, достаточно малую величину (например, 10 %).

Многочисленные исследования, выполненные в период отсутствия БЭС, показали возможность и целесообразность периодического проведения ресурсного диагностирования тракторов с оценкой остаточного ресурса. Наиболее точны прогнозы остаточного ресурса на основе данных о динамике изменения по наработке (реализации) диагностического параметра для конкретного экземпляра машины. По такой реализации может быть получена аппроксимирующая функция, описывающая тенденцию изменения параметра по наработке трактора. Вид такой функции (как правило, степенной) выбирают исходя из результатов специальных исследований по совокупности

наблюдений за партией однотипных машин, а коэффициенты рассчитывают или уточняют по данным о конкретной машине. Также на основе специальных исследований устанавливают взаимосвязь между диагностическим и соответствующим структурным параметрами (например, величиной износа). С помощью технико-экономических расчетов обосновывают предельные и/или допустимые исходя из заданной величины остаточного ресурса значения диагностического параметра с учетом его взаимосвязи со структурным параметром [76, 116].

Наиболее проработаны вопросы ресурсного диагностирования тракторных дизелей по износу деталей цилиндро-поршневой группы (диагностические параметры – снижение герметичности компрессии, возрастание прорыва картерных газов и др.) и увеличению зазоров в подшипниках коленчатого вала (в простейшем варианте – по снижению давления масла в главной масляной магистрали).

Некоторые из диагностических параметров, характеризующих динамику расходования ресурса основных агрегатов и узлов трактора, в соответствии с изложенными требованиями должны непрерывно контролироваться БЭС в целях предотвращения аварийных отказов (например, давление масла в главной масляной магистрали). Однако для решения задач ресурсного диагностирования принципиально важно получать данные о значениях такого параметра с некоторой разумной периодичностью, определяющейся динамикой его изменения по наработке. Кроме того, периодические изменения диагностического параметра (например, того же давления масла), используемого для целей ресурсного диагностирования, должны осуществляться при идентичных или специальных тестовых режимах работы трактора (в рассматриваемом примере – в заданном скоростном и нагрузочном режиме работы двигателя при определенном его тепловом состоянии). Перспективные БЭС должны обеспечивать возможность периодической фиксации или некоторого усреднения непрерывно контролируемых параметров, используемых для ресурсного диагностирования. Следует также обеспечить возможность переноса этой информации во внешнее диагностическое устройство с последующим использованием для прогноза остаточного ресурса наряду с данными, получаемыми внешними контрольно-диагностическими средствами, присоединяемыми к соответствующим точкам.

Оптимизация номенклатуры параметров, хранения их значений и обмена с внешними устройствами

Для оценки технической реализуемости изложенных требований необходимо при использовании БЭС определить структуру аппаратного обеспечения и, главным образом, номенклатуру измеряемых параметров (датчиков), способ организации и емкость памяти, средства обмена информацией с внешними устройствами. Нужны также алгоритмы, по которым текущие значения измеряемых параметров будут пересчитываться в один или несколько показателей, характеризующих величину израсходованного (или остаточного) ресурса.

Маловероятна необходимость и возможность существенного расширения номенклатуры параметров и датчиков для ресурсного диагностирования в сравнении с перечнем известных параметров и режимов работы. Может потребоваться дополнить номенклатуру параметрами, более полно отражающими условия работы машины.

Более сложен вопрос организации необходимой памяти для хранения диагностической информации. По объему поступающей информации рассматриваемая система существенно превзойдет бортовые регистраторы самолетов («черные ящики») – хотя бы потому, что длительность самого дальнего полета несоизмерима с длительностью наблюдения за работой трактора. Кроме того, условия работы трактора отличаются от условий работы самолета гораздо более высокой динамичностью изменения (для трактора они могут иметь частотный состав с полосой до 5 Гц, в то время как в режиме установившегося полета самолета ширина полосы изменения условий не превышает долей 1 Гц). Поэтому для трактора квантование поступающей информации по времени в соответствии с теоремой Котельникова должно происходить не более чем за 30–40 мс. При этом даже один параметр за одну восьмичасовую смену работы трактора при измерении с погрешностью порядка 3 % по пятиразрядному АЦП с учетом не менее чем трехразрядного кодирования даст почти целый мегабайт информации. Организовать запоминающее устройство такой емкости на борту трактора, где весьма проблематично использовать накопители на гибких магнитных дисках или на компакт-дисках с лазерной записью в условиях обычной эксплуатации, будет непросто. В этом направлении можно обратить внимание на накопители на так называемых флеш-дисках, однако и их возможности ограничены.

Для долговременного хранения должны предназначаться не текущие значения измеряемых параметров, а некоторые приведенные или усредненные показатели, обладающие малой динамичностью изме-

нения. Для хранения информации о динамике изменений каждого из таких параметров в течение всего срока службы трактора требуется счетчик не сложнее пятиразрядного десятичного. Наличие подобной информации позволит более просто и эффективно применять разработанные методы прогнозирования остаточного ресурса (индивидуальный прогноз по реализации изменения параметра).

Применение БЭС на мощных сельскохозяйственных и промышленных тракторах открывает и новые возможности решения задачи прогнозирования остаточного ресурса. Как известно, для учета наработки трактора используются счетчики (ч), по существу определяющие суммарное число оборотов коленчатого вала, а в современной электронной аппаратуре – суммарное астрономическое время работы двигателя. И в том, и в другом случае показатель наработки (в т. ч. используемый в качестве аргумента в математических моделях прогнозирования остаточного ресурса) далеко не в полной мере отражает реальный процесс расходования ресурса основных агрегатов и узлов трактора. Разработанные методики ускоренных полигонных испытаний сельскохозяйственных тракторов на надежность обеспечивали коэффициент ускорения (по сравнению с реальной эксплуатацией) не менее 5 по трактору в целом. При этом для ряда агрегатов и узлов коэффициенты ускорения на принятых режимах ускоренных испытаний существенно превышали усредненный коэффициент ускорения по трактору в целом. Поэтому представляет интерес перспектива получения с помощью БЭС информации для расчета некоторой обобщенной характеристики, определяющей процесс расходования ресурса основных агрегатов и узлов конкретного трактора в зависимости от условий его эксплуатации.

Постановка задачи комплексной оценки технического состояния трактора по динамике изменения диагностических параметров с учетом условий использования и режимов работы с помощью бортовой электронной аппаратуры вполне правомерна, однако требует проведения достаточно обширных исследований.

В качестве рабочей гипотезы для оценки динамики расходования ресурса основных агрегатов и узлов предлагается принять принцип регистрации приведенной наработки, в определении которой участвуют параметры, характеризующие режимы работы.

На первом этапе работ целесообразно создание и использование специальной аппаратуры для накопления существенно больших объемов информации и отыскания закономерностей, характери-

зующих процесс расходования ресурса и позволяющих оценить приведенную наработку основных агрегатов и узлов трактора.

Одно из направлений дальнейшего развития изложенного подхода – отыскание способов интерактивного взаимодействия пользователей с бортовой аппаратурой данного назначения.

Учитывая опыт разработки методик ускоренных испытаний тракторов и их основных агрегатов, к числу основных факторов, контролируемых при испытаниях, следует отнести:

- нагрузочный и скоростной режимы работы двигателя, число циклов сброса и набора его нагрузки и частоты вращения;
- продолжительность работы двигателя при неоптимальном тепловом режиме (холодные пуски, перегревы);
- повышенная запыленность воздуха (оцениваемая, например, по наработке до достижения заданной засоренности воздухоочистителя) и продолжительность работы трактора после индикации засоренности фильтрующих элементов;
- отклонения от заданной периодичности ТО;
- некоторая характеристика степени нагруженности ходовой и несущей систем вследствие неровностей почвы и неоптимального скоростного режима движения и др.

При эксплуатации машин с такой аппаратурой можно будет решать задачи уточнения заложенных алгоритмов, а также отыскивать возможности корректировки показателя приведенной наработки при обслуживании или ремонте по потребности (в зависимости от содержания этих действий остаточный ресурс должен возрастать, однако при условии структурированности интерактивного процесса ввода в аппаратуру необходимой информации, отражающей содержание и характер выполненных работ). Зафиксированное скачкообразное улучшение диагностических параметров после проведенного обслуживания или ремонта будет подтверждением их эффективности и может быть использовано для корректировки величины остаточного ресурса. Соотношение приведенной и традиционно определяемой наработок может служить некоторой обобщенной характеристикой условий эксплуатации трактора и его основных агрегатов. Такая характеристика может оказаться полезной для оценки рациональной загрузки трактора и его агрегатирования с различными машинами или использования на тех или иных видах работ, а также для оценки квалификации и добросовестности работы оператора и решения других задач.

Для разработчика трактора такая обобщенная, а тем более дифференцированная, оценка условий реальной эксплуатации также будет представлять несомненный интерес, т. к. позволит выбрать наиболее рациональные решения в ходе проектирования и доводки новых машин.

Изложенный подход к прогнозированию остаточного ресурса по технической сущности достаточно близок к традиционному методу прогнозирования остаточного ресурса конкретной машины по динамике изменения диагностических параметров. Действительно, эта динамика отражает в обобщенном виде индивидуальный процесс расходования ресурса под воздействием комплекса факторов, характеризующих условия работы конкретной машины. В то же время оснащение тракторов БЭС открывает дополнительные возможности индивидуального учета специфических условий работы каждой машины и получения на этой основе более точных прогнозов относительно ее дальнейшей работоспособности. Это позволяет предусмотреть при разработке БЭС возможности решения не только упомянутых типовых задач контроля технического состояния машины и информирования оператора, но и более сложных перспективных задач прогнозирования остаточного ресурса и оценки условий эксплуатации.

3.10. Оптическая эндоскопия полостей узлов и агрегатов

Эндоскопия с помощью соответствующих оптических приборов визуального наблюдения относится к контролю по качественным признакам технического состояния. Однако перед инструментальными методами эндоскопия обладает такими преимуществами, как достоверность контроля грубых и аварийных дефектов; простота средств контроля; оперативность поиска разнообразных неисправностей; возможность выявления неисправностей, не поддающихся инструментальному контролю.

Эндоскопы (греч. *endon* – внутри, *skopeo* – рассматривать) подразделяются на гибкие и жесткие. Фиброскоп, флексоскоп – англоязычные названия гибких эндоскопов (*fiber* – волокно, *flexible* – гибкий). Бороскоп (*borescope*) в иностранной литературе – либо общее название эндоскопов, либо жесткие эндоскопы.

Жесткие эндоскопы (рис. 3.80) предназначены для визуального контроля узлов, к которым возможен прямолинейный доступ, – особенно когда эндоскопический контроль запланирован на стадии проектирования изделия. Жесткие эндоскопы используют для осмотра

полостей машин и механизмов, каналов и труб малого диаметра, полостей отливок, шлифованных и хонингованных отверстий.



Рис. 3.80. Жесткий эндоскоп

Жесткий эндоскоп представляет собой оптическую трубку и состоит из визуальной и осветительной системы. Визуальная система состоит из линзовой, стержневой или градиентной оптики, которая заключена во внутреннюю металлическую трубку. Осветительная система состоит из оптического волокна, расположенного между двумя металлическими трубками – наружной и внутренней.

Жесткие эндоскопы характеризуются четырьмя основными параметрами: диаметром рабочей части, длиной рабочей части, углом направления наблюдения и углом поля зрения.

Не всегда возможен прямой доступ к объекту, или сам объект имеет сложную геометрию. В этом случае для визуального контроля применяют *гибкие эндоскопы* (рис. 3.81).



Рис. 3.81. Гибкий эндоскоп

В гибких эндоскопах визуальная система и система передачи света состоят из волоконной оптики, смонтированной внутри гибкой трубки. Канал для передачи изображения представляет собой линзовый объектив, который строит изображение исследуемого

объекта на торце кабеля. Кабель передачи изображения состоит из большого числа волокон, толщина которых – 10–12 мкм. Расположение торцов волокон на входе кабеля точно соответствует расположению на выходе. Изображение, полученное на конце кабеля, рассматривается через окуляр.

Канал для передачи света представляет собой светорассеивающую линзу, вклеенную в головку прибора, и световолоконный жгут с нерегулярно уложенными волокнами. Конец световолоконного жгута вмонтирован в специальный наконечник, подключающийся к осветителю. Гибкие эндоскопы имеют управляемый дистальный конец, изгибающийся в одной или двух плоскостях – это, как правило, определяется диаметром рабочей части. Обычно в эндоскопах малого диаметра (6 мм и менее) изгиб осуществляется в одной плоскости, а в более крупных – в двух. Угол изгиба в эндоскопах – от 90 до 180°. Эндоскопы могут иметь канал для гибкого инструмента при необходимости осуществления манипуляций (захвата предметов, взятия пробы и т. д.). Обычно гибкие эндоскопы имеют герметичную маслобензостойкую рабочую часть с покрытием из нержавеющей стали.

Основные недостатки гибких эндоскопов – более низкая разрешающая способность по сравнению с жесткими и ограничения по длине, определяемые волокном передачи изображения.

Видеоскопы (рис. 3.82) лишены этих недостатков. Гибкие видеоскопы подобны волоконно-оптическим эндоскопам, однако отличаются от них визуальной системой. Канал для передачи изображения представляет собой линзовый объектив, который строит изображение исследуемого объекта на ПЗС-матрице. Изображение передается по электрическому кабелю в виде электрических сигналов в электронный блок преобразования видеосигнала и выводится на монитор.



Рис. 3.82. Видеоскоп

Основные достоинства видеоскопов:

- высокая разрешающая способность, сравнимая с жесткими эндоскопами;
- сменные объективы, позволяющие производить визуальный контроль объекта с расстояний от 1 мм до нескольких метров;
- длина рабочей части, достигающая 30 м;
- возможность регистрации проводимого обследования на видеомагнитофоне или компьютере и ведения баз данных;
- возможность применения на некоторых моделях систем измерения обнаруженных дефектов.

Основные достоинства эндоскопов:

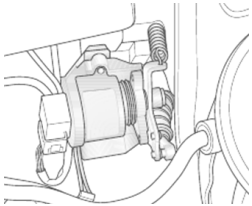
- использование технических эндоскопов для осмотра визуально недоступных частей оборудования позволяет избежать излишней разборки и замены узлов и деталей, а также заранее определить участки, где это будет необходимо, сэкономив тем самым значительные средства и рабочее время;
- освещение осматриваемой поверхности узким ярким лучом света, излучаемого эндоскопом, создает условия для непроизвольной многократной концентрации внимания диагноста на небольшом участке поверхности;
- благодаря малому диаметру эндоскопов их можно вводить в узкие и глубокие промежутки между конструктивными элементами, расширяя и углубляя зону осмотра;
- эндоскопическое обследование можно записать на видеопленку, или, применив цифровой фотоаппарат, создать архив дефектов и контролировать динамику их развития во времени;
- количество выявляемых с помощью эндоскопов дефектов увеличивается в несколько раз по сравнению с традиционными методами;
- внедрение эндоскопов в технологический процесс быстро окупает вложенные средства.

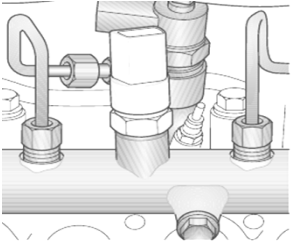
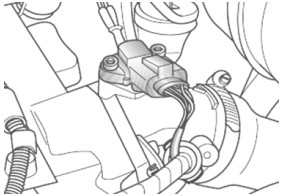
3.11. Портативные микропроцессорные диагностические средства

Развитие электронных диагностических средств определяется уровнем разработки эффективных безразборных диагностических методов, наличием датчиков – преобразователей механических величин в электрические сигналы (табл. 3.17), степенью взаимной приспособленности диагностируемых объектов и измерительных устройств.

Краткая характеристика основных датчиков

Наименование	Место установки	Характеристика
1. Датчик частоты вращения коленчатого вала двигателя	<p style="text-align: center;">Сегментный вырез</p> 	<p>Предназначен для определения частоты вращения коленчатого вала и его точного положения. Информация с датчика используется в блоке управления системой впрыска дизеля для определения угла опережения впрыска и цикловой подачи топлива.</p> <p>При отсутствии сигнала этого датчика работа двигателя невозможна</p>
2. Датчик положения распределительного вала	<p style="text-align: center;">Выступ, определяющий начало отсчета</p> 	<p>Служит для определения положения распределительного вала.</p> <p>Сигнал датчика используется для определения фазы в первом цилиндре двигателя при пуске.</p> <p>При прекращении подачи сигнала с этого датчика двигатель продолжает работать. Блок управления системой впрыска дизеля использует сигналы датчика частоты вращения коленчатого вала. Однако пуск двигателя после его остановки невозможен</p>
3. Датчик массового расхода воздуха		<p>Сигнал датчика используется в блоке управления системой впрыска дизеля при расчете дозы впрыскиваемого топлива.</p>

Наименование	Место установки	Характеристика
		<p>При отсутствии сигнала измерителя массового расхода воздуха блок управления системой впрыска дизеля рассчитывает дозу впрыскиваемого топлива исходя из определенного постоянного значения расхода воздуха на цикл</p>
4. Датчик температуры охлаждающей жидкости		<p>Предназначен для передачи сигнала, соответствующего текущей температуре охлаждающей жидкости, на вход блока управления. Температура охлаждающей жидкости учитывается в блоке управления системой впрыска дизеля в качестве корректирующей величины при расчете дозы впрыскиваемого топлива. При отсутствии сигнала блок управления системой впрыска дизеля производит расчеты исходя из постоянной величины, заменяющей это значение</p>
5. Датчик положения педали акселератора с датчиком перехода на холостой ход		<p>По сигналу датчика блок управления системой впрыска дизеля определяет положение педали акселератора – важнейшую из величин, используемых при расчете подачи топлива. Датчик перехода на холостой ход подает сигнал на блок управления о начале перемещения педали акселератора.</p>

Наименование	Место установки	Характеристика
		<p>При отсутствии сигнала датчика блок управления системой впрыска дизеля не может определить положение педали акселератора.</p> <p>Двигатель переводится на режим холостого хода с повышенной частотой вращения, и водителю предоставляется возможность доехать до мастерской</p>
6. Датчик давления топлива		<p>Служит для измерения давления топлива в контуре высокого давления аккумулятора системы впрыска дизеля. Сигнал используется в блоке управления системой впрыска в качестве одной из величин, влияющих на регулирование давления топлива в аккумуляторе.</p> <p>При отсутствии сигнала датчика работа двигателя невозможна</p>
7. Датчик давления во впускном трубопроводе		<p>Предназначен для измерения текущего давления воздуха во впускном трубопроводе.</p> <p>Сигнал датчика используется в блоке управления системой впрыска дизеля для регулирования давления наддува.</p> <p>При его неисправности процесс регулирования давления наддува прекращается, а мощность двигателя ограничивается</p>

Наименование	Место установки	Характеристика
8. Датчик температуры воздуха во впускном трубопроводе		<p>Измеряет температуру поступающего в двигатель воздуха.</p> <p>Сигнал датчика используется в блоке управления двигателем в качестве величины, по которой корректируется давление наддува с учетом влияния температуры на плотность наддувочного воздуха.</p> <p>При отсутствии сигнала происходит снижение мощности двигателя</p>
9. Высотный датчик	 <p>Высотный датчик</p>	<p>Используется для измерения атмосферного давления в каждый момент времени для коррекции давления наддува.</p> <p>При отсутствии сигнала двигатель на большой высоте склонен к дымлению</p>

Прямые измерения таких параметров, как давление, перемещение, расход, температура, для современного уровня электроизмерительной техники не представляют трудностей, однако связаны со сложностью подключения датчиков, чувствительные элементы которых должны вводиться в полости диагностируемых объектов. Это требует частичной разборки объекта и нарушения нормального функционирования проверяемого узла.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что одним из важнейших средств повышения качества, надежности и экономической эффективности использования машин является применение систем встроенного диагностирования, устраняющих демонтаж и разборку механизмов и агрегатов. Необходимость комплексной безразборной оценки технического состояния машин и механизмов в рабочих условиях выдвигает на передний план именно методы встроенного диагностирования как наиболее чувствительные к различным отклонениям от нормы параметров технического состояния.

Диагностические средства для определения технического состояния электронных систем управления подразделяются на три категории:

1. *Стационарные (стендовые) диагностические системы* подключаются к бортовому электронному блоку управления (ЭБУ) и не зависят от бортовой диагностической системы машины. Эти устройства обычно диагностируют отдельные механизмы двигателя и системы зажигания, их часто называют мотор-тестерами (рис. 3.83).



Рис. 3.83. Мотор-тестер

Основными элементами мотор-тестера являются датчики и блок обработки и индикации результатов измерений воспринимаемых сигналов. Датчики и регистрирующие приборы соединены с кабелями штекерами и зажимами.

Мотор-тестеры выполняются на базе IBM-совместимых компьютеров, имеют клавиатуру, дисплей, дисководы, привод CD-ROM. В комплект обычно входят набор соединительных проводов и кабелей, стробоскоп, а в отдельных случаях и газоанализатор ОГ. Информация вводится в компьютер с помощью автомобильного анализатора, в котором размещены аналого-цифровые преобразователи, компараторы, усилители и другие устройства предварительной обработки измерительных сигналов. Анализатор подключается к необходимым элементам на автомобиле с помощью комплекта кабелей. Как правило, это один и тот же набор проводов независимо от производителя, подключенных к минусу и плюсу аккумулятора, катушки зажигания, а также высоковольтный провод к катушке зажигания, к свече первого цилиндра, бесконтактный датчик тока на шине питания от аккумулятора, датчик температуры масла в двигателе (вставляется вместо щупа), датчик разрежения во впускном коллекторе и т. д.

Основная часть мотор-тестера – осциллоскоп, на экране которого появляются различные осциллограммы, отражающие режим работы и техническое состояние проверяемых деталей и приборов системы зажигания. Оценка сигнала, появляющегося на экране осциллоскопа, основывается на изменении при наличии неисправностей характера электрических процессов, протекающих в цепях низкого и высокого напряжения. По отдельным частям изображения можно судить о работе некоторых элементов систем питания и зажигания, а характер изменения позволяет выявить причины неисправностей.

Компьютер мотор-тестера обрабатывает информацию, полученную от двигателя, и отображает результаты на дисплее или предоставляет в виде распечатки на принтере. С мотор-тестером может поставляться комплект лазерных компакт-дисков с сервисной информацией о различных моделях машин и с инструкциями электромеханику-оператору, как подключать мотор-тестер к машине, какие кабели использовать.

Перед проведением диагностики следует указать (набрать на клавиатуре мотор-тестера) модель машины, тип двигателя, трансмиссии, системы зажигания, впрыска топлива и другие опции,

которые реализованы на данной машине. Мотор-тестер способен диагностировать большинство систем, включая системы пуска, электроснабжения, зажигания, определять компрессию в цилиндрах, измерять параметры системы приготовления топливовоздушной смеси.

Современные мотор-тестеры могут выдавать информацию о состоянии системы зажигания в виде цифр – осциллограммы процесса. Примером служит мотор-тестер МЗ-2 (Беларусь), с помощью которого можно определять состояние двигателя (по развиваемой мощности, балансу мощности по цилиндрам, относительной компрессии), стартера, генератора, реле-регулятора, аккумулятора, прерывателя-распределителя, электропроводов, свечей зажигания, лямбда-зонда, форсунок системы впрыска бензиновых двигателей, дизельной топливной аппаратуры, устанавливать углы опережения зажигания для бензиновых двигателей и впрыска для дизельных двигателей с помощью стробоскопа.

По мере усложнения электроники расширяются и функциональные возможности стационарных систем, т. к. необходимо диагностировать не только управление двигателем, но и тормозные системы, активную подвеску и т. д.

Универсальность компьютерных мотор-тестеров определяется их программным обеспечением. Многие модели компьютерных мотор-тестеров работают в привычной большинству пользователей операционной системе Windows.

Мотор-тестеры полезны при обнаружении неисправностей в топливной системе, системе зажигания, но с их помощью трудно обнаружить непостоянные неисправности в сложных электронных системах. Во многих случаях неисправность в одной системе проявляется в виде симптомов в других системах, связанных с первой.

2. Бортовое диагностическое программное обеспечение, которое позволяет индцировать неисправности соответствующими кодами. Системы программного обеспечения автомобилей начиная с 80-х гг. обеспечиваются функцией считывания кодов неисправностей с помощью контрольной лампы Check Engine («Проверь двигатель»).

3. Бортовое диагностическое программное обеспечение, для доступа к которому требуется специальное дополнительное диагностическое устройство. Считывание информации с такого программного обеспечения осуществляется с помощью специальных устройств – сканеров. Контролируемые параметры и коды неисправностей считываются непосредственно с ЭБУ и интерпретируются специалистами сервиса.

Сканером, или сканирующим прибором (рис. 3.84), называют портативные компьютерные тестеры, обычно с дисплеем на жидких кристаллах, служащие для диагностирования различных электронных систем управления посредством считывания цифровой информации с диагностического разъема машины.

Сканер имеет небольшой по размеру дисплей, просматривать данные на котором не всегда удобно, даже при использовании прокрутки кадра. Обычно имеется возможность подключить сканер к персональному компьютеру через последовательный порт для передачи данных. Специальное программное обеспечение позволяет просматривать данные со сканера в табличном и графическом виде на мониторе компьютера, сохранять их, создавать базы данных по обслуживаемым машинам.

Сканеры различаются своими функциональными возможностями и спектром тестируемых машин.



Рис. 3.84. Программируемый сканер DST-2M (Россия) без персонального компьютера

Наиболее широкими возможностями обладают специализированные сканеры, используемые для диагностирования только одной марки машин. Их применение вследствие узкой специализации ограничивается отдельными предприятиями сервиса, обслуживающими машины конкретных моделей. Более широкое распространение получили сканеры, предназначенные для диагностирования систем впрыска и других механизмов, агрегатов и систем машин различных моделей.

Существуют программы для персональных компьютеров, позволяющие вводить информацию через последовательный порт с диаг-

ностического разъема при наличии соответствующего соединительного кабеля. Персональный компьютер в таком случае выполняет функции сканера. Информацию удобнее считывать с монитора компьютера, чем с маленького дисплея сканера. При использовании персонального компьютера нет необходимости иметь комплект программных картриджей, т. к. емкость жесткого диска компьютера позволяет хранить на нем все необходимые программы. С другой стороны, персональный компьютер не приспособлен к работе в дороге или в тяжелых условиях авторемонтной мастерской. На практике используются как сканеры в виде отдельных устройств, так и сканеры на основе персональных компьютеров.

Система самодиагностики непрерывно сравнивает текущие величины сигналов с эталонными значениями в памяти устройства. Кроме того, она отслеживает реакцию исполнительных механизмов (например, датчика скорости вращения колесе при оборудовании техники антиблокировочной системой (АБС)). Любые несоответствия параметров эталонным расцениваются как неисправность. Каждой присвоен свой код. Ранние системы умели определить и запомнить 10–15 кодов, современные же хранят до нескольких сотен кодов, относящихся не только к двигателю, но и к автоматической коробке передач, АБС, подушкам безопасности, климат-контролю и т. д.

В некоторых устройствах самодиагностика позволяет корректировать угол опережения зажигания, а на машинах без нейтрализатора – регулировать уровень СО в ОГ. На новых моделях реализовано так называемое тестовое диагностирование: сигналы подаются в определенный момент времени с последующей проверкой датчиков и исполнительных элементов.

Сканер проверяет входные и выходные параметры электрических цепей и информирует оператора об их величине. Таким образом, сканер лишь фиксирует наличие или отсутствие неисправностей в каком-либо узле, но не позволяет определять их причины, которых может быть много для одних и тех же значений контролируемых параметров.

По способу хранения информации аппаратные сканеры делятся на картридные и программируемые. Первым для приведения в рабочее состояние необходим картридж с диагностическим кабелем, соответствующим проверяемой модели техники. Комплект сканера состоит из трех основных частей: самого сканера, сменных картриджей и соединительных кабелей, предназначенных для присоединения к диагностическому разъему проверяемой машины.

Каждый картридж предназначен для работы со своим типом контроллера («Джи-Эм», «Бош», «Январь» и т. д.).

Этого недостатка лишены программируемые сканеры. Их встроенную память (Flash-память) можно многократно перепрограммировать с помощью персонального компьютера. Устаревшие версии программного обеспечения можно обновить через Интернет или компакт-диск. Аппаратные сканеры хорошо приспособлены к эксплуатации в условиях автосервиса и позволяют диагностировать системы движущейся машины.

Более информативными являются сканеры, соединенные с персональным компьютером. Для согласования данных, получаемых с контроллера компьютером, используется адаптер (рис. 3.85).

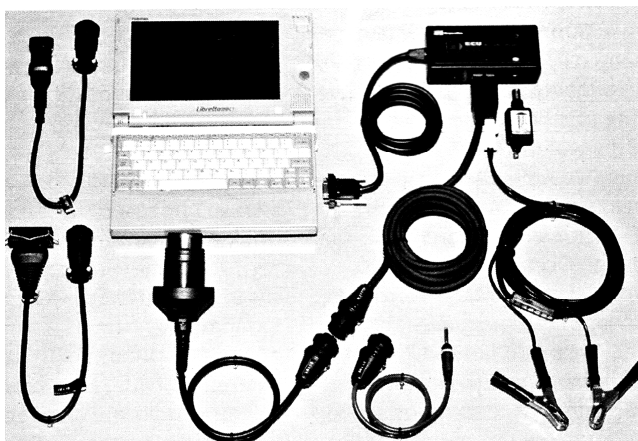


Рис. 3.85. Программируемый сканер с персональным компьютером

В Республике Беларусь наибольшее распространение получили сканеры KST-300 и KST-500/520 фирмы «Бош», используемые с персональным компьютером, а также сканеры ДСТ-2, ДСТ-10-Кф (Россия) и др. Начато производство сканеров белорусского производства.

Сканеры имеют несколько режимов работы. В режиме «Ошибки» на экране высвечиваются цифровые коды той или иной неисправности, хранящиеся в памяти контроллера машины. Режим «Параметры» позволяет оценить работу двигателя при движении машины: напряжение в бортовой сети, детонацию, частоту вращения коленчатого вала, состав смеси, скорость движения и т. д. Для просмотра изменения параметров работы двигателя в динамике пре-

дусмотрен режим «Сбор данных». Некоторые сканеры, например KST-520 фирмы «Бош», для наблюдения за процессами работы системы впрыска и других систем в динамике могут выдавать графическое изображение сигналов на экране, т. е. позволяют оценить их визуально. Возможности сканеров при проверке системы впрыска конкретной машины определяются диагностическими функциями блока управления данной машины, однако, как правило, все сканеры считывают и стирают коды отказов, выводят цифровые параметры в реальном времени, управляют некоторыми исполнительными механизмами (форсунками, реле, соленоидами).

Сканер подключается через специальный разъем к конкретному ЭБУ или ко всей электронной системе.

В Республике Беларусь нашел широкое применение переносной диагностический прибор Pro-Link 9000, изготавливаемый компанией MPSI (Micro Processor Systems, Inc.; USA). Он предназначен для проведения работ по диагностированию электронных систем управления различных мобильных машин, трансмиссий, двигателей.

Диагностический прибор Pro-Link 9000 (Pro-Link 9000 Plus) позволяет диагностировать электронную систему управления двигателя International DTA 530E (I-308)/DDC S40E/Detroit Diesel S40E. Сервисное обслуживание, технические консультации, обеспечение запасными частями и диагностическим оборудованием двигателя International DTA 530E (I-308)/DDC S40E на территории Республики Беларусь осуществляет СП ООО «Вестерн Технолоджиз».

Считывание диагностических кодов. Коды неисправностей могут быть считаны двумя способами. Первый – для уходящих в прошлое систем самодиагностики: светодиодным пробником, подключаемым к диагностической колодке. Расшифровка кодов приводится в руководстве по ремонту. Второй способ, современный, – получение кодов сканером. Некоторые подобные приборы не только извлекают коды ошибок, но и расшифровывают их.

Для предупреждения водителя о неисправности загорается контрольная лампа. После включения зажигания лампа горит в течение 3 с, а затем должна погаснуть. Если лампа не гаснет, это свидетельствует о неисправности системы управления, поэтому следует проверить системы управления по определенным кодам. Коды неисправностей условно делят на «медленные» и «быстрые».

«Медленные» коды. При обнаружении неисправности ее код заносится в память и включается лампа Check Engine на панели приборов. Выяснить, какой это код, можно одним из следующих способов в зависимости от конкретной реализации ЭБУ:

- светодиод на корпусе ЭБУ периодически вспыхивает и гаснет, передавая таким образом информацию о коде неисправности;
- с помощью проводника соединяют определенные клеммы диагностического разъема или замыкают определенную клемму разъема на «массу» и включают зажигание – лампа Check Engine начинает периодически мигать, передавая информацию о коде неисправности;
- светодиод или аналоговый вольтметр подключают к определенным контактам диагностического разъема и по вспышкам светодиода или колебаниям стрелки вольтметра получают информацию о коде неисправности. Так как «медленные» коды предназначены для визуального считывания, частота их передачи очень низкая (около 1 Гц), объем передаваемой информации мал.

Коды обычно выдаются в виде повторяющейся последовательности вспышек. Код содержит несколько цифр, смысловое значение которых расшифровывается по таблице неисправностей, входящей в состав эксплуатационных документов машины. Длинными вспышками (1,5–2,5 с) передается старшая неисправность (первая); короткими (0,5–0,6 с) – младшая (вторая).

Пример высвечивания кода «1–3–1–2», соответствующего неисправности электронной форсунки впрыска первого цилиндра двигателя, приведен на рис. 3.86.

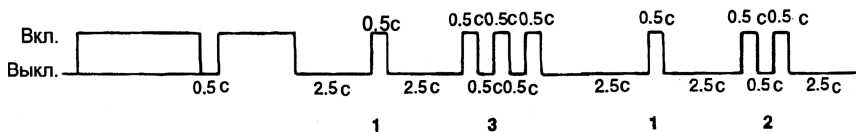


Рис. 3.86. Пример высвечивания кода неисправности

После обнаружения неисправности ее необходимо локализовать, т. е. выяснить, что отказало: сам датчик, разъем, проводка, крепление и т. д.

«Медленные» коды просты, надежны, не требуют дорогостоящего диагностического оборудования, но малоинформативны.

«Быстрые» коды обеспечивают выборку из памяти ЭБУ большого объема информации через последовательный интерфейс. Этот интерфейс и диагностический разъем используются при проверке и настройке на заводе-изготовителе и при диагностировании.

Наличие диагностического разъема позволяет, не нарушая целостности электропроводки технического средства, получать диагностическую информацию от различных систем машины (двигатель, АБС, трансмиссия, подвеска и т. д.) с помощью сканера или мотор-тестера.

3.12. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей

Современные машины и их двигатели отличаются улучшенными эксплуатационными свойствами (повышенными скоростями движения, надежностью работы агрегатов и систем, экономичностью и т. д.). Улучшение эксплуатационных характеристик машин привело к усложнению их конструкции, повышению точности изготовления деталей и их сборки [109, 116]. Именно поэтому ранее существующие способы и методы контроля технического состояния двигателя сегодня не могут в полной мере удовлетворить техническую службу предприятий, т. к. необходимы современные диагностические комплексы, а также методики комплексного диагностирования. Качественное определение технического состояния узлов, агрегатов и систем современных двигателей возможно только при условии применения высокопроизводительного специализированного диагностического оборудования и современных методов контроля, обеспечивающих получение достоверных результатов.

Основные механические, молекулярные и электродинамические процессы, протекающие в системах, узлах и механизмах дизельных двигателей, сопровождаются излучением спектра частот, как правило звукового (в т. ч. и прилегающих к нему инфра- и ультразвука) и теплового диапазонов. Анализ сигналов дизельной аппаратуры в указанных частотных диапазонах позволяет в реальном времени проводить ее контроль и диагностику, судить о текущем состоянии, оценивать остаточный ресурс отдельных узлов и элементов.

Виброакустический и тепловой контроль осуществляются как контактными, так и бесконтактными способами. В первом случае уровень вибрации и распределение температурного поля измеряются

вибродатчиками (акселерометрами и гироскопами) и датчиками температуры в местах непосредственного съема данных. Второй (бесконтактный) вариант подразумевает получение звуковых сигналов с помощью распределенной системы микрофонов и измерение температуры посредством тепловизионных камер (цифровых болометров), установленных дистанционно [106]. Бесконтактный контроль незаменим во время диагностики внутренних и труднодоступных внешних узлов в течение их работы, без остановки дизеля. Объединение контактных и бесконтактных способов формирует целостную картину пространственно-временного распределения звукового давления и температуры отдельных узлов и механизмов при работе дизельного двигателя в масштабе реального времени.

Современный уровень развития микропроцессорной и сенсорной техники способствует разработке недорогой многоканальной системы диагностики дизельных двигателей на базе интегрирования виброакустического и тепловизионного каналов. Поэтому необходимо обосновать архитектуру интегрированной системы виброакустической и тепловой диагностики, позволяющей в дальнейшем оценивать остаточный ресурс систем, узлов и механизмов дизельных двигателей в масштабе реального времени.

Предлагаемая архитектура многоканальной системы представлена на рис. 3.87. Центральный ее блок – современный микроконтроллер STM32F407VGT6 с ядром ARM Cortex-M4. Микроконтроллер имеет в составе все базовые интерфейсы связи (I2C, SPI, I2S, UART/USART, 1-WIRE), присущие цифровым акселерометрам, гироскопам, датчикам температуры, тепловым сенсорам, и как минимум по два порта каждого интерфейса [105]. Кроме того, благодаря блоку прямого доступа к памяти DMA, позволяющему конвейеризировать процессы управления периферией, на его основе в связке с таймерами общего назначения можно дополнительно построить высокоскоростные программные интерфейсы, например SWSPI (Software SPI), и значительно расширить аппаратную периферию системы. Для ускорения работы с вещественными числами и быстрого автоматизированного анализа массивов данных в ядро ARM Cortex-M4 встроен сопроцессор плавающей точки.

Считанные с датчиков отсчеты поступают на микроконтроллер с модуля данных, структура которого приведена на рис. 3.88. Модулем данных интегрируются:

- контактный датчик DS18B20 температуры с выходным интерфейсом 1-WIRE;
- вибродатчик MPU6050 и тепловой сенсор AMG8833 разрешением 8×8 пикселей с интерфейсом I2C;
- MEMS-микрофон с частотно-импульсно модулированным выходным сигналом, передаваемым по шине I2S;
- тепловизионный сенсор Lepton FLIR разрешением 160×120 пикселей с интерфейсами I2C для настройки и SPI для передачи кадров в формате VoSPI [105].

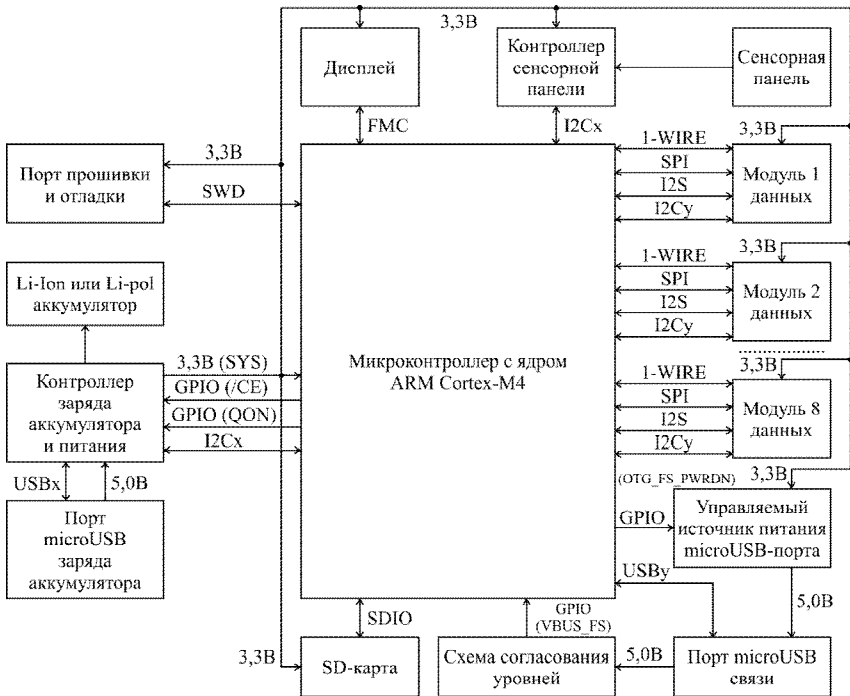


Рис. 3.87. Архитектура многоканальной системы виброакустической и тепловой диагностики дизельной аппаратуры

К шине 1-WIRE могут одновременно подключаться несколько десятков датчиков, измеряющих температуру контактным способом и формирующих короткие информационные пакеты длительностью порядка 1 мс на стандартно невысокой скорости 15,4 кбит/с. Этого достаточно для получения выборок температурных данных

с периодом 500 мс от каждого датчика, поэтому шина 1-WIRE в системе единственная.

Основной нагрузкой для шины I2C выступают контактный модуль MPU6050 датчиков вибрации и бесконтактный тепловой сенсор AMG8833. Бесконтактный тепловизор KIT-14654 на базе Lepton FLIR изредка использует интерфейс I2C, обращаясь к нему лишь в моменты изменения режима работы сенсора тепловизора.

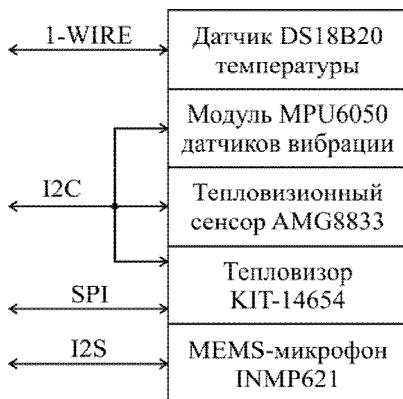


Рис. 3.88. Структура модуля данных

В обобщенную транзакцию взаимодействия с модулем MPU6050, состоящего из MEMS-акселерометра и гироскопа, входят 4 байта пакетов данных акселерометра и 4 байта пакетов данных гироскопа. Для высокоскоростного режима функционирования шины I2C, обеспечивающего обмен между ведущим микроконтроллером и ведомым модулем MPU6050 со скоростью 400 кбит/с, отдельные транзакции, имеющие длину 4 байта, длятся не более 90 мкс, что соответствует частоте считывания данных 11,1 кГц. Предельные же частоты дискретизации для гироскопа и акселерометра равны соответственно 30 кГц (что существенно выше 11,1 кГц) и 1 кГц [105]. Поэтому в работе с гироскопом модуля MPU6050 обеспечивается избирательность функционирования пользовательского интерфейса системы – прием данных только от одного из датчиков (либо акселерометра, либо гироскопа) в пакетном режиме, позволяющем считывать их с частотой до 44,4 кГц, приемлемой и для акселерометра, и и для гироскопа.

Тепловой сенсор AMG8833 разрешением 8×8 пикселей предназначен для бесконтактного дистанционного считывания распределения тепла в объекте исследования и способен передавать поток видеоданных с частотой 10 кадр/с. Так как отдельный кадр в AMG8833 представлен 64-элементной матрицей общим размером немногим более 128 байт, указанная кадровая частота соответствует относительно невысокой скорости шины I2C, равной 12 кбит/с. При работе I2C на стандартной скорости 100 кбит/с в паузе между кадрами AMG8833 можно формировать совместные выборки от акселерометра и гироскопа модуля MPU6050 с целью их накопления, последующего анализа и принятия решений.

Тепловизор KIT-14654, связанный с центральным микроконтроллером отдельным интерфейсом SPI, тактируется меандром частотой в диапазоне от 10 до 24 МГц. Он обеспечивает передачу кадров разрешением 160×120 пикселей в формате VoSPI со скоростью 26 кадр/с. Каждый двухбайтный яркостный элемент кадра тепловизора кодируется в оттенках серого и таблично преобразуется программой микроконтроллера в цветной формат путем применения палитры Rainbow или Colormap [106].

Цифровой миниатюрный MEMS-микрофон INMP621, считывающий сигналы звукового давления работающей дизельной аппаратуры, передает центральному микроконтроллеру результирующий битовый поток аудиоданных в PDM-формате по интерфейсу I2S. Однобитная импульсно-плотностная (PDM) модуляция получила широкое распространение в электронике и цифровой обработке сигналов благодаря высокому быстродействию технических решений, ее реализующих, помехоустойчивости, соотношению «сигнал–шум», простоте схемотехнической реализации с единственной линией данных [105]. PDM-формат повсеместно используется при генерации и обработке аудиосигналов, поддерживается микрофоном INMP621.

Пользовательский интерфейс контроля и управления системой диагностики дизельной аппаратуры (см. рис. 3.87) представлен дисплейным модулем, взаимодействующим с центральным микроконтроллером по интерфейсу FMC (Flexible Memory Controller), и сенсорной панелью, управляемой по шине I2C.

В предлагаемой архитектуре присутствуют две независимые шины – I2Cx и I2Cy. К одной из них (I2Cx) подключен контроллер устройства ввода пользовательских данных (сенсорной панели)

и контроллер заряда аккумуляторной батареи. Вторая шина (I2C₂) служит для подключения модулей данных – датчиков вибрации и тепловых сенсоров.

Полученные выборки, массивы данных, файлы могут быть сохранены для последующего анализа на SD-карту, соединенную с центральным микроконтроллером интерфейсом SDIO, либо на внешний USB-накопитель, подключенный к системной шине USBу через microUSB-порт связи посредством переходного OTG-кабеля.

Благодаря управляемости источника питания USB-порта связи система может выступать как «ведущим» USB HOST (для подключения к ней стандартных внешних носителей информации), так и «ведомым» USB DEVICE (для связи с компьютером и передачи ему накопленных файлов и выборок). Во втором случае центральный микроконтроллер, приняв высокий уровень напряжения на линии питания USBу при VBUS_FS = 1 (см. рис. 3.87), посредством сигнала OTG_FS_PWRDN оставляет выключенным управляемый источник питания microUSB-порта, т. е. повышающий преобразователь напряжения «3,3 В → 5,0 В». Схема согласования уровней при этом служит для понижения входного, стандартного для USB-шины, напряжения 5,0 В до значения 3,3 В, являющегося рабочим для центрального микроконтроллера и, соответственно, номинальным для его портов ввода-вывода. В роли «ведущего» центральный микроконтроллер путем управления линией OTG_FS_PWRDN и, в свою очередь, повышающим источником «3,3 В → 5,0 В» подает 5,0 В на microUSB-порт связи, позволяя запитать таким образом внешнее устройство, в частности USB FLASH-диск, с целью записи в него данных, следующих по шине USBу.

Питание системы осуществляется как от внешнего источника (компьютера или батареи типа Power Bank) через порт microUSB заряда аккумулятора (см. рис. 3.87), так и автономно – от внутренней литий-ионной (Li-Ion) или литий-полимерной (Li-pol) аккумуляторной батареи. Рабочее напряжение блоков и модулей системы составляет 3,3 В. За преобразование входного напряжения в диапазоне 2,5–5,0 В в напряжение 3,3 В, контроль и стабилизацию питания отвечает контроллер заряда аккумулятора и питания. В частном случае в качестве него может выступать микросхема BQ24295, способная управлять зарядом аккумуляторной батареи и передавать параметры текущего ее состояния (ток и уровень заряда, напряжение

на аккумуляторе, температуру окружающей среды) центральному микроконтроллеру по шине I2C. Контроль питания системы предусмотрен и извне, например с помощью компьютера, подключенного к шине USBx, путем считывания параметров состояния аккумуляторной батареи из контроллера заряда аккумулятора и питания.

Стандартизированный порт SWD прошивки и отладки предназначен для обновления программного обеспечения и внутрисхемной пошаговой отладки работы центрального микроконтроллера и функционирования системы в целом.

Таким образом, предложена архитектура интегрированной многоканальной системы диагностирования дизельной аппаратуры, объединяющей до восьми универсальных модулей данных, состоящих из виброакустических и тепловых датчиков. Система полностью цифровая, с управляемой частотой тактирования ядра микроконтроллера до 216 МГц, повышенной помехоустойчивостью каналов связи и оптимальным соотношением стоимости к вычислительной способности.

Обоснованы базовые интерфейсы взаимодействия центрального микроконтроллера системы с модулем данных: I2Cu, функционирующий в высокоскоростном режиме 400 кбит/с (в отличие от I2Cx, для которого достаточно стандартной скорости 100 кбит/с), 1-WIRE, SPI и I2S. Благодаря MEMS-технологии, применяемой в изготовлении виброакустических датчиков, модуль данных имеет миниатюрные размеры, а система в целом характеризуется портативностью и автономностью [105].

Система позволяет диагностировать неисправности и вычислять остаточный ресурс узлов дизельной аппаратуры в масштабе реального времени, параллельно отображая на дисплее динамику изменения сигналов (спектрограммы и/или скейлограммы), обрабатывая пользовательские запросы и формируя протокол изменения картины состояния дизеля на SD-карте или внешних USB-носителях информации.

4. ХИММОТОЛОГИЧЕСКИЙ И ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

4.1. Необходимость организации контроля моторных масел при техническом обслуживании тракторов и самоходной сельскохозяйственной техники

Показатели рабочих свойств моторных масел являются комплексными диагностическими признаками для выявления неисправностей ДВС, повышения интенсивности их изнашивания, а отчасти и выявления причин ухудшения их рабочих процессов. Кроме того, показатели состояния масла позволяют точнее установить периодичность ТО ДВС, заметно повысить надежность и срок их службы, снизить затраты труда и средств на техническую эксплуатацию машин.

Так, по данным НАТИ, диагностирование по показателям рабочих свойств масел позволяет на 40 % увеличить межремонтный срок службы агрегатов МТП, на 10 % снизить затраты на текущий ремонт, на 11 % сократить расход запасных частей, на 6 % уменьшить расход топлива и вдвое сократить время простоя машин из-за отказов дизелей. Правильный подбор смазок позволяет повысить долговечность подшипников качения, по данным ИМАШ РАН, в 2–8 раз, зубчатых передач – в 1,5–5 раз. Переход на качественные масла позволил увеличить доремонтный ресурс дизелей карьерного автотранспорта от 15–17 до 50–60 тыс. ч.

Таким образом, смазочное действие является одним из важных способов управления долговечностью и работоспособностью агрегатов машин, поэтому все отрасли нуждаются в качественных ТСМ и в рекомендации по их рациональному применению. В связи с этим важным является совершенствование методов контроля смазок и обоснование нормативов их нормального состояния.

В соответствии со схемой (рис. 4.1) факторами управления трением, изнашиванием долговечностью и надежностью узлов трения при их рациональном смазывании являются:

- 1) обеспечение смазкой оптимального динамического равновесия разрушения и восстановления поверхностей трения;
- 2) расширение подбором оптимальных смазок нагрузочно-скоростного режима окислительного износа в узлах трения;
- 3) минимизация смазками интенсивности окислительного изнашивания;
- 4) оптимизация нагрузок и сил трения для используемых смазок;
- 5) применение в смазках окислителей поверхностей пар трения;

- 6) применение в смазках ПАВ для реализации эффекта академика П. А. Ребиндера;
- 7) особое введение в смазки антиокислителей;
- 8) введение органических маслорастворимых соединений S, P, Cl для модифицирования поверхностей трения;
- 9) использование смазок с малым модулем сдвига;
- 10) введение в масла полимочевины с содержанием NH_4OH для модифицирования поверхностей трения.

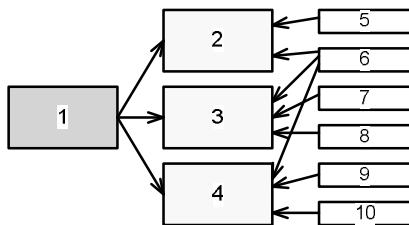


Рис. 4.1. Схема управления трением, изнашиванием, долговечностью и работо-способностью узлов трения через смазочное действие по Б. И. Костецкому [58]

Широко апробированы и новые нетрадиционные приемы:

- ввод в масла смазки серпентировых трибосоставов, позволяющих существенно увеличить ресурс новых и в особенности изношенных узлов;
- ввод в масла электрических зарядов и ионов мягких металлов;
- совместное использование серпентировых трибосоставов и эмиссии в масла электрических зарядов и ионов мягких металлов.

Эти рекомендации актуальны для всей техники, работающей с жидкими смазочными материалами и пластичными смазками, а их реализацию и контроль моторных и трансмиссионных масел следует осуществлять и при технической эксплуатации МТП в АПК.

К моторным маслам предъявляют следующие требования:

- обеспечивать малую интенсивность углеродистых отложений в ЦПГ и на деталях очистки масла без закоксовывания поршневых колец, дренажных отверстий поршня и маслосъемных колец;
- сольубилизовать продукты окисления и полимеризации компонентов масел;
- обладать высокими антиизносными, антизадирными, антикоррозионными и защитными свойствами;
- снижать механические потери и, соответственно, расход топлива;
- быть совместимыми при смешивании в пределах одной классификационной группы с различными композициями присадок;

- иметь низкую испаряемость, незначительный угар и унос с газами;
- нейтрализовать кислые продукты сгорания сернистого топлива и окисления масла, обуславливающих коррозию подшипников ДВС по свинцу и меди.

Эти требования являются основой для классификационных испытаний моторных масел по оценке их рабочих (моторных) свойств. Основными показателями для установления периодичности смены масел стали степень нагарообразования в ЦПГ по балльной оценке закоксованности и потери подвижности поршневых колец, а также износ основных деталей ДВС, т. к. показатели износа для оценки современных масел уже не стоят на первом месте.

Вместе с тем стандартный комплекс методов контроля работавших масел, особенно антиизносных свойств для автотракторной техники в АПК, до сих пор четко не определен, поэтому приемы контроля работавших масел подбираются организациями АПК самостоятельно. Нет и стандартизованного комплекса нормативов состояния работавших масел, по которым следует диагностировать агрегаты МТП и определять необходимость смены масел. Имеются лишь ведомственные нормативы и разные комплексы методов и критериев оценки старения масел по интенсивности окисления, истощению диспергирующих и нейтрализующих свойств, дисперсности нерастворимого осадка. Полнота и качество таких нормативов особенно важны для обслуживания импортной сельскохозяйственной техники, где предельные и допускаемые значения параметров необходимо устанавливать для конкретных масел и условий их работы.

В старении моторных масел, углеводородная основа которых изменяется несущественно, главным является уменьшение концентрации и эффективности присадок, а значит, снижение моюще-диспергирующих, антиизносных, нейтрализующих и антикоррозионных свойств масел.

Под моющими свойствами моторных масел понимают их способность уменьшать нагароотложения на деталях ДВС и длительное время сохранять их чистыми. Главная функция моюще-диспергирующих присадок – диспергировать крупные частицы загрязнений, переводить их в мелкодисперсный вид и удерживать во взвешенном состоянии без осаждения на деталях ДВС. Эта функция зависит от концентрации и активности присадок, косвенно характеризуемых начальным и предельным уровнем щелочного числа (ЩЧ) масла (рис. 4.2, 4.3).

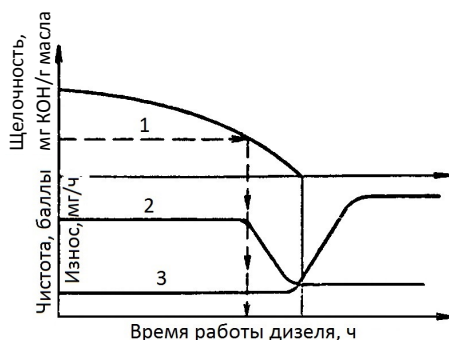


Рис. 4.2. График зависимости нагаро-лакообразования в ЦПГ и ее износа от уровня щелочного числа моторных масел по НАМИ [2]:
 1 – критический уровень ЩЧ; 2 – степень чистоты поршня (грязный – 0 баллов); 3 – скорость изнашивания

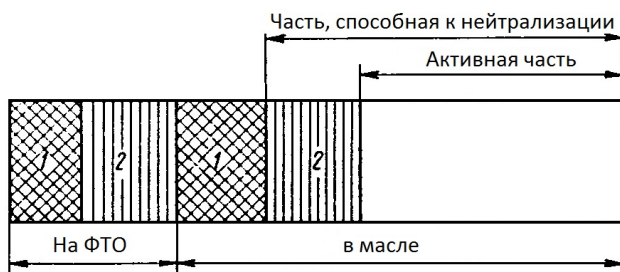


Рис. 4.3. Соотношения между активной, частично активной и сработавшейся частями присадок со щелочным числом масла (по данным НАТИ):
 1 – полностью сработавшаяся часть присадок; 2 – частично сработавшаяся, но способная к нейтрализации кислых компонентов масла

Для нефорсированных тракторных дизелей в НАТИ и на моторных заводах ранее устанавливали низкие пределы снижения щелочного числа (от 5–7 до 1,5–2,5 мг КОН/г), т. к. нагароотложение на поршнях этих дизелей с их невысокой надежностью не было решающим. Для современных же высокофорсированных и высокоизносостойких дизелей (ЯМЗ-840, Д-245, Д-260, КамАЗ-740 и особенно импортных) требуется более эффективная защита с соответствующим уровнем моющих и других свойств масла, т. е. ЩЧ в свежих маслах должно быть не ниже 8, а в работающих – не ниже 3,5–4,0 мг КОН/г.

Срабатывание присадок в масле вначале идет интенсивно, но постепенно затухает. Вначале присадки с высокой щелочностью активно взаимодействуют с поверхностями деталей ДВС, а по мере снижения щелочности их активность падает. С большим содержанием серы в топливе срабатывание присадок значительнее, а моющие присадки, адсорбируясь на продуктах окисления и загрязнения масла, удаляются фильтрами и центробежными очистителями вместе с загрязнениями.

Снижение щелочного числа (ЩЧ или TBN) и pH (от 12 до 4, рис. 4.4) указывает на полное срабатывание моюще-диспергирующих присадок, а увеличение кислотного числа (КЧ или TAN) от 0,5 до 1,5–2,5 мг КОН/г служит как показателем окисления масла, так и полного разложения присадок, когда естественно ухудшаются противоизносные и противозадирные свойства масел. Об этом можно судить по данным комплекса химмотологических анализов, а в условиях эксплуатации – по результатам бумажной хроматографии по ГОСТ 28365 (СТ СЭВ 6397–88).



Рис. 4.4. Схема соотношений между кислотными и щелочными уровнями присадок в маслах [2]

Бумажная хроматография для экспресс-оценки моюще-диспергирующих или диспергирующе-стабилизирующих свойств (ДСС) моторных масел особенно практична для условий эксплуатации машин во всех отраслях, т. к. эти свойства характеризуются размерами нерастворимых частиц загрязнений, преобладающих в маслах. Вместе с тем в бумажной хроматографии («капельной пробе») используется именно различие проникающей способности в поры фильтровальной бумаги (ГОСТ 12026–76) частиц с различными размерами. Чем больше частиц, сопоставимых с размером пор в бумаге и превышающих его, тем незначительнее их проникновение в бумагу и тем меньше размер масляного пятна. Если же частицы

намного превышают размер пор или скоагулированы в шлам, то капля масла на бумаге не растекается вообще.

Появление в масле частиц размером более 3 мкм свидетельствует о потере присадками ДСС, а преобладание частиц размером 0,1–0,5 мкм – об их эффективной работе. Поэтому в высококачественных маслах к сроку их смены может содержаться до 6 % высокодисперсных нерастворимых загрязнений.

Изложенное подтверждает целесообразность и обоснованность применения бумажной хроматографии («капельной пробы») для экспресс-контроля масел агрегатов МТП АПК, введенной в 80-е гг. в руководства по эксплуатации транспортных и судовых дизелей, в ОСТ 10 2.25–87, замененный стандартом СТО АИСТ 2.25–2010.

4.2. Технологические приемы эксплуатационного контроля моторных масел и их реализация для ТО и ремонта ДВС

Рабочие свойства масел в большей мере определяются составом и концентрацией присадок и добавок. При неоптимальном составе, несоответствующих присадках и добавках, загрязнении, обводнении смазочные масла, являясь третьим конструкционным элементом трибопар, могут на 50 % обуславливать необходимость ремонта высоконагруженных агрегатов машин. Поэтому при технической эксплуатации МТП должно уделяться достаточное внимание контролю масел как части технической диагностики, что и имеет место на некоторых крупных производствах.

Предлагается диагностирование рабочих показателей масел по отработанным за десятилетие практического контроля методикам [8, 30–32, 35–37, 147]:

1. *Диспергирующе-стабилизирующие (ДСС)*, или моюще-диспергирующие, свойства экспресс-методом по «капельной пробе», опробованным в 1947 г. в фирме Schell и позднее компьютеризированным. Основа метода – бумажная хроматография капли масла (рис. 4.5, 4.6) в соответствии с ГОСТ 28365–89 («Реактивы. Метод бумажной хроматографии», СТ СЭВ 6397–88). Эта упрощенная методика одобрена в ГосНИИ-25 МО РФ, ЦНИДИ, МАДИ, использована фирмой «ТехноДиагностСервис» ЦНИИ МФ РФ и ГОСНИТИ, признана практичной и введена в инструкции по эксплуатации дизелей военной техники. Балльные показатели ДСС в нашей упрощенной методике составляют от нуля для свежих масел до шести для «мертвых». По этому

параметру браковали только обводненные масла с соответствующими рекомендациями по устранению причин обводнения.

Известны разные количественные определения ДСС. Так, в ГОС-НИТИ рекомендовалось определять показатели по формулам [93]

$$K_1 = d_3 / d_2, \quad (4.1)$$

$$K_2 = d_2 / d_1, \quad (4.2)$$

где K_1 – показатель наличия в масле активной присадки или ДСС; K_2 – показатель концентрации механических примесей; d_3 – максимальный диаметр внешнего чистого кольца масла, м; d_2 – наружный диаметр на масляном пятне зоны диффузии загрязнений масла, м; d_1 – диаметр ядра масляного пятна, окруженного кольцом осажденных частиц загрязнений, не проникающих в поры фильтровальной бумаги, м (рис. 4.5, 4.6).

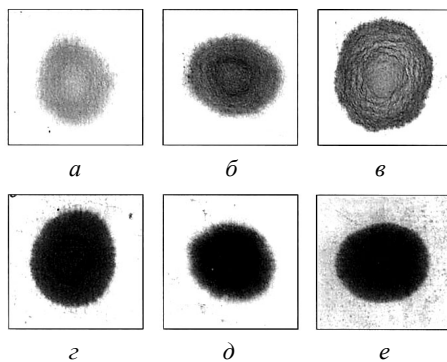
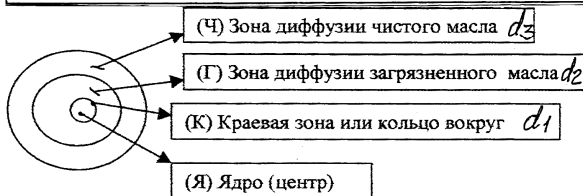
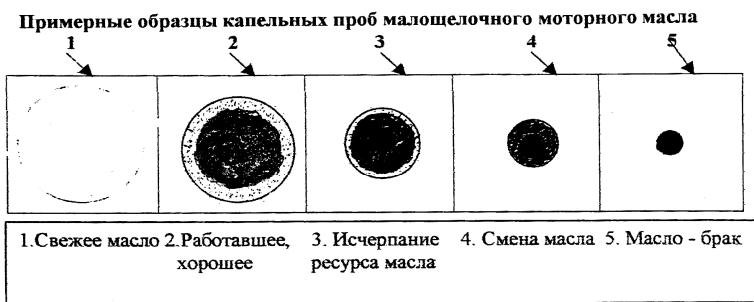


Рис. 4.5. Изменение размера и цвета пятна моторного масла на фильтровальной бумаге по мере его работы:

a – практически свежее масло; *б* – классическая картина «капельной пробы» с наружным кольцом чистого масла, внутренним кольцом незначительно загрязненного масла (зона диффузии) и светлым ядром; *в*, *г* – отсутствие внешнего кольца чистого масла, уменьшение диаметра пятна из-за постепенного укрупнения мехпримесей вследствие уменьшения ДСС; *д* – неровная форма ядра и всего пятна из-за обводнения масла, предельное состояние масла; *е* – свертывание «капельной пробы» (капля масла не растекается по фильтровальной бумаге из-за значительного и длительного его обводнения; если масло состоит из золотистой расслаивающейся жидкости, ведущей двигатель к аварии, а в донной части содержит масляный шлам, то масло – брак; если же масляное пятно имеет желтый, коричневый или темно-коричневый цвет, то это свидетельствует о значительной окисленности масла вследствие аварийного перегрева ДВС)



Я	Светлое	Темно-серое	Черное	Густое черное, мазеобразное с крупинками мехпримесей	Капля не расплывается, или расплывается только воды
К	Отсутствует	Темно-серое – черное	Темно-черное	Ядро и кольцо слиты	–
Г	Отсутствует	Серое или темно-серое	Черное	Темно-черное	–
Ч	Все пятно светлое и исчезает через 50 ч	Светлое	Светлое, переменной ширины	Исчезает	–
ДСС	1	2	3–4	5	6

Рис. 4.6. Схема оценки «капельной пробы» смазочных масел с присадками: по мере работы масла его пятно от светлого переходит к светло-серому, серому, темному, черному, густо-черному и непрерывно уменьшается в диаметре; при потере ДСС частицы примесей коагулируются, увеличиваются в размере и мало проникают в поры бумаги, а капля масла со шламом не растекается на бумаге вообще

Проанализировав более 15 тыс. «капельных проб» от 18 марок моторных масел при диагностировании парка 350 большегрузных и малотоннажных автосамосвалов БелАЗ, Caterpillar, Comatsy, МАЗ и КамАЗ, некоторых тракторов и легкового транспорта, трех тепло-возных дизелей от свежих до браковочных масел, установили, что показатели ГОСНИТИ по формулам (4.1), (4.2) неточны.

Типичные масляные пятна:

1. Почти свежее масло, поработало не более 50 ч; не загрязнено, расплывается на наибольший размер, дает равномерно окрашенное светло-серое пятно со светлой наружной каемкой чистого масла (рис. 4.5, а).

2. То же, не более 100 ч (рис. 4.5, б). Видны: центральное ядро диаметром капли до ее растекания; кольцо, окаймляющее ядро с самыми крупными мехпримесями, дающее дополнительную информацию о загрязнении масла; далее от центра – широкое кольцо зоны мелких примесей масла; крайнее кольцо почти чистого масла. Это эталон пробы с большим запасом работоспособности масла.

3. Грязное, много поработавшее масло, имеющее небольшой ресурс (рис. 4.5, в). Ежедневный контроль может предупредить резкое ухудшение состояния масла и мотора.

4. Масло заметно загрязнено и потеряло моюще-диспергирующие свойства; если ДВС работает при больших нагрузках, то масло подлежит замене (рис. 4.5, г).

5. Масло взято из аварийного ДВС (рис. 4.5, д). Нужно устранить неисправности, протечку воды, промыть двигатель, залить качественное масло.

6. Может иметь желтый цвет от пережога ДВС (рис. 4.5, е). Масло подверглось чрезмерному окислению с образованием смол.

Показатель K_1 при исчезновении на «капельной пробе» кольца чистого масла через сутки-двое работы дизеля теряет смысл вообще.

Сокращение зоны диффузии с ростом размеров мехпримесей и затруднением их проникновения в поры бумаги отражает снижение ДСС масла, а его загрязненность характеризуется плотностью цвета зоны диффузии, что и принято для компьютеризации «капельной пробы» в фирме «Лубризол» (США).

Методика экспресс-контроля моторного масла по «капельной пробе» иллюстрируется на рис. 4.5 и 4.6. На «капельной пробе» выявляют: наружный диаметр пятна $D_{\text{макс}}$, который может совпадать с внешним кольцом чистого масла; кольцо загрязненного масла (наружный диаметр D зоны диффузии загрязнений); диаметр d ядра и окаймляющего его кольца (краевая зона), где оседают самые крупные загрязнения; цвет зоны диффузии и ядра (желтый, светло-коричневый, коричневый цвет – признаки аварийного перегрева мотора и масла); неровность или рваную форму внешней границы пятна из-за обводнения масла.

Если проводят проверку «капельной пробы» на бумаге разного сорта (фильтровальной, писчей, газетной), а также на ситцевой ткани разного цвета, то достигают большей глубины контроля. Например, масло образует на бумагах «водяные знаки», по яркости которых можно выделять высокощелочные и малощелочные масла; тонкая прозрачная бумага и белый ситец позволяют на визуальном уровне качественно определить крупность мехпримесей.

Для оценки ДСС возможно применение экспертной балльной оценки, характеризующей снижение ДСС по степени сокращения диаметра масляного пятна, где предельными значениями (рис. 4.7) могут быть 1, 6 или 10.

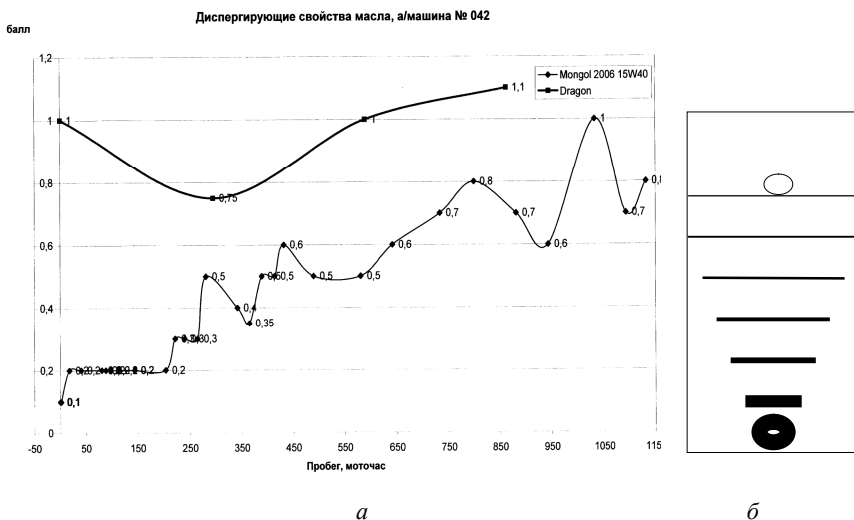


Рис. 4.7. Динамика в баллах ДСС по «капельной пробе» моторных масел дизелей Cummins KTA-38 при наработке 1100 ч автосамосвалов БелАЗ в АТП СП «Эрдэнэт»: а – масла фирмы «Квалитет» (условная марка – Mongol 2006) класса качества CG-4, вязкости 15W-40 на нижней кривой и масла южнокорейской фирмы S-oil (условная марка – Dragon), где уменьшение принятых по одnobалльной оценке показателей ДСС происходило после доливки свежего масла; б – схема сворачивания пятна «капельной пробы» на фильтровальной бумаге

Многолетняя практика контроля масел показала достоверность такой органолептической оценки ДСС.

«Капельная проба» масел приводится в ОСТ 10 2.25–87 и в СТО 10 2.25–2010, однако набор масляных пятен систематизирован там сумбурно. Целесообразно дать в СТО 10 2.25–2010 отдельно: ряд масляных пятен по мере естественного снижения ДСС без обводнения масел; несколько сокращающихся (и с краевыми разводьями) пятен со снижением ДСС из-за обводнения масел; несколько пятен желтого, светло- и темно-коричневого цвета из-за аварийного перегрева ДВС.

2. **Щелочное число масла** (рис. 4.8–4.10) – главный показатель качества моторного масла, характеризующий моюще-диспергирующие,

антиизносные, антифрикционные, нейтрализующие (кислые продукты самого масла и проникающие в нее извне) и моюще-стабилизирующие свойства.

Для кислотных чисел масел (общего кислотного числа (ОКЧ), обусловленного остаточными ингибиторами коррозии, слабыми органическими кислотами продуктов сгорания и продуктов окисления базы масла, а также кислотными числами сильных неорганических кислот (КЧСК) – продуктов сгорания) всеми зарубежными и отечественными специалистами (ВНИИ НП, ГосНИИ-25, НАМИ, НАТИ, ВНИИТиН, ФНАЦ ВИМ, ЧГАУ и др.) признано, что, хотя для ОКЧ не существует принятых признаков опасных пределов, желательно удерживать этот параметр моторных масел на как можно более низком уровне. Вместе с тем, говоря о важности КЧСК, признают, что основная доля износа ДВС при эксплуатации в условиях низких температур происходит вследствие образования кислых неорганических продуктов сгорания, содержащих галогены или серу, а также сильных органических кислот.

Обработка эксплуатационной методики контроля ЩЧ – основной показатель качества моторных масел по способности нейтрализовывать кислотосодержащие соединения, образующиеся при сгорании топлива и окислении масла и осуществлять моюще-диспергирующие действия с загрязнениями. По данным ряда исследователей, повышенное ЩЧ существенно снижает коррозионный износ поршневых колец, цилиндров и цветных металлов подшипников коленвала, препятствует образованию лаковых отложений на высокотемпературных деталях ДВС [2, 19, 20, 21]. Это особенно резко проявляется в ЦПГ судовых дизелей, работающих на высокосернистом (до 5 %) мазуте, где требуются масла со ЩЧ от 20 до 70 мг КОН/г. При работе же на топливах с малым содержанием серы (0,1–0,15 %) качество масла практически не влияет на изнашивание верхней зоны ЦПГ. Более того, возможно некоторое увеличение изнашивания этой зоны при работе на маслах высшего качества и с низкосернистым топливом, что обусловлено пластифицированием поверхностей металла под действием ПАВ присадок (эффект академика П. А. Ребиндера), не расходующихся, как в других случаях, на нейтрализацию кислых продуктов. При сернистых топливах масла высших групп с повышенной нейтрализующей способностью обеспечивают существенное снижение изнашивания.

Общее щелочное число (ОЩЧ) свежих отечественных и импортных моторных масел ранее варьировалось в пределах от 2 до 20 мг КОН/г, с 90-х гг. – не ниже 5, а у высококачественных масел – в основном от 8 до 14 мг КОН/г. Однако по мере работы запас щелочных свойств масел неуклонно снижается (рис. 4.8, 4.9). Он может стабилизироваться на минимальном уровне или приблизиться к нулю.

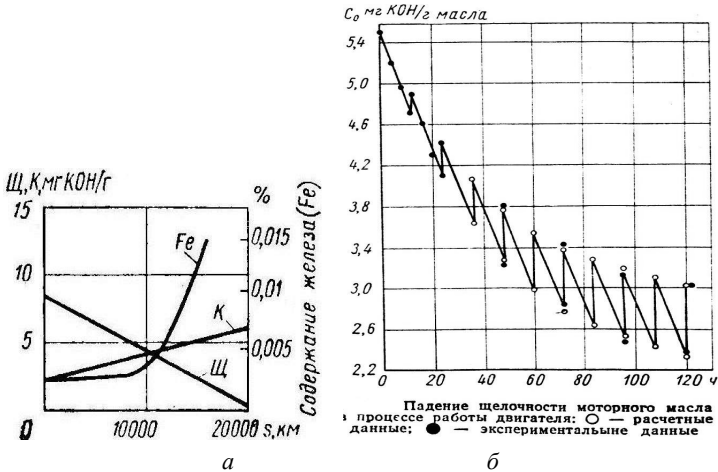


Рис. 4.8. Графики уменьшения ЩЧ среднешелочных моторных масел [2, 19, 20]: а – исторически первая схема НАМИ 60-х гг. снижения ЩЧ (Щ), повышения КЧ (К) и скорости изнашивания ДВС (Fe); б – экспериментально-теоретические данные (НАТИ, 80-е гг.)

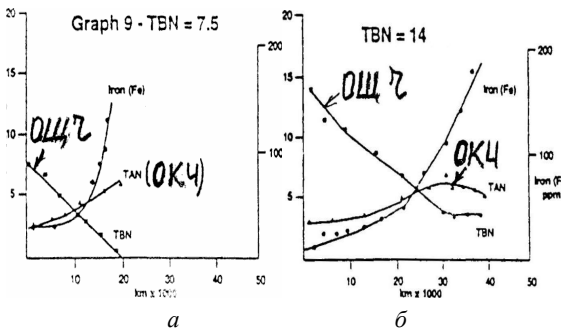


Рис. 4.9. Графики зависимости износа деталей ДВС от динамики старения его масла (по данным фирмы «Лубризол») при среднешелочном (а) и высокощелочном (б) маслах

Установлено, что ускорение изнашивания ДВС (концентрация Fe) происходит после снижения ОЩЧ до уровня КЧ.

Теоретическое и экспериментальное обоснования предельных значений ЩЧ проводились в НАМИ, НАТИ и в корпорации «Лубризол». В докладе У. Гергеля «Периодичность замены дизельных масел. Корпорация “Лубризол”» (II Международная конференция по проблемам разработки, производства и применения смазочных материалов, г. Бердянск, 02–06.09.1997) подчеркивается, что кислотные и щелочные числа как эмпирические параметры нельзя напрямую сопоставить с истинной щелочностью или кислотностью. Определение кислотного и щелочного числа является сложной процедурой, в результате которой ошибки могут достигать относительно больших величин: вплоть до 0,5 мг КОН/г с работавшими маслами. Выработать критерии годности работавших масел, базирующихся на оценке полученных значений, также непросто, особенно для кислотных чисел. Суть анализа обычно состоит в том, чтобы показать: значения варьируются в равномерном диапазоне без резких колебаний.

По контролю ЩЧ и КЧ масел сделано заключение: противоизносные/антифрикционные компоненты пакета присадок – дитиофосфаты цинка – являются продуктами амфотерного типа, т. е. обладают и кислотными, и щелочными свойствами одновременно; такие соединения цинка обычно имеют небольшие ЩЧ и относительно высокие КЧ и при включении в состав масел могут вызывать сложности при проведении анализов, особенно кислотного числа работавших масел (доклад У. Гергеля).

Для обоснования метода контроля ЩЧ и КЧ корпорацией «Лубризол» в конце 90-х гг. проведены тщательные определения ОЩЧ и ОКЧ по стандартам ASTM D-664 (для ОЩЧ и ОКЧ), D-4739 «Стандартный метод определения щелочного числа методом потенциометрического титрования» и D-2896 для ОЩЧ. По последнему с использованием в качестве титранта хлорной кислоты ЩЧ отработанных масел могут стать выше ЩЧ свежих, и подтверждения этому имеются. Поэтому в силу различного, порой непредсказуемого влияния компонентов масел, присадок, продуктов износа и загрязнения масел доказано, что для свежих масел следует использовать методы D-2896 и D-4739, а для работавших – метод D-664 (доклад У. Гергеля).

В табл. 4.1 приведены браковочные минимальные значения ОЩЧ и максимальные значения ОКЧ по данным SAE конца 90-х гг., из которых видно, что официальные нормативы ОЩЧ и ОКЧ не были установлены, и их нет до сих пор.

Таблица 4.1

Ориентиры норм ОЩЧ и ОКЧ (по данным SAE)

Минимальное значение ОЩЧ	Метод	Специалисты, %	Максимальное значение ОКЧ	Метод	Специалисты, %
0,5	D-664	10	2,0	D-664	31
0,8	D-664	32	2,5*	D-664	11
1,0	D-4379	8,9	3,5*	D-664	7
2,0	D-664	7	—	—	—
2,0 или 50 %*	D-664	11	—	—	—
1,0	D-2896	10	—	—	—
2,0	D-2896	8,9	—	—	—
50 %*	D-2896	5	—	—	—
0,5	—	36,2	—	—	—
50 %*	—	27,3	—	—	—

*По данным Американского общества автомобильных инженеров-механиков (SAE).

В связи с изложенными трудностями корпорация «Лубризол» провела испытания двух дизельных масел средней (ОЩЧ = 7,5) и высокой (ОЩЧ = 14 мг КОН/г) щелочности при эксплуатации грузовых автомобилей с контролем ОЩЧ по методу ASTM D-4739 и концентрации железа. Установлено, что интенсивность износа резко растет с момента равенства величин ОКЧ и ОЩЧ, поэтому момент, когда ОЩЧ равно ОКЧ, представляется наиболее подходящим для замены масла в дизелях. Этот вывод совпадает с данными НАМИ (рис. 4.8) 60-х гг.

Однако это предельный случай установления момента смены моторного масла, т. к. такое положение не гарантирует при ТО машин до смены масла нормального исполнения им всех его функций. Ведущим специалистом по ТСМ в АПК М. А. Воробьевым на основании более чем 30-летнего опыта эксплуатационных испытаний моторных масел установлено, что если скорость нагарообразования в ЦПГ автотракторных дизелей не превышает 0,001 б/ч, то их ресурс может достигать 30 тыс. ч, а при скорости около 0,010 б/ч – не превышает 10 тыс. ч. Исходя из этого допустимый на межконтрольный период уровень ЩЧ нужно устанавливать и с учетом допустимой интенсивности нагарообразования.

Результаты исследований НАМИ, НАТИ, ВНИИ НП, корпорации «Лубризол», ЧГАУ, ВНИИТиН показывают значительную трудность

контроля и нормирования ЩЧ, особенно при диагностировании МТП в АПК. Основным методом определения общего щелочного числа – потенциометрическое титрование хлорной кислотой по ГОСТ 30050–93 – здесь невозможен в силу сложности, опасности и трудоемкости. Для этого требуется оснащенная химическая лаборатория и специалист-химик. Сложны и другие стандартные методы: определение кислотности и кислотного числа по ГОСТ 5985–79, определение числа нейтрализации по ГОСТ 11362–96 методом потенциометрического титрования, определение числа нейтрализации методом цветного индикаторного титрования по ГОСТ 29255–91, а метод определения наличия водорастворимых кислот и щелочей в водной вытяжке из масла по ГОСТ 6307 – качественный, но грубый.

В целом многими исследованиями (НАМИ, НАТИ, ВНИ НП, ВИМ, ЛСХИ, ГОСНИТИ) замечено, что ЩЧ многих моторных масел производства 60–90-х гг. по мере эксплуатации стабилизировалось на уровне 1,5–2,5, но закоксовывание ЦПГ быстро росло. Поэтому считается, что предельное значение ЩЧ должно быть заметно выше уровня этой стабилизации.

Автотракторные дизели производства 70–80-х гг. (СМД-60...80, ЯМЗ-236...240, КамАЗ-740) имели литровую мощность 19–22 л. с./л, а современные ЯМЗ и Д-260 – до 35 л. с./л, как и зарубежные. Определенную в НАТИ величину критического значения ЩЧ масел с исходным ЩЧ 8 мг КОН/г необходимо увеличить с 3 до 3,5–4 мг КОН/г, для высокофорсированных автотракторных дизелей (ЩЧ свежего масла – до 14,5 мг КОН/г) – до 4–4,5 мг КОН/г (табл. 4.2 [2]), а для масел судовых дизелей (использующих в качестве топлива высокосернистый мазут и масла со ЩЧ 20,0 и 70,0 мг КОН/г) – до 8 мг КОН/г.

Таблица 4.2

Ориентировочные предельные и допускаемые значения ЩЧ для моторных масел, рассчитанные интерполированием данных НАТИ

Значение ЩЧ, мг КОН/г	Показатель А напряженности работы моторного масла							
	100	200	300	400	500	600	700	800
браковочное	0,4	1,1	2,5	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
допускаемое на меж-контрольный период	0,6	1,5	3,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0

При величине ЩЧ выше допустимых значений, приведенных в табл. 4.2, масло полностью выполняет свои антиизносные, моюще-диспергирующие, нейтрализующие и защитные свойства в межконтрольный период. Поэтому в новых ДВС при легких по показателю А условиях работы масла, высокой его антиокислительной стойкости, без обводнения и загрязнения, при малосернистом топливе допустимо пониженное значение ЩЧ, в других же тяжелых условиях оно выше. Предельное значение ЩЧ – то, ниже которого резко увеличиваются загрязненность масла, нагарообразование и интенсивность изнашивания ДВС.

Предлагается назначать срок смены масла не только по ЩЧ, но и по комплексу показателей его состояния (ЩЧ, ДСС, обводненность, загрязненность) и состояния ДВС (концентрация в масле металлов, особенно свинца, угар масла, расход картерных газов, напряженность работы ДВС).

Щелочное число – важнейший показатель работоспособности масел, но ее обеспечивает сбалансированный пакет присадок, и при интенсивном расходовании какой-либо одной присадки работоспособность пакета может ухудшиться, несмотря на малое изменение щелочного числа для пакета в целом. По этой причине масла нуждаются в комплексном контроле.

3. Вязкость масла (рис. 4.10). Требования к вязкости масла для ЦПГ и КШМ являются антагонистичными, меняются при изменении условий эксплуатации и ужесточаются по мере старения и изнашивания ДВС. Смазывающая способность, или маслянистость, липкость, – это способность обеспечивать смазочное действие в условиях граничного трения адсорбированными масляными пленками 0,1–0,5 мкм, когда оно не определяется только вязкостью масла. Это главное требование к маслам, сопряженное с их вязкостью, однако не обеспеченное методами и средствами контроля в триботехнике, что обуславливает стандартный контроль вязкости масел по ГОСТ 33–2000.

Исследованиями (НАМИ, НАТИ и др.) установлено, что кинематическая вязкость моторного масла при его максимальной температуре в картере современных автотракторных ДВС должна быть не ниже 7–10 сСт, а для гидродинамической масляной пленки в узлах трения – не ниже 3–5 сСт. При этих условиях толщина масляного слоя в коренных и шатунных подшипниках – не ниже 4,5 мкм. Соответственно, контроля вязкости моторных масел при 100 °С недоста-

точно, т. к. температура масел на стенках цилиндров ДВС достигает 150–190 °С. По этой причине после 2000 г. ряд маслофирм начали давать значения вязкости при 100 и 150 °С. Однако осуществлять контроль вязкости при 150 °С затруднительно, а в эксплуатационных условиях – невозможно, т. к. термостатов на 150 °С практически нет.



Рис. 4.10. Динамика вязкости масел «Квалитет» (Mongol 2006, CF-4, 15W-40 – нижняя кривая) и масла Dragon (CG-4, класс вязкости 40) за 1200 ч

Из данных рис. 4.10 видно, что всесезонное масло через 50 ч теряет вязкость, например от 14,22 до 12,4 и до 11,06 сСт, а по статистике – на 20–50 %.

По мере работы сезонного масла его вязкость растет из-за окисления базы, загрязнений и шламообразования, а неисправности дизельной топливной аппаратуры (ДТА) разжижают масло. Обводнение масла также влияет на вязкость, т. к. вода разрушает присадки в маслах, провоцируя тем самым сгущение нерастворимых примесей и шламообразование. По мере работы дизеля показания вязкости масла могут варьировать в обе стороны в зависимости от преобладающего влияния указанных факторов и условий подготовки пробы: работоспособного масла, обводненного масла, масла с расслоением на шлам – бракованной жидкости. Масло, разжиженное топливом, но чрезмерно загрязненное, может сохранить исходную вязкость, но быть непригодным, а контроль обводненного, расслоенного масла не имеет смысла.

4. **Температура вспышки масла** по ГОСТ 4333 (рис. 4.11) служит для контроля топлива в масле и тем самым состояния топливной аппаратуры дизелей. Этот контроль имеет и самостоятельное значение для определения в маслах легкоиспаряющихся фракций, что усиливает потери масла на угар. Для контроля $T_{всп}$ использовалась электроплитка с закрытой спиралью, тигель для масла в песчаной подушке, термометр для нефтепродуктов ТН-2М. Позже стали использовать полуавтоматический прибор фирмы Petrotest.

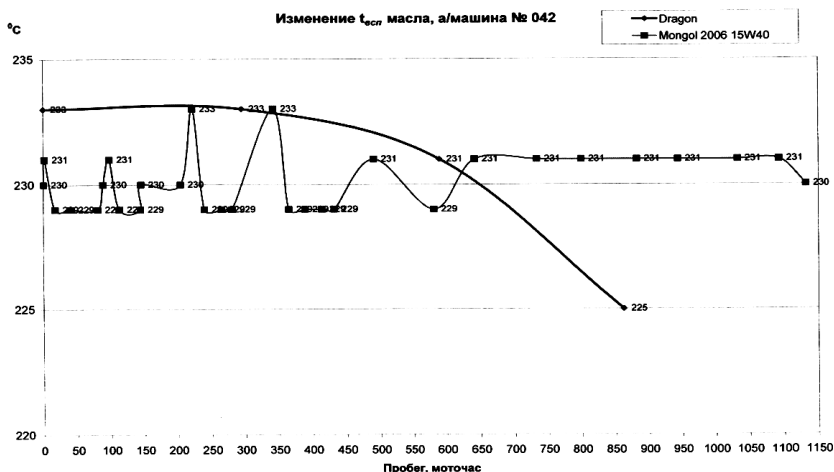


Рис. 4.11. Динамика температуры вспышки масла Mongol 2006 фирмы «Квалитет» и масла Dragon фирмы S-oil при наработке 1100 ч (повышение температуры вспышки масла «Квалитет» обуславливалось доливкой свежего)

Проверка физико-химических показателей масла требует тщательности, т. к. масло ведет себя как живое вещество. Нельзя использовать большое запальное пламя, низкий наклон пламени, поскольку это занижает фактическую температуру вспышки на 25–30 °C. При проверке всех показателей масла требуется строго соблюдать единообразие условий контроля в соответствии с утвержденными методиками. По температуре вспышки браковали только 15–22 % масел М-14В₂.

5. **Содержание в масле воды** – один из самых тревожных показателей состояния дизеля и масла. Вода деструктурирует присадки в маслах, ухудшает смазочную, моющую и нейтрализующую способности, повышает коррозионное действие, разрушает вкладыши подшипников коленчатого вала.

Проникающая в масло вода вызывает интенсивную коагуляцию примесей с образованием шламов. Последнее приводит к быстрому загрязнению масляных фильтров, сетки маслоприемников насосов, маслоканалов, маслоъемных колец, что снижает их работоспособность, повышает расход масла на угар и вызывает повышенное изнашивание ДВС до аварийного. Обводнение масла существенно увеличивает интенсивность изнашивания вкладышей подшипников коленчатого вала и цилиндров ДВС, что наглядно подтверждается данными табл. 4.3, 4.4.

Таблица 4.3

Рост интенсивности изнашивания ЦПГ
при обводнении масла (по данным НАМИ) [19, 20]

Параметр	Температура воды/масла в ДВС, °С			
	20/40	30/30	40/40	80/80
Среднее содержание воды, %, в моторном масле при испытаниях длительностью:				
– 0,5–1 ч	3,4	–	0,08	0
– более 2 ч	4,25	–	0,07	0
Относительная интенсивность изнашивания гильз цилиндров	3,7	2,3	1,8	1,0

Таблица 4.4

Ухудшение состояния ДВС при обводнении
моторных масел (по данным НАМИ) [19, 20]

Параметр	МС-20	М-20Г	М-12В ₂
Износ:			
– цилиндров, мкм	2,7/3,0*	1,78/3,0	1,02/1,09
– поршневых колец, г	0,38/0,415	0,17/0,53	0,086/0,201
– вкладышей подшипников, г	0,014/0,052	0,014/0,023	0,030/0,171
Загрязненность поршней, баллы	3,5/3,6	1,6/2,3	2,3/2,6
Отложения на ФТО, г	85/235	25/180	65/315
Щелочное число масла после 100 ч испытаний ДВС, мг КОН/г	–	8,1/5,1	2,2/1,0

*Показатели ДВС при маслах с водой/без нее.

Резкая интенсификация изнашивания подшипников коленчатого вала ДВС при обводнении масла подтверждена данными спектрального анализа по резкому увеличению содержания свинца. Имеется некоторое пороговое значение концентрации воды в масле, до которого концентрация свинца не увеличивается. При превышении этого уровня, обусловленного значением водостойкости масла, происходит деструкция присадок и выпадение продуктов их распада. Образуется водомасляная эмульсия, которая нарушает гидродинамический режим работы подшипников ДВС из-за кавитации и местного нарушения масляной пленки. Происходит непосредственный контакт трущихся поверхностей и аварийное изнашивание вкладышей подшипников.

В ГОСНИТИ апробированы все методы контроля воды в маслах в соответствии с ГОСТ 1547, ГОСТ 2477, ГОСТ 7822, ГОСТ 26378.1, которые позволили выявить отдельные недостатки. Для корректного контроля разработаны соответствующие рекомендации [36, 67].

Эпизодически применялся индикатор для контроля воды по резкому увеличению проводимости масел. Водопроводная вода имеет электросопротивление 8–12 кОм/см, болотная, озерная и речная – 4–6, дистиллированная – 200–220 (по ГОСТ 11206 – не менее 200), а моторные масла – 1–2 ГОм/см. Вследствие такой разницы (10^6) электрические индикаторы для качественного контроля наличия воды в маслах весьма просты, но, как показывает практика, срабатывают только при наличии в масле свободной (несвязанной) воды.

Известны и другие методы и средства контроля водосодержания в маслах: диэлькометрический (прибором ВАД-40), ультразвуковой метод Казанского НИИ метрологии и стандартизации, по проводимости масел и др. Но на практике из-за сложности методик и дороговизны они в АПК неприменимы. Перспективны оперативные приборы WS-04 и WS-05 фирмы PALL, но и они имеют высокую стоимость.

По результатам практической работы установлена правильность метода фирмы PALL, оценивающей содержания воды в маслах по их водонасыщению, что особенно актуально для безостановочного режима работы машин. Так, при непрерывной работе дизелей с нормальной температурой воды (85–95 °С) и масла (более 100 °С)

вода выпаривается из масла: в отдельных случаях из картера дизеля идет интенсивный, визуально наблюдаемый пар, а абсолютное содержание воды, по результатам лабораторного контроля (при определении температуры вспышки масла), находится в пределах допуска. Если же машина остановлена, то после охлаждения масла и остановки выкипания воды в масле появляется свободная вода.

Исходя из условий межсменной остановки машин, особенно в холодное время года, когда требуется определение абсолютного содержания воды, а также по требованиям оперативности и достоверности контроля в условиях сельского хозяйства рекомендуется перед ТО машин при отсутствии каких-либо приборов проверять наличие воды в маслах при контроле температуры вспышки: по потрескиванию масла, его вспениванию, начальной температуре (80–90 °С) и интенсивности потрескивания и вспенивания, числу потрескиваний на 1 мл масла, размеру пузырьков, длительности кипения/бурления, конечной температуре кипения/бурления (170–180 °С). Это позволяет определить допустимость/недопустимость обводнения масла, в то время как контроль обводненности по «капельной пробе» запаздывает.

В результате контроля масел и наблюдений за эксплуатацией дизелей обоснован допустимый уровень обводненности моторных масел: два хорошо слышимых потрескивания на 1 см³ масла, т. е. не более 150 потрескиваний на пробу 75 мл масла в тигле. Следует учитывать показатели «капельной пробы», принимать заметное вспенивание и бурление за брак масла. При недопустимом обводнении масло начинает пениться при температуре 80–85 °С, а далее бурлит вплоть до 180 °С, что затрудняет определение температуры вспышки. Пена обводненного масла не вспыхивает от огня спички и гасит его. При этом показатели «капельной пробы» могут ухудшаться до предела.

6. Загрязненность масла. Общие его виды, приведенные на рис. 4.12, разнообразны. Самое опасное загрязнение – абразивной грязью и пылью, проникающими в масло при работе ДВС постоянно, а при ТО ДВС – эпизодически на его детали. Пренебрежение этими факторами или их недооценка при эксплуатации ДВС (как и при разработке и производстве) приводит к высокой интенсивности изнашивания ДВС и значительному сокращению его эксплуатационного ресурса.

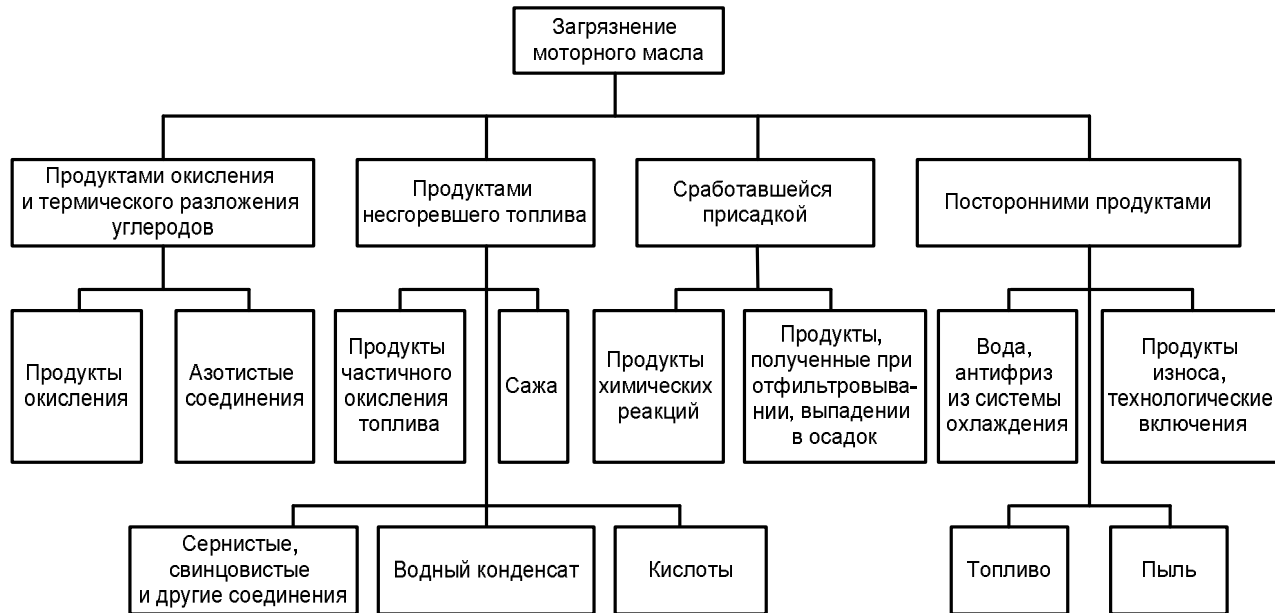


Рис. 4.12. Виды загрязнения моторного масла [2]

Воздушная пыль проникает в ДВС через впускной воздушный тракт, систему вентиляции картера, различные неплотности и картер (уплотнения воздушных фильтров и воздухопроводов, трещины, пробоины и другие неплотности корпусов фильтров и воздухопроводов, маслосливную горловину, сапуны, отверстие под маслоизмерительный стержень). Грязь попадает в ДВС через сапуны, крайние уплотнения коленвала, неплотности картера или маслобака, сопряжения корпусов маслофильтров при заправке ДВС маслом, при небрежном ТО и ремонте со снятием и разборкой узлов и агрегатов ДВС.

Абразивная способность пыли и загрязнений определяется дисперсностью и твердостью составляющих их минеральных частиц, а их количество в масле зависит от запыленности и загрязненности окружающей среды, загрязненности самого ДВС, от эффективности работы систем его защиты, в т. ч. воздушных, масляных и топливных фильтров, от качества уплотнений мест возможного проникновения пыли и загрязнений в ДВС. Ориентировочное значение износа цилиндров 4-цилиндрового ДВС от грамма пыли: от дорожной пыли – 2,5–5,0 мкм/г; от загрязнений топлива – 1,8–4,5 мкм/г; от воздушной пыли, прошедшей воздухоочиститель, – только 0,7 мкм/г [19, 20].

Испытания в НАМИ показали, что абразивная составляющая износа цилиндров, вызванная пылью и другими загрязнениями, составляет 80 % их износа. Для других деталей ДВС абразивная составляющая износа меньше. Подтверждением весомости абразивного изнашивания ДВС является тот факт, что в зимний период износ цилиндров в 2–5 раз меньше, чем летом [19, 20].

Таким образом, контроль загрязненности масел и уменьшение абразивного изнашивания ДВС является серьезным резервом повышения их долговечности и надежности, что подтверждено практикой эксплуатации автотракторных ДВС. Немаловажную роль призван выполнять экспресс-контроль моторного масла.

Загрязненность масел проверяется разными способами: визуально по «капельной пробе»; по потере инфракрасного светопотока с помощью индикатора загрязненности жидкости (ИЗЖ) Жигулевского филиала ВНИИРЭА (рис. 4.13), разработанному по заданию ГОСНИТИ, но не в соответствии с ГОСТ 24943; прибором ПКЖ-904А.

В ИЗЖ зонд снабжен инфракрасными светодиодами и светорезистором, в зазор между которыми (1 мм) вводят масло. Его настраивают на нулевое показание на воздухе и калибруют по двум пленкам с известными оптическими плотностями. Прибор быстродействующий, пригоден для работы на любой машине с аккумулятор-

ной батареей, но горячее масло, взятое с работавшего дизеля, нужно охлаждать, тщательно перемешивать датчиком и учитывать важность влияния малых показаний как из-за пузырьков воздуха в оптике, так и из-за наличия в масле свободной воды. Показания ИЗЖ относительны: по дизтопливу – до 0,02 %, в чистом моторном масле – 0,12–0,18 %, в чистом нигроле – до 0,60 %, в грязном масле – до 6 %. По этому параметру браковали масло М-14В₂ при показаниях 2,5–3,0 %, масла для дизелей Cummins – при 1,5–1,8 %, но предельное значение для масел категории CG-4 составило 2 %, а для масел М14В₂ – 3,2 %.

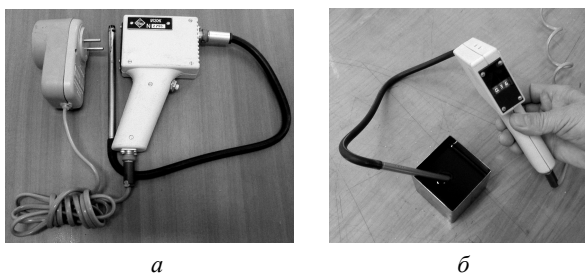


Рис. 4.13. Индикатор загрязненности жидкости:
а – комплектность индикатора; б – прибор в работе

Характеристика ИЗЖ: пределы измерения потери инфракрасного светопотока с нормированной погрешностью 0,02–3,5 %, температура масла при контроле – не выше 35 °С. Питание прибора – от аккумуляторной батареи машины или от стандартной электросети.

Стандартные методы контроля следовых значений загрязненности масла фильтрованием с растворителем длительны, требуют прецизионного весового оснащения и для условий эксплуатации неприемлемы. Более точным является определение загрязненности масел центрифугированием по ГОСТ 20684–75, когда можно проконтролировать массу всех мехпримесей. Но более тщателен контроль абразивной загрязненности масла по спектральному анализу на содержание кремния (глава 5).

Для инженерных служб АПК в контроле загрязненности масел предлагается сочетать «капельную пробу» и контроль капли масла на истирание между стальными закаленными или стеклянными пластинами: при наличии в масле абразивных частиц они истираются со скрипом и оставляют на пластинах царапины.

7. Коррозионные свойства по отношению к свинцу и меди. Их проверка в соответствии с ГОСТ 19199–73 и 20502–75 несложна,

но на нее требуется не менее часа. Проверка нужна при приемочном контроле масел, а также в диагностировании ДВС для выявления причин повышенного изнашивания подшипников КШМ.

Предлагается следующая методика контроля: 2–3 пластины свинца марки С1 или С2 размером от 3×3 до 5×5 см взвешивают на лабораторных весах с дискретностью 0,01 г и помещают на 1 ч в тигель с испытуемым маслом, нагретым до 150 °С. По истечении времени пластины вынимают, осматривают на наличие пятен коррозии, осторожно промывают в растворителе и по потере массы оценивают степень коррозионности масла. Согласно ГОСТ 8581–78 потеря массы свинцовых пластин в масле классов Г₂ должна составлять не более 20 г/м², а для масел класса Г_{2К} не допускается. Масло фирмы «Квалитет» класса качества CF-4 и вязкости 15W-40 только через 1000 ч работы вызвало аварийные концентрации свинца в масле дизелей Cummins KTA-38 и KTA-50 (до 40 ppm, рис. 4.14). Экспертиза этого масла во ВНИИ НП показала предельную потерю массы пластин 20 г/м², т. е. предельную коррозионность масла.

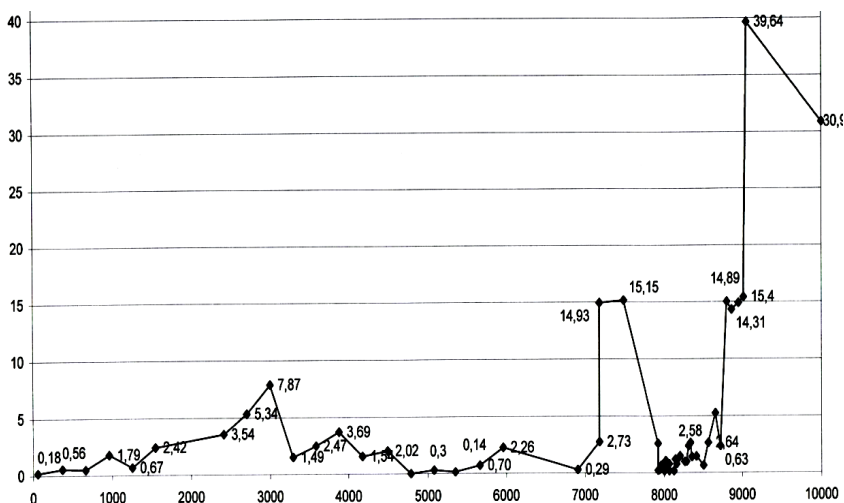


Рис. 4.14. Динамика содержания свинца (г/г) в масле фирмы «Квалитет» при работе в дизеле Cummins KTA-50

Контроль коррозионности масел на меди нагляднее и проще: при аналогичном испытании оценивается изменение цвета пластин из электротехнической меди, не допускается появление на пластинах

серых, серо-зеленых пятен. Установлено, что масло «Квалитет» медные пластины не корродирует (рис. 4.15), при этом рост концентрации Pb не связан с повышением концентрации Si, а концентрация Cu минимальна.

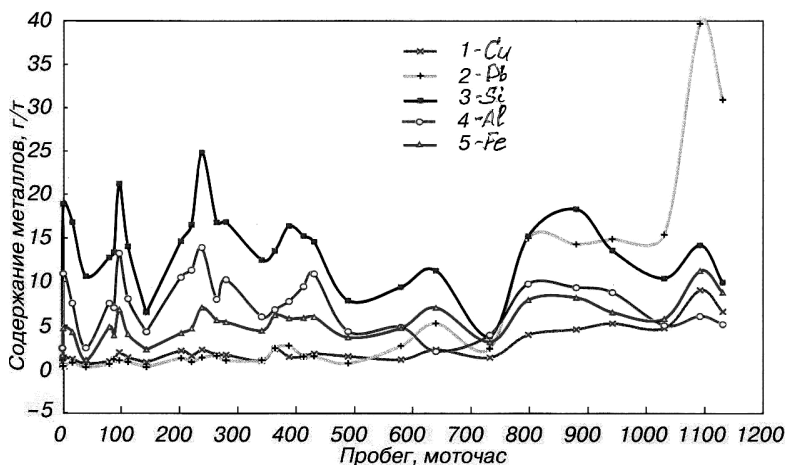


Рис. 4.15. График зависимости концентрации металлов от концентрации кремния в масле «Квалитет» дизелей Cummins KTA-38, KTA-50

8. Экспресс-метод контроля антиизносных свойств смазочных масел в условиях эксплуатации используется как для входного контроля свежих, так и для диагностирования работавших масел и определения их остаточного ресурса.

Для условий эксплуатации метод официально пока не утвержден, что является упущением, поскольку, по многолетним данным мониторинга ВНИИ НП, ВИМ и ВНИИТиН, качество многих отечественных моторных масел снижается. Например, масло М-14ДМ, по данным авторского надзора ВНИИ НП и по результатам испытаний на трибометре TRB-S-DE в Наноцентре ГОСНИТИ, не соответствует техническим условиям разработчика этого масла. Коэффициенты трения трибопары «палец–диск» с маслом М-14ДМ на 0,015–0,020 больше, чем с маслом М-10Г_{2К}.

В первом приближении для экспресс-контроля антиизносных свойств масел предлагается специальное приспособление, включающее чашу для масла, фиксируемый на дне чаши диск, заостренное истираемое кольцо и вращающийся кольцо вороток, зажимаемый в патроне сверлильного станка или дрели.

Необходимо сравнить потерю массы (или высоты) кольца, истертого в испытуемом масле за 5 мин с помощью, например, сверлильного станка, с потерей массы (или высоты) этого же кольца в одинаковых нагрузочно-скоростных режимах, но в масле с хорошими антиизносными свойствами. Скорость вращения кольца – до 300 мин^{-1} , нагрузка на рычаг подачи сверлильного станка – 1 кг, оценка износа кольца – по убыли массы (лабораторными весами) или по уменьшению высоты кольца (микрометром).

9. Экспресс-контроль термической стойкости моторных масел, используемый потребителями в последние годы. Причина этого – массовые явления быстрого шламопревращения некоторых товарных масел при температуре более $150 \text{ }^\circ\text{C}$, прекращение их поступления в подшипники КШМ и аварийность ДВС.

Предлагается совмещать этот контроль с контролем обводненности, разжиженности топливом и температуры вспышки масла. После такой проверки масло необходимо оставить в тигле на сутки-двое, после чего визуальным образом определить изменение консистенции масла. При наличии признаков его изменения дополнительно провести «капельную пробу» и контроль вязкости масла. При подтверждении признаков высокотемпературного шламообразования (преодоленного в послевоенное время) целесообразно назначить использование такого масла в агрегатах только без его перегрева.

На этом методе диагностирование рабочих свойств моторного масла заканчивается. Полученные значения описанных параметров масел должны вноситься в карту диагностирования или другой документ машины для слежения за состоянием ее дизеля.

Кроме полного планового диагностирования масла при ТО или ТР целесообразен регулярный экспресс-контроль обводнения масла и его разжижения при падении давления (контроль температуры вспышки на наличие топлива).

Практика показала, что взятие пробы масла и подготовку его к анализу следует проводить внимательно и аккуратно (без малейшего загрязнения, обводнения, с оценкой загрязненности ДВС и характера его работы, который зависит от состояния масла и влияет на его состояние), т. к. качество контроля масла наполовину зависит от аккуратности взятия пробы, в противном случае в анализах могут происходить грубые ошибки.

С начала проведения химмотологического и спектрального анализа в ГОСНИТИ и других научно-исследовательских организациях и вузах была проведена работа по выявлению и устранению причин

быстрого загрязнения масел. С этой целью на машины были установлены дополнительные устройства, осуществлены мероприятия по защите системы смазки дизелей от загрязнения, обводнения и разжижения топливом и др. Регулярный (через каждые 200–250 ч) контроль масел и разработанные по его результатам рекомендации ужесточили требования к обслуживанию и ремонту дизелей: выявление и устранение дефектов воздухоподачи, системы смазки; промывка маслобаков и картеров и их защита от загрязнений; улучшение мойки машин; дополнительная защита воздушных фильтреlementов от воды при мойке двигателей и от окружающей среды.

По результатам контроля топливо-смазочных материалов и соответствующих ТО и ТР машин были полностью устранены аварии дизелей автосамосвалов, повышен межремонтный срок службы дизелей 8ДМ-21А с 17 до 23–27 тыс. ч (т. е. полный срок службы – с 3–4 до 5–6 лет), а дизелей КТА-38 и КТА-50 – до 60–70 тыс. ч. [36, 147]. Средний срок службы масел М-14В₂ повышен с 250 до 650 ч, а масел СГ-4 – до 850 при максимальном сроке 850 и 1250 ч и при потенциальном ресурсе для масел СГ-4 до 2500 ч. Состояние дизелей технологического транспорта было намного лучше, чем ДВС личного легкового и пассажирского транспорта СП «Эрдэнэт».

Налаженный учет расхода топлива и масла дизелей позволил определять относительный расход масла на угар. Вместе со спектральным и химмотологическим контролем вели наблюдение за состоянием ЦПГ и КШМ, но с угаром масла свыше 3,5 % рекомендовали ставить дизели для проведения текущего ремонта.

Регламентный срок службы моторного масла класса качества CD по рекомендациям фирмы Cummins составлял 250 ч, а по ее расчетным материалам в зависимости от расхода топлива и угара масла – не менее 820 ч. В то же время в соответствии с данными фирмы «Лубризол» ресурс масел класса качества СГ-4 даже в жестких условиях работы грузовых автомобилей должен составлять 2000–2800 ч. Исползованные сроки службы масел были малы, что подтверждается и фиксированными значениями параметров сливавшихся масел (табл. 4.5, 4.6).

Повышение срока службы масел является важным, но в триаде «двигатель, [условия эксплуатации + ТО], масло» все подчинено двигателю, и его неисправность или ухудшение условий работы нередко вынуждают сменить масло прежде, чем оно исчерпает свою конституционную работоспособность. При исправном двигателе масло должно работать почти до исчерпания своего ресурса (табл. 4.7), но не более.

Таблица 4.5

Показатели сливавшихся моторных масел класса CG-4

Показатель масла	Значения		
	Диапазон	Средние	Браковочные
Щелочное число, мг КОН/г	6,2–8,2	7,44	4–4,5
Кинематическая вязкость, сСт	10,4–13,2	11,4	10,5
Содержание кремния, ppm	2–41,5	15,0	до 25
Загрязненность по показаниям ИЗЖ, %	0,38–1,48	0,87	1,5–1,6

Таблица 4.6

Показатели сливавшихся моторных масел M-14B₂

Показатели масла	Значения		
	Диапазон	Средние	Браковочные
Щелочное число, мг КОН/г	3,0–5,15*	4,5	3,0–3,5
Кинематическая вязкость, сСт	10,0–17,0	13,5	10,5
Содержание кремния, ppm	5–35	28,0	до 25
Загрязненность по показаниям ИЗЖ, %	0,55–4,6	2,7	2,5–3,5

*Щелочное число свежего масла M14B₂ составляло 4,8–5,15 мг КОН/г.

Таблица 4.7

Показатели выбраковки моторных масел M-14B₂

Причины	Наличие воды	ДСС ниже нормы	T _{всп} ниже 170 °С	Кремний более 25 ppm	Металлы больше нормы	Снижение вязкости	Снижение ЩЧ
Выбраковка, %	до 17	25–27	15–22	19–26	12–17	5–8	2–5

Примечание: в 19–26 % случаев масло выбраковывалось независимо от состояния дизеля.

В целях экономии менять работавшие моторные масла целесообразно только при браковочных значениях параметров: при щелочном числе менее 3,5–4 мг КОН/г, при наличии воды более 0,3 %, при температуре вспышки ниже 170–180 °С, а вязкости масла – меньше нижнего паспортного значения. После очистки от нерастворимых примесей и воды масло с запасом ЩЧ можно

использовать повторно, но в узлах и агрегатах, менее требовательных к качеству масел.

Обычно рекомендуемые моторостроителями сроки смены масла, явно заниженные, рассчитаны на худшие условия эксплуатации и двигатели с плохим техническим состоянием, а для нормальных условий эксплуатации нерациональны. Надежную информацию о сроках необходимой смены масла можно получить только на основании мониторинга состояния масла и двигателя. Без такого контроля в новых и малоизношенных ДВС при регламенте масло сливают, как правило, работоспособным (рис. 4.16). Такое неэкономное и неэффективное расходование моторных масел при росте их цен и неизбежном истощении нефтепромыслов является неразумным и заставляет вводить контроль масел для совместного диагностирования с ДВС, что и дает ожидаемые результаты по маслу и ДВС. Так, при хорошем ТО по результатам диагностирования фирма «Лубризол» гарантирует пробег на ее маслах легковых автомобилей до 170 тыс. миль, а для тяжелых грузовиков – до 42 тыс. миль. ПО «КамАЗ» указало в ТО для некоторых автомобилей пробег без смены масла «Квалитет» 33 тыс. км. Известны пробеги машин без смены масел 1 млн км и более.

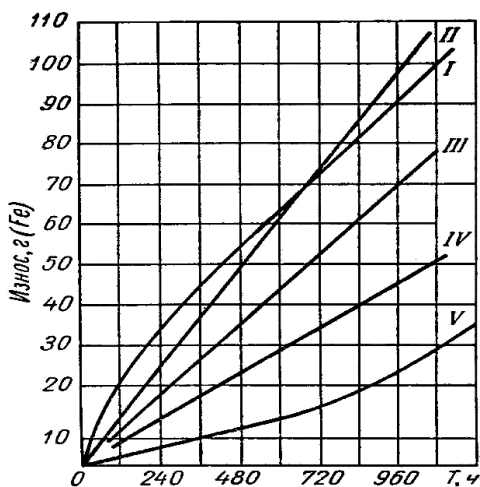


Рис. 4.16. График зависимости износа деталей ЦПГ дизеля при сроках смены масла Дп-14:
I – 120 ч; II – 180 ч; III – 240 ч; IV – 300 ч; V – 360 ч [19, 20]

Вместе с тем необходим строгий регламентный контроль, чтобы не допускать работу с бракованным маслом. Так, специалисты SAE считают, что 50 % износа ДВС приходится на последние 20 % срока службы масла. Таким образом, основная задача контроля – определить, когда масло отработало 80 % моторного ресурса, слить его и заменить фильтры.

Предложено ввести в перечень работ ТО тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин по ГОСТ 20793–2009 работы по экспресс-контролю масел с помощью «капельной пробы».

До сих пор корректно не обосновано предельное значение относительной величины угара моторных масел. Исторически сложившееся отношение расхода масла на угар к расходу топлива не совсем верно. Повышение угара масла – следствие износа ЦПГ, что проявляется и в снижении мощности ДВС, производительности машины, повышении расхода топлива. Восстановление мощностных и топливно-экономических параметров требует текущего или капитального ремонта ДВС. По этой причине потребность в ремонте ЦПГ ДВС правильнее определять из соотношения стоимости ремонта с потерями от пониженной производительности машины, от перерасхода топлива и масла в межремонтный период. Чем ощутимее эти потери, тем при меньшем, определяемом в конкретных условиях, значении угара масла целесообразно отдавать двигатель в ремонт.

При небольшом значении щелочного числа весомую трибологическую роль выполняют постепенно накапливающиеся продукты окисления масла (смолы), повышающие адгезию компонентов смазки на поверхностях трения. При этом происходит постепенная «приработка» масла и существенное повышение его антиизносных свойств.

С другой стороны, повышенная щелочность современных высококачественных моторных масел, что доказано в НАМИ и ГОСНИТИ при испытании парка тракторов «Беларус-80», повышает износ ЦПГ, поэтому сокращение срока службы масел нерационально. В целом срок службы масел следует определять по комплексу фактических, химмотологических (рабочих, моторных) показателей масла и по состоянию ДВС. Однако при браковочном значении любого показателя масла или ДВС масло подлежит смене.

Всесезонные масла специфичны, дороже, и их применение, по имеющемуся более чем десятилетнему опыту, для рядовой практики МТП АПК не всегда оправдано. Так, тракторы, комбайны работают в основном летом, запуск мотора проводится при температуре

масла выше +5 °С, а срок службы работающего масла – от 250 до 500 ч (до 60 дней или один сезон). Возникает вопрос, нужны ли всесезонные масла, которые дороже, капризнее сезонных, имеют заметно (на 20–50 %) снижающуюся вязкость.

На основании результатов ежедневного, проводимого в течение месяца контроля масла фирмы «Квалитет» класса качества CG-4 и класса вязкости 15W-40 установлено, что за 300 ч работы в дизелях оно теряет вязкость на 29 % (табл. 4.8). Практически свежее масло было заменено из-за пониженной вязкости.

Таблица 4.8

Результаты контроля вязкости ν , температуры вспышки $T_{всп}$ и загрязненности (по ИЗЖ) моторного масла «Квалитет» в дизеле Cummins KTA-38

День	Показатели масла			Примечание
	ν , сСт	$T_{всп}$, °С	ИЗЖ, %	
1-й	13,98	219	0,19	Наработка дизеля – 12 672 ч
9-й	13,34	220	0,40	12773,1 ч
10-й	≈12,80	217	0,51	12 844,7 ч
11-й	11,14	214	0,83	12 870,0 ч
14-й	12,41	219	0,64	После доливки 30 л масла
17-й	12,76	225	0,61	13 000,4 ч
21-й	12,12	223	0,72–0,74	13 101,5 ч
25-й	11,59	225	0,81	13 193,7 ч ($\Sigma = 521,7$ ч)

Медленное загрязнение масла в допускаемых пределах и практическое постоянство $T_{всп}$ доказывают, что снижение вязкости происходило только из-за деструкции вязкостной присадки. За 198 ч произошло снижение вязкости на 2,84 сСт (на 20,4 %), или по 0,1 % в час. Такое снижение вязкости обуславливает использование ресурса масел только на 50–60 %, поэтому перед переходом на них следует провести эксплуатационные испытания. К тому же стареющие двигатели нуждаются в масле с повышающейся по мере их износа вязкостью, которую, например, фирма Cummins предписывает повышать с 14,5 до 15,3–15,8 сСт. Имеется большой положительный опыт применения сезонных масел на большинстве автотракторных ДВС.

В соответствии с результатами исследований представитель фирмы Wagner принял решение о необязательности применения

всесезонных масел. Для маслозавода при СП «Эрдэнэт» заданы отдельные технические требования для зимних масел с предельной температурой прокачиваемости $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и для летних – с минимумом загущающих присадок, но с более стабильной вязкостью.

Таким образом, смазочные масла, выполняющие комплекс функций, обуславливающих ресурс и надежность агрегатов и узлов самоходной сельскохозяйственной техники, подлежат регламентному контролю. Для этого разработан минимальный набор методов химмотологического контроля масел в условиях проведения ТО техники.

Усовершенствованный экспресс-контроль моторного и трансмиссионного масел по «капельной пробе» предлагается в качестве одного из элементов диагностирования агрегатов МТП, т. к. позволяет повсеместно, нетрудоемко и достоверно выявить уровень рабочих свойств, фактический, а не календарный срок службы масла и главные причины ускоренного изнашивания ДВС и назначить меры по их устранению.

Отсутствие в техническом сервисе МТП АПК контроля масел является принципиальным упущением и может быть устранено введением его в ГОСТ 20793–2009 «Тракторы и машины сельскохозяйственные. Техническое обслуживание». Предлагается экспресс-контроль масел при всех видах ТО тракторов и комбайнов, а также входной контроль антиизносных свойств свежих и работавших масел, например истиранием торца стального кольца.

Рекомендации и нормативы химмотологического анализа целесообразны для внедрения в крупных сельскохозяйственных организациях, райагросевисах на дилерских технических центрах и на ремонтных предприятиях.

5. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПРИЧИН ПОВЫШЕННОГО ИЗНАШИВАНИЯ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВС

5.1. Особенности применения спектрального анализа смазочных масел

Спектральный анализ смазочных масел, выявляющий динамику изнашивания типовых деталей агрегатов и узлов машин и оборудования, а также, в отличие от обычного диагностирования, причины ухудшения их технического состояния, как показала практика, является эффективным средством раннего предупреждения возможных неисправностей автотракторных ДВС и других агрегатов и узлов сельскохозяйственной техники.

В основе спектрального анализа лежит эмиссионный метод (испускание), сущность которого заключается в излучении света анализируемым веществом.

Для того чтобы продукты износа трущихся пар (металлы, содержащиеся в масле) излучали свет, их необходимо подогреть до температуры, обеспечивающей возбуждение атомов. Возвращаясь в обычное состояние при остывании, атомы анализируемого вещества отдают избыточную энергию в виде света, который излучается в пространство по закону электромагнитных колебаний с различными длинами волн λ . Длина световой волны для конкретного элемента – постоянная величина, обычно измеряемая в ангстремах (А) или в микрометрах ($1 \text{ \AA} = 10^{-4} \text{ мкм}$).

Методы инфракрасного, молекулярного, спектрального и феррографического анализа относятся к методам лабораторной трибодиагностики. Они позволяют диагностировать неисправности смазываемых узлов трения. Феррография – метод магнитного осаждения металлических частиц износа из проб смазочного масла. Он позволяет определить вид износа, интенсивность и режимы трения и смазки по форме частиц, состоянию их поверхности, распределению размеров частиц, материалам отдельных частиц, наличию посторонних примесей и продуктов деструкции масла.

Метод феррографии используется при исследовании не только магнитных металлических частиц, но и немагнитных материалов: алюминия, бронзы, латуни, графита, полимерных частиц и т. д. Совокупность этих параметров позволяет идентифицировать вид износа, определить место возможного отказа и оценить степень

опасности дефекта. Например, для частиц задира характерны борозды в направлении движения. В случае образования на поверхностях трения усталостных микротрещин при качении в масле появляются сферические частицы. При усталостном выкрашивании образуются хлопьевидные частицы, на поверхности которых обычно имеется множество микроязвин. При коррозионном износе в пробе масла появляется множество частиц размером до 2 мкм. При микрорезании образуются частицы в виде стружки.

Систематический анализ проб масла дает возможность точно определить время замены, предотвращая слишком раннее или позднее проведение обслуживания, а также повысить надежность и безопасность эксплуатации машин и оборудования.

Диагностирование двигателей по анализам масла получает все большее распространение, в частности потому, что некоторые производители моторных масел бесплатно выполняют анализ для постоянных покупателей их продукции.

Кроме анализа, который проводят в специализированных лабораториях, применяют и экспресс-анализ, выполняемый водителями и другими работниками автотранспортных предприятий. Для проведения экспресс-анализа в продаже имеются специальные комплекты простейших приборов и реагенты.

Родоначальником эмиссионного спектрального анализа моторных масел является Великобритания (1927 г.), где в 60-х гг. XX в. было налажено изготовление эмиссионных спектрометров марки Nilger. В конце 50-х гг. качественный и количественный спектральный анализ веществ получил широкое применение в СССР.

Началу прикладного применения спектрального анализа моторных масел для диагностики автотракторных и транспортных дизелей с 60-х гг. положили исследования ЦНИИ МПС, ЦНИДИ, НАМИ, ВНИИ НП, ГОСНИТИ, Ленинградского СХИ и МАДИ. В 80-х гг. спектральный анализ стал применяться в крупных автотранспортных организациях и в системе Госкомсельхозтехники.

В этот период на базе БИМСХ отраслевой научно-исследовательской лабораторией Госкомсельхозтехники БССР был проведен комплекс исследований, связанный со спектральным анализом масел двигателей Д-240.

Многолетний практический опыт показал, что лабораторию контроля ТСМ для диагностирования масел и ДВС по спектральному анализу с целью эффективного, нетрудоемкого и недорогого диагностирования многих агрегатов и узлов машин технически

и технико-экономически целесообразно формировать на основе многоканальной фотометрической системы типа МФС-7М, ДФС-500 или МФС-10 (ОКБ «Спектр»), специализированной для эмиссионного спектрального анализа масел вязкостью 6–30 сСт. При меньшей вязкости механические примеси выпадают в осадок, а при большей – неравномерно поступают в прожиг.

На рис. 5.1 и 5.2 приведены принципиальная схема работы и составные части спектральной установки МФС-7М.

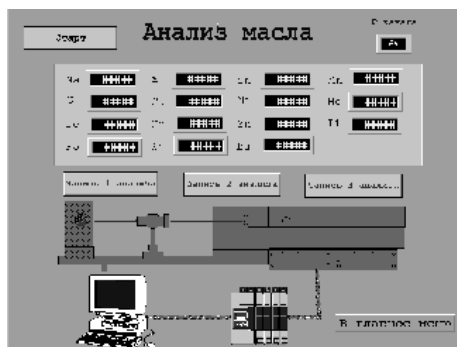


Рис. 5.1. Принципиальная схема работы спектрофотометра МФС-7М



Рис. 5.2. Спектрофотометр МФС-7М:

- 1 – источник возбуждения спектров; 2 – штатив для прожига масла;
- 3 – дифракционная решетка; 4 – полихроматор (фотоэлектрический умножитель);
- 5 – компьютер; 6 – интегратор (интерфейс)

Спектрофотометр МФС-7М может использоваться для анализа содержания продуктов износа не только в моторном масле, но в трансмиссионных и гидравлических работавших маслах в границах от 0 до 999,8 г/т. Полный анализ без пробоподготовки производится в течение 3–5 мин.

Все работы контроля масел и диагностирования включают: отбор пробы масла (500 мл) с поддона двигателя после слива из него донной части (50–100 мл); проведение химмотологических анализов по температуре вспышки и обводненности масла, по ЩЧ, «капельной пробе», загрязненности и вязкости. Результаты химмотологии могут показать браковочное состояние масла. При его чрезмерной обводненности спектральный анализ становится невозможным, т. к. обводненное масло в искре штатива взрывается.

По команде с компьютера спектральная установка автоматически прожигает спектральные угольные электроды для их очистки, затем сжигает между ними завлекаемую кварцевым диском пленку масла. Далее без подачи масла на электроды сжигается образовавшийся на них осадок, а излучение, выделившееся при этом сжигании, анализируется в квантометре.

По данным основоположников спектрального анализа и их последователей, статистики анализа длительной работы 50 машин технологического транспорта и более 100 других машин СП «Эрдэнэт», анализа неисправностей и соответствующих им работ ТО и ремонта ДВС в ГОСНИТИ в 1999 г. была разработана, а в 2006 г. уточнена детальная технологическая карта спектрального анализа масел. Последовательно уточнялись и нормативы показателей работавших масел: номинальные (близкие к паспортным); допускаемые без замены масла при ТО; предельные/браковочные для смены масла независимо от ТО или ремонта по содержанию металлов и кремния.

5.2. Обоснование нормативов содержания металлов и кремния в моторных маслах

Процесс накопления мехпримесей в моторном масле тепловозных дизелей обстоятельно исследован в работе [141] В. В. Чанкиным и Э. А. Паховым. Динамику содержания примесей в масле с учетом определяющих ее переменных параметров представлена в уравнении концентрации примесей

$$K = K_0 \left(1 - \frac{q_y - q_d - q_T}{Q_0} \cdot t \right)^{\frac{q_n + q_d + q_T}{q_y - q_d - q_T}} + \frac{g}{q_n + q_d + q_T} \left[1 - \left(1 - \frac{q_y - q_d - q_T}{Q_0} \cdot t \right) \right]^{\frac{q_n + q_d + q_T}{q_y - q_d - q_T}}, \quad (5.1)$$

где K_0 – начальная концентрация примесей, г/т; Q_0 – начальный объем масла в картере или маслобаке ДВС, кг; g – интенсивность поступления примесей (в данном случае металлов – продуктов изнашивания деталей) в масло ДВС, г/ч; q_y – интенсивность угара (испарения, сгорания и выноса с ОГ) масла, кг/ч; q_d – интенсивность долива масла в систему смазки ДВС, кг/ч; q_T – интенсивность проникновения несгоревшего дизельного топлива в систему смазки ДВС, кг/ч; q_n – интенсивность удаления мехпримесей маслоочистителями ДВС, определяемая подачей в них масла и КПД очистки при однократном прохождении масла через маслоочистители, кг/ч; t – продолжительность работы ДВС, ч.

При постоянстве уровня масла в ДВС (угар масла восполняется доливом и поступлением топлива ($q_y = q_d + q_T$), формула (5.1) представлена в следующем виде:

$$K = K_0 e^{-\frac{q_n + q_y}{Q_0} t} + \frac{g}{q_n + q_y} \left(1 - e^{-\frac{q_n + q_y}{Q_0} t} \right). \quad (5.2)$$

Максимальная концентрация не может быть выше соотношения

$$\lim K = \frac{g}{q_n + q_d + q_T}. \quad (5.3)$$

По выдвинутым гипотезам в работе [141] сделаны предположения, что повышенные концентрации продуктов изнашивания, по которым можно предполагать повышенный износ деталей ДВС, не всегда соответствуют их аварийному состоянию. Для этого необходимо иметь полное представление о динамике их изменения с учетом эксплуатационных особенностей и требований надежности двигателей. При диагностировании ДВС по концентрациям продуктов изнашивания в масле необходимо вести его постоянный контроль и учет расхода топлива и масла на угар.

В отличие от автотракторных ДВС, при эксплуатации тепловозов не наблюдали заметного увеличения расхода масла с износом, хотя имелись дизели, различавшиеся по угару масла примерно в два раза.

На основании проведенных ГОСНИТИ исследований относительно автотракторных двигателей установлено [30, 41]:

– при равномерном износе деталей и постоянном объеме масла концентрация продуктов изнашивания в нем с увеличением интен-

сивности их поступления g (т. е. с ростом интенсивности изнашивания ДВС), со снижением интенсивности очистки масла q_n и ухудшением его моторных функций может быстро возрасти до предела;

- максимальная концентрация продуктов изнашивания при равномерном их поступлении может мало зависеть от объемов масла в картере; время достижения максимальной концентрации пропорционально объему масла в картере;

- при любой постоянной интенсивности изнашивания может наступать предел повышения концентрации примесей, соответствующий периоду 2–3-кратного обмена масла за счет угара, уноса с газами и долива; при дальнейшей работе ДВС в любой период времени концентрация элементов может не повышаться, хотя статистические данные, приведенные в работе [78], этого не подтверждают;

- стабилизация концентрации органических примесей в масле отнесена авторами работы [141] и к процессам его старения, если протекает с постоянной интенсивностью и в постоянном объеме,

- интенсивная очистка масла в современных ДВС может резко снизить максимальную концентрацию элементов и период ее стабилизации;

- при продолжительной работе ДВС концентрация примесей в масле тем больше, чем больше исходная концентрация K_0 ; концентрация возрастает с течением времени t и с уменьшением количества масла в системе Q_0 ;

- при длительной работе ДВС концентрация примесей может определяться только отношением $g / (q_n + q_y)$;

- постоянный контроль концентрации продуктов изнашивания в масле позволяет не только оценить повышенное изнашивание ДВС в целом, но и выявить аварийное изнашивание его отдельных деталей, т. к. при этом концентрации Fe, Al, Cr, Pb, Cu, Sn, Si повышаются не менее чем в 1,5–2 раза; таким образом, спектральный анализ, контролируя общее состояние ДВС, позволяет выявить причины аварийного изнашивания типовых деталей ДВС и предотвратить его;

- максимально допустимые концентрации продуктов изнашивания должны определяться с учетом периодичности обслуживания и ремонта ДВС;

- для использования спектрального анализа масел для диагностирования ДВС его стоимость и погрешность контроля должны быть меньшими, чем при определении износа иными, в т. ч. прямыми методами;

– регулярное применение спектрального анализа позволяет сократить межконтрольный период, упредительно выявить вероятность наступления повышенного изнашивания ДВС, предотвратить его и тем самым увеличить доремонтные и межремонтные периоды эксплуатации.

Исходя из формул (5.1–5.3) выявлено, что система смазки ДВС способна к саморегуляции – поддержанию концентрации примесей на определенном уровне, зависящем от величин параметров g , q_n и q_y . Авторы [141] и сторонники этой гипотезы считали, что она подтверждается данными наблюдений за работой тепловозных дизелей, у которых концентрация примесей после некоторого роста стабилизируется. Время работы ДВС, необходимое для такой стабилизации, зависит от величин первоначальной загрязненности масла и количества масла. С уменьшением количества масла стабилизация наступает быстрее.

Рядом исследователей было доказано, что при длительной работе масла в ДВС, постоянной интенсивности очистки и постоянном объеме масла скорость изнашивания ДВС характеризуется только концентрацией продуктов износа в масле.

При эксплуатации тепловозных дизелей без смены масла уровень концентрации Fe в картерном масле составлял 25–35 г/т (в среднем 30 г/т), а при смене масла через 25–30 тыс. км – 15–20 г/т. Для Cu этот параметр составлял 7–10 и 5–7 г/т, а для Pb – 5–10 и 4–5 г/т соответственно.

Установлено, что допустимые концентрации элементов износа для дизелей тепловозов ТЭЗ должны находиться в пределах: Fe – 40–80 г/т, Cu – 25–50 г/т, Pb – 25–40 г/т. Если концентрация элементов превышает эти величины, а тенденции к их снижению не наблюдаются, то дизели должны быть направлены на осмотр и контроль. Аварийное состояние тепловозных дизелей определили концентрациями: Fe – 150–200 г/т; Cu – 60–100 г/т; Pb – 150–200 г/т. Если нарастание концентраций элементов продолжается в течение 15–30 дней, то периодичность контроля масла в этих случаях должна быть в 2–3 раза короче [141].

Для оценки применимости выдвинутой в работе [141] гипотезы саморегуляции концентрации металлов к моторным маслам автотракторных дизелей необходимо учитывать следующие факторы:

– принятое в гипотезе постоянство интенсивности очистки масла имеет ограниченный характер, т. к. по мере загрязнения маслофильтры могут очищать масло в большей или меньшей мере;

– тепловозные дизели забирают воздух для впускного воздушного тракта из значительно менее запыленного воздуха, чем автотракторные, особенно дизели тракторов, комбайнов и других самоходных сельскохозяйственных машин;

– проникновение загрязнений в моторное масло тепловозных дизелей исключено, в то время как для автотракторных ДВС основное поступление абразивных загрязнений происходит через сапуны, маслозаливные горловины и отверстия под масломерные линейки (по этой причине первопроходцами спектрального анализа для диагностирования ДВС влияние концентрации кремния в маслах на результаты анализа рассмотрено лишь частично, а для нормирования содержания металлов не рассмотрено вообще);

– нагрузочно-скоростные и температурные режимы работы тепловозных дизелей подходят для высокоресурсной работы дизелей больше, чем «рваные режимы» у автотракторных ДВС;

– благодаря автоматизированной системе контроля тепловой режим тепловозных дизелей ближе к оптимальному, чем у автотракторных ДВС;

– срок службы моторных масел автотракторных ДВС – от 250 до 500 ч, а у тепловозных дизелей – от 750 до 2000 ч и более;

– формулы (5.1–5.3) не учитывают изменение скорости изнашивания деталей ДВС и скорости поступления продуктов изнашивания в моторное масло от случайных по времени и количеству проникновений загрязнений масла из воздушной пыли и грязи окружающей среды.

На рис. 5.3 приведен пример зависимости концентрации металлов в моторном масле от содержания кремния [30, 36].

Важным фактором является снижение рабочих свойств масел из-за их обводнения, возникающего при неисправностях уплотнений стыков головок цилиндров с блоком, уплотнений в системе охлаждения, при дефектах гильз, головок и блока цилиндров. Обводнение вызывает гидролиз присадок к маслам, потерю ими рабочих функций, что повышает износ деталей ДВС до аварийного. Кроме того, следует учитывать и различие антиизносных и антикоррозионных свойств свежих масел различных поставок. Так, во ВНИИ НП, ГНУ ВИМ, ГНУ ВНИИТиН, ГосНИИ-25 имеются многочисленные данные о несоответствии моторных характеристик отечественных масел М-10Г₂, М-12Г₂, М-10ДМ требованиям ГОСТ 8581.

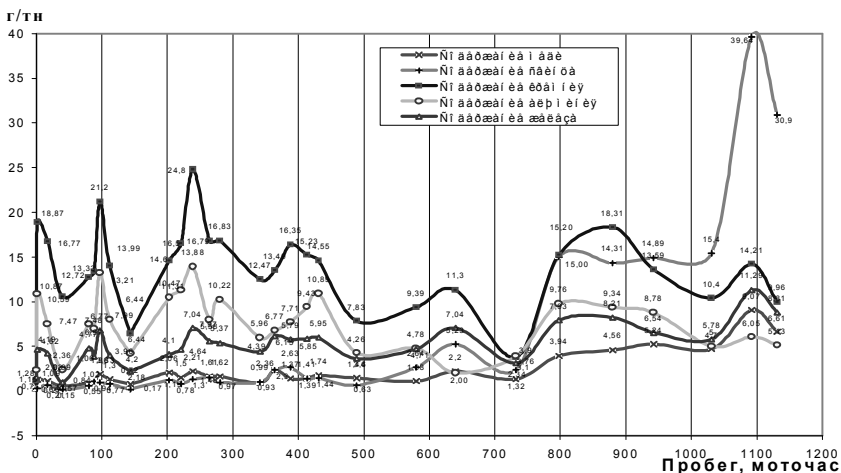


Рис. 5.3. График зависимости концентрации металлов от содержания кремния в моторном масле API CG-4 SAE 15W-40 по наработке дизеля КТА-38С: содержание кремния, определяющего концентрацию всех металлов; алюминия; железа; свинца (достигло 40 г/т, что стало основанием для смены масла); хрома

Как показала практика многочисленных спектральных анализов моторного масла автомобилей, тракторов, тепловозов, легкового автотранспорта и дорожно-строительных машин, гипотеза пионеров спектрального анализа о соответствии износостойкости деталей ДВС и интенсивности их изнашивания величинам концентрации примесей в масле для диагностирования автотракторных ДВС нуждается в уточнении. Это объясняется следующими факторами:

1. Концентрация в маслах продуктов изнашивания резко увеличивается с поступлением в масла кремния и воды, а с полной очисткой системы смазки от загрязнений и воды – значительно уменьшается и практически сразу возвращается на благоприятный уровень.

Работавшее масло тепловозов содержит механические примеси с размером частиц в основном до 1 мкм и незначительно – частиц до 10 мкм, когда 70–80 % частиц имеют размеры не более 2–3 мкм и не вызывают повышенного износа сопряжений. В отложениях на бумажных фильтрах большинство частиц размером до 3 мкм, меньшее количество – 5–20 мкм и незначительное количество – 20–30 мкм. В отложениях центрифуг частицы несколько крупнее.

По данным ГОСНИТИ и НАМИ, размеры абразивных частиц в маслах автотракторных ДВС значительно выше. Длительность пребывания частиц в масле при работе фильтров и центрифуги в автотракторных ДВС составляет 4–5 ч. За это время частицы могут несколько десятков раз пройти через сопряжения трения, поэтому считается, что вероятность абразивного изнашивания в автотракторном дизеле достаточно велика и в общем износе ЦПГ и КШМ его доля, по данным М. А. Григорьева (НАМИ), составляет более 60 % [19, 20].

Кроме того, фильтры тонкой очистки, очищая масла от органических примесей, способствуют сохранению склонности автотракторных масел к образованию коррозионно-активных кислородо-содержащих соединений и лакообразованию на горячих деталях ДВС. В НАМИ экспериментально установлено, что с включением центробежных фильтров тонкой очистки окисление масла с его распылением усиливается.

Нефорсированные тепловозные дизели без заметного повышения изнашивания могут нормально работать без смены масла 90–100 тыс. км, или 3700–4200 ч, в то время как в тракторных дизелях (ГОСТ 20793) заменяют масло не позже 480 ч, т. е. в 7,5–8,5 раз чаще, а в современных транспортных дизелях (например, автосамосвалов) – не позже 650–1200 ч.

Тепловозные дизели работают при концентрации примесей в окружающей среде не более 1 мг/м^3 без заметного ухудшения работы системы очистки масла и повышения износа. Тракторные и комбайновые дизели работают при содержании пыли в воздухе до $1,5 \text{ г/м}^3$, т. е. запыленность воздуха в 1500 раз больше.

Так, по данным А. С. Матвеева (МФ ГОСНИТИ [69]), пылесодержание воздуха при работе тракторов еще больше, в пределах $0,04\text{--}5,0 \text{ г/м}^3$, при этом от $\frac{2}{3}$ до $\frac{5}{8}$ всего количества пыли состоит из неорганических веществ. Из них над супесчаными почвами в воздушной пыли только 7–10 % частиц имеют размеры до 5 мкм, над суглинистыми почвами – до 30 %, над суглинистыми черноземами – не более 35 %, а остальные частицы имеют больший размер. В пылевом облаке имеются частицы размером до 70–80 мкм и даже до 100 мкм. В целом в зависимости от структуры почвы 25–90 % частиц имеет размеры от 5 до 50 мкм.

Основными твердыми частицами пыли являются кварц, полевые шпаты и оксид алюминия, имеющие твердость в 2–3 раза выше

твердости сталей ШХ-15, 18ХГТ (1050–1225 НВ – для кварца, 2090–2290 – для оксида алюминия против 550–639 НВ для обеих марок стали (рис. 5.4). Так как твердость частиц пыли в несколько раз выше твердости деталей ЦПГ и КШМ, имеет место повышенное изнашивание ДВС [123].

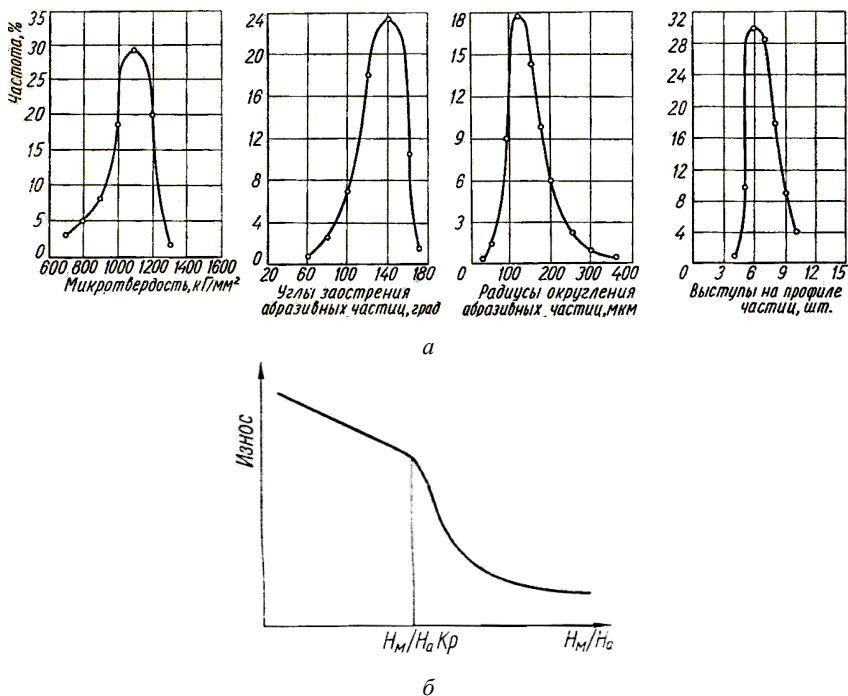


Рис. 5.4. Характеристики почвенных абразивных частиц (а) и зависимость износоустойчивости деталей от величины соотношения твердостей металла и абразива H_M/H_a (б) (по данным ВИСХОМ [123])

2. При исправной в автотракторных ДВС системе очистки масла концентрация примесей в масле снижается, а при неисправной – завышается.

3. Низкокачественные моторные масла, применяемые в связи с непостоянством поставок качественных масел, а также общим ухудшением качества всех отечественных моторных масел, ухудшают противоизносные свойства сопряжений ДВС, что искажает характеристику их технического состояния.

4. Масла с высокими моющими свойствами несколько повышают концентрацию примесей в маслах.

5. Вариация условий работы по нагрузочно-скоростному режиму и окружающей среде (запыленный ветер, грязные дороги, загрязнение машин и их моторов) искажает характеристику износостойкости сопряжений ДВС по концентрации металлов в масле.

6. Вариация вязкости свежих моторных масел, наличие в работавшем масле топлива также искажает характеристику износостойкости сопряжений ДВС. В более вязких маслах концентрация примесей снижается, а в разжиженных маслах механические примеси в неработающем ДВС могут оседать в шлам.

7. Некоторые, порой свежие, масла имеют повышенную коррозионность к цветным металлам, в т. ч. к свинцу (рис. 5.5) и меди вкладышей подшипников КШМ (см. п. 7 таблицы показателей масел – п 2.2. ГОСТ 8581–78), что не связано со снижением износостойкости деталей дизелей. По мере снижения щелочного числа повышается общее изнашивание деталей ДВС (рис. 5.6).



Рис. 5.5. Динамика содержания свинца в моторном масле «Квалитет» CF-4/SG 15W-40 дизеля КТА-38 (Cummins); анализом во ВНИИ НП по методике ГОСТ 20502–75 подтверждена предельная коррозионность масла класса $\Gamma_2 - 20 \text{ г/м}^2$; для масел класса Γ_{2K} коррозионность не допускается

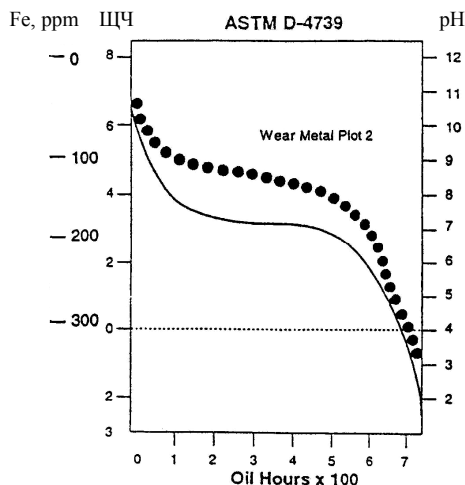


Рис. 5.6. График зависимости относительной износостойкости деталей ДВС от ЩЧ моторного масла (по данным фирмы «Лубризол»), шкалы слева направо: содержание железа в масле и ЩЧ, значение pH спиртовой вытяжки масла (хорошо видна обратная корреляция содержания железа с pH масла)

8. При нормальном трении изнашиваются не сами поверхности деталей, а их поверхностные пленки, образованные, например, присадками. Поэтому появление в продуктах износа частиц самих металлов означает, что разрушены антифрикционные масляные пленки и произошел непосредственный контакт металлов трибопары. При этом могут образовываться крупные частицы износа, которые не выявляются спектроскопией. Так, на установках МФС-7М надежно обнаруживаются частицы износа размером только до 20 мкм, а рентгено-флуоресцентные спектрометры выявляют наличие всех частиц. Спектрометрия может не показать четкой зависимости содержания некоторых металлов в пробах масла в нестандартных трибологических условиях: при аварийном изнашивании шатунных подшипников феррография регистрирует рост числа крупных частиц, а спектроскопия этого не выявляет. Это обуславливает необходимость анализа динамики накопления частиц износа в работающем масле в совокупности с другими методами и контролем изменения физико-химических показателей масла. Важно контролировать форму и размеры частиц износа основных пар трения, обусловленные разными процессами изнашивания.

По результатам спектрального анализа масел перед определением интенсивности изнашивания ДВС следует учитывать: концентрацию в масле кремния и воды; класс качества и фактические рабочие свойства масла; наличие в масле дизтоплива по температуре вспышки; вязкость масла. Окончательный вывод о исправности и работоспособности ДВС необходимо делать только после повторного спектрального анализа и сравнения концентрации металлов до и после очистки или смены масла.

Таким образом, концентрации металлов в моторных маслах могут не соответствовать не только реальной износостойкости сопряжений ДВС, но и интенсивности их изнашивания.

К анализу гипотезы по обоснованию норм содержания мехпримесей в маслах добавлен анализ результатов эмпирического обоснования этих норм в ЦНИИ МПС, НАМИ, ГОСНИТИ, ИГД им. А. А. Скочинского, УТМЗ, МАДИ, в фирме «Лубризол» и в лаборатории ТСМ при АТП угольного разреза Томусинский Кемеровской области.

ГОСНИТИ – один из немногих пионеров спектрального анализа масел для диагностирования тракторных дизелей. Исследования [92] проведены в начале 70-х гг. на одном из первых в Европе квантометров Е-790 английской фирмы Hilger, режимы работы которого приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Сравнение режимов прожига проб моторных масел на квантометре Е-790 (по данным [92]) и установке МФС-7М (по данным ГОСНИТИ)

Показатель	Ед. изм.	Прибор	
		Квантометр Е-790	Установка МФС-7М
Сила тока в дуге	А	6,5	1,8–2
Частота вращения электрода	мин ⁻¹	4	10
Зазор между электродами дуги	мм	2	1,2–1,5
Время обжига чистых электродов	с	30	50
Время прожига проб	с	90	30
Время экспозиции эмиссии фотонов от атомов химэлементов	с	90; при прожиге проб	20; после прожиге проб
Полное время работы квантометра	с	120	100
Глубина погружения в масло: – электрода; – кварцевого диска под электродом	мм	1 –	– 3

Прожиг проб масел на квантометре Е-790 проводился методом вращающегося электрода, а проб продуктов износа в отложениях фильтров и центрифуг – с использованием брикетирования проб в электрод размером 13,5×3×2,5 мм с добавлением в пробы графитового порошка и фтористого лития в соотношении 1:3:1 с последующим анализом по методу вращающегося электрода.

Величины износа гильз по данным спектрального анализа сопоставлялись с данными микрометража (расхождение не превышало 9 %); компрессионных колец – с их взвешиванием и с износом серебряных вставок (не превышало 12,6 %); коленчатого вала – с измерениями методом «вырезанных лунок» (не превышало 8,3 %); алюминиевых поршней – с данными микрометража (не превышало 11,2 %).

По результатам исследований автором работы [92] установлено, что в изношенном железе доля гильз и колец составляла 77–78 %, а коленчатого вала – 4,5–5,3 %. В изношенном хrome доля хромового покрытия поршневых колец составляла 81 %, а в изношенном алюминии доля поршней – 84–89 %. Из изношенного железа в масле находилось 55–64 %, а в отложениях центрифуг – 36–45 %. Из изношенного хрома в масле было 72–79 %, а в отложениях центрифуг – 21–28 %. Через 30 ч стендовых испытаний концентрация в масле хрома уменьшалась из-за полного износа хромового покрытия поршневых колец.

Концентрация железа в маслах составляла:

- 23–50 ppm – в новых двигателях;
- 40–95 ppm – в двигателях, прошедших текущий ремонт;
- 80–180 ppm – в двигателях, прошедших капитальный ремонт.

Концентрация алюминия соответственно составляла:

- 3,5–4,1 ppm – в новых двигателях;
- 5,5–8,0 ppm – в двигателях, прошедших текущий ремонт;
- 6–10 ppm – в двигателях, прошедших капитальный ремонт.

Содержание кремния в масле тракторов было примерно одинаковым: 4–8 ppm в осенне-зимний период и до 15 ppm в летний. По мере наработки на рост концентрации металлов оказало влияние техническое состояние дизелей, условия работы тракторов и качество ТСМ. В то же время установлена линейная связь между концентрациями кремния с одной стороны, железа и алюминия – с другой. Концентрация кремния оказывала некоторое влияние

на изнашивание ЦПГ и содержание в масле металлов, а решающее ее влияние выявлено в СП «Эрдэнэт».

Исследования позволили отметить, что диагностическими параметрами в моторных маслах после длительной эксплуатации дизелей являются стабилизированный уровень содержания железа, а для агрегатов силовой передачи – не уровень, а скорость накопления металлов. Последнее обусловлено тем, что саморегуляция концентрации примесей в маслах агрегатов силовых передач затруднена, а в агрегатах без фильтрации масел невозможна.

Серьезным недостатком исследований ЛСХИ и ПСХИ является отсутствие учета влияния загрязнения масел абразивными мехпримесями (Si) на изнашивание деталей агрегатов и на накопление металлов в их маслах.

Ведущие организации спектрального анализа все же ориентируются на общий тренд изменения содержания мехпримесей (рис. 5.7).

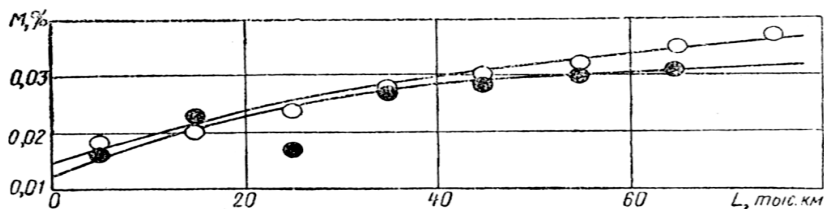


Рис. 5.7. Тренд содержания мехпримесей в моторных маслах тепловозных дизелей: светлые точки – при штатной системе очистки масла, темные – при усовершенствованной системе [141]

5.3. Обоснование нормативов содержания металлов и кремния в работавших маслах автотракторных дизелей

Первоначальными нормативами для спектрального анализа моторных масел установкой МФС-7М были ориентировочные данные, строго привязанные к сочетаниям «марка дизеля – марка масла». Такое положение требовало калибровки установки МФС-7М на каждое такое сочетание и обоснование нормативов спектрального и физико-химического анализов по каждому такому сочетанию, что резко усложняло работу лабораторий производственного контроля ТСМ.

В связи с этим исследованиями ГОСНИТИ был проведен анализ физико-химических показателей отечественных моторных масел по данным комплекса российских стандартов общего плана, литературным данным и комплекса стандартов контроля конкретных показателей масел. Главное внимание было обращено на диапазон значений конституционных параметров моторных масел и на методы их определения.

Кроме того, в период освоения установки по программам «дизель РА4V-185 “Пилстик” – масло М-14В₂», «дизель 6ДМ-21А – масло “Шелл Римула Х”», «дизель 8ЧН26/26 – масло “Мобил”» в течение года проводился спектральный анализ масел карьерных автосамосвалов технологического транспорта СП «Эрдэнэт» с дизелями ЯМЗ-240М, ЯМЗ-240НМ, ЯМЗ-240П, 6ДМ-21А, 8ДМ-21А. Сравнивались конструктивные особенности дизелей 8ДМ-21А УТМЗ, дизелей автосамосвалов САТ 785В, Comatsy 785HD, ЯМЗ-240, ЯМЗ-840, «Пилстик» РА4V-185 и др.

Определены диапазоны значений стандартных показателей масел фирм «Шелл», «Мобил», «Мобил-Корея», «Мотюль», «Эссо», «Калтекс», LG, ZIC при их различных торговых марках, поставлявшихся из Европы, а также отечественных масел М-12В₂, М-14В₂, М-14Г₂, М-14ДМ, М-16В₂, М-16Г₂, М-18В₂, МС-20 от предприятий России: НУНПЗ, АНХК, «Перьморгсинтез», «Нижегородоргсинтез», «ЛукойлВолгоградоргсинтез», масел из г. Фергана, Московского опытного нефтемаслозавода ВНИИ НП и др. Импортные масла соответствовали классам качества СС, CD, CF-4, CG-4 по API с вязкостью классов по SAE 10W-30, 15W-40. Результаты анализа масел сведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Диапазон значений основных показателей наиболее употребляемых моторных масел

Показатель	Значение
Класс качества	СС, CD, CG-4
ЩЧ, мг КОН/г	4,8–7, 7–10,4
Вязкость при 100 °С сСт	12,5–13,5, 14,1–14,8
Индекс вязкости	90–95, 110–130

Показатель	Значение
Температура вспышки, °С	217–234
Коррозионность по ГОСТ 20502–75, г/м ²	до 20
Массовая доля Са, Ва, Р, Zn, %	0,07–0,45

Конструктивные параметры дизелей 8ДМ-21А, «Пилстик» РА4-185, дизелей автосамосвалов Caterpillar и Comatsu, стали, применяемые для деталей ЦПГ, КШМ и ГРМ, по примерным оценкам, больших различий по химическому составу и физико-механическим показателям не имели.

Коэффициенты напряженности работы масел вычислялись по коэффициентам НАТИ [2]:

$$A = [G_T / (Fin)](N_e / G_M) K_a K_b K_s K_p K_T, \quad (5.4)$$

где G_T – часовой расход топлива дизелем на номинальной мощности, кг/ч; F – площадь поверхности деталей ЦПГ, омываемой маслом, м²; i – число цилиндров дизеля; n – номинальная частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹; N_e – номинальная эффективная мощность дизеля, кВт; G_M – объем масла в мокром картере дизеля или в его маслобаке; K_a , K_b , K_s , K_p , K_T – коэффициенты влияния факторов работы дизеля на жесткость условий работы масла соответственно по давлению наддува (1–1,4), эффективности охлаждения (1–1,5); содержанию серы в топливе (1–2,5); периодичности смены масла (1–1,6); изношенности дизеля по отношению фактического расхода картерных газов дизеля к его номинальному значению.

По расчетам ГОСНИТИ, коэффициент А для дизелей ЯМЗ составлял 350–450, а для дизелей 8ДМ-21А и самосвалов САТ 785В находился в диапазоне 540–650 с меньшими значениями для отечественного дизеля. Удельная мощность этих дизелей – 27–33 л. с./л.

Установлено, что для дизельных масел марок М-14В₂, М-14Г₂, М-16В₂, М-14ДМ, масел фирм «Шелл», «Мобил», «Калтекс», программы для разных сочетаний «дизель–масло» дают значения концентрации металлов в работавших маслах не в зависимости от сочетания «дизель–масло», а в основном в зависимости от содержания в масле кремния, воды и топлива.

В качестве факторов для нормирования концентрации металлов в работавших маслах неаварийных дизелей определены следующие исходные показатели масел и ДВС:

- ЩЧ масла с двумя его градациями: 5–7 и более 8 мг КОН/г;
- эффективность работы системы очистки масла, содержащая фильтры грубой очистки, полнопоточные бумажные фильтры, фильтр центробежной очистки масла;
- наличие сухого картера с отдельным маслобаком;
- наличие системы предпусковой прокачки подогреваемого масла;
- конструктивные параметры ДВС, определяющие его износостойкость, мало меняющиеся в этом плане для их модификаций;
- вязкость масла при 100 °С с градациями 6–8, 10–12, 13–15,5 и 18–22 сСт.

Параметры работавших масел, определяющие содержание в них металлов:

– содержание кремния в свежих маслах – до 5 ppm, в работавших – до 45 ppm; коэффициент корреляции содержания меди, свинца и олова от содержания кремния достигал 0,90, содержания хрома, алюминия и железа – 0,80, никеля и молибдена – 0,75, а для титана, марганца и сурьмы такая связь не выявлена, и от контроля этих металлов решено было отказаться;

– содержание воды в свежих маслах – до 0,08 %, а в работавших – до 1,5 %, где в отдельных случаях выделялась подтоварная вода;

– снижение вязкости масел – до 6–8 сСт, температура вспышки в открытом тигле – ниже 150 °С;

– ЩЧ масла при снижении которого с 7–10 до 4 мг КОН/г ускоряются процессы изнашивания; как правило, масла в АТП СП «Эрдэнэт» заменяли по ухудшению других их показателей (загрязненность, обводненность), поэтому уменьшение ЩЧ на износостойкость дизелей существенного влияния не оказывало. В других условиях, у сельских товаропроизводителей, особенно в зимний период эксплуатации с малой запыленностью и малой загрязненностью дизеля, первичным влиянием может оказаться снижение ЩЧ масла.

Таким образом, определение нормативов концентрации металлов – продуктов изнашивания и кремния в моторных маслах проведено исследователями ГОСНИТИ за 10-летний период на основании спектрального анализа масел 162 автотракторных

и транспортных дизелей марок ЯМЗ-240Б, ЯМЗ-240М, ЯМЗ-240НМ, ЯМЗ-240П, КамАЗ-740, ЯМЗ-840.10, Д-160Б, 6РА4V-185, 8ДМ-21А, 8СН26/26, Cummins КТА-19, КТА-38, КТА-50, RABA-MAN D-2156U. Отдельно анализировались дизели тепловозов ТЭЗ, автосамосвалов Caterpillar САТ 785В и Comatsy 785HD, ДСМ, а также бензиновых моторов автобусов ЛиАЗ-677, чешских автобусов «Кароса», легкового транспорта.

При анализе накопленных результатов по прожигу масел в количестве примерно 11 700 плановых и примерно 1000 внеплановых было выявлено, что среднестатистические значения концентрации металлов во всех дизелях при их нормальной эксплуатации и своевременном ТО имеют небольшое рассеивание, хотя у дизелей ДСМ и тепловозов выявлялись аварийные концентрации, в основном кремния и металлов ЦПГ.

Анализ статистических и литературных данных позволил установить значения норм концентрации металлов: номинальных – для новых и отремонтированных дизелей, допускаемых при их ТО, предельных – для безусловной смены масла и ревизии дизелей:

- по Fe, Al, Cr – для оценки ЦПГ;
- по Pb, Cu, Sn – для подшипников коленчатого вала;
- по Ni, Mo – для ГРМ и деталей приводов дизеля;
- по Si как самой опасной для ДВС примеси в маслах;
- по Ca, Ba – основным элементов присадок к маслам.

От контроля Mn, Ti и Sb пришлось отказаться из-за нестабильности и незначительных величин их концентрации в работавших маслах.

Аналогичный аналитико-статистический подход, но для определения предельных величин, применяли ведущие исследователи спектрального анализа для автомобильных, тепловозных и судовых дизелей, когда регистрировали номинальные значения и концентрацию, характерные для явных аварийных неисправностей.

Определены и номинальные значения показателей свежих масел по фактическим значениям их анализа. Результаты обоснования нормативов для мобильной автотракторной техники приведены в табл. 5.3, а для дизелей технологического транспорта с маслами классов качества CF-4/SG, CG-4 и класса вязкости 15W-40 – в табл. 5.4.

Таблица 5.3

Нормативы контроля рабочих и спектральных параметров масел для автотракторной техники

Параметры масел	Масла											
	моторные				трансмиссионные				гидравлические			
	Ном	Доп	Пред	ПЛ	Ном	Доп	Пред	ПЛ	Ном	Доп	Пред	ПЛ
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>
Температура вспышки, °С	> 205	> 185	> 170	170	По пас- порту	90 %	80 %	–	По пас- порту	90 %	85 %	–
Содержание воды, %	Следы	< 0,15	< 0,3	0,5	Следы	< 0,3	< 0,5	–	Следы	< 0,15	< 0,3	–
Моюще-диспергирующие свойства, баллы	0	< 3	< 6	–	1–2	3–4	< 6	–	–	–	–	–
Вязкость, % от паспортных значений												
– при 100 °С	По пас- порту	80–120	75–135	75–135	По пас- порту	90–130	80–150	–	По пас- порту	90–110	90–125	–
– при 50 °С	–	–	–	–		90–130	90–150	–		90–110	90–125	–
– при 40 °С	–	–	–	–		–	–	–		90–110	90–125	–
ЩЧ, мг КОН/г	> 8	> 5	> 4	2	1–3	1–2	< 0,5	–	–	–	–	–
Оптическая плотность, %	< 0,15	< 1,5	< 2,5	–	0,15–0,40	< 2,5	< 3,5	–	< 0,12	< 0,18	< 0,25	–
Содержание металлов*: Fe (200)	3–5	50	65	100	3–5	150	200	500	1–2	10–15	15–20	75
Cr (30)	0,3	3,5	5,5	25	0,5	5–10	25	10	0,5	1	5	10
Al (200)	2	15	25	30	3	5	15	100	2	5	15	50

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Si (200)	3–5	20	25	20	3	35	50	40	1–2	5	10	–
Pb (200)	0,5	5	15	40	–	–	–	300	0,5	1	2	20
Cu (200)	–	10–15	20–25	50	–	30	50	300	–	3–5	15	50
Sn (30)	–	1,5	2,0	25	–	1	2	20	–	1	2	10
Ni (30)	–	1,5	1,8	10	–	15	25	20	–	1,2	2	5
Mo** (30)	–	1,5*	2,0*	–	–	5	15	–	–	1	1,5	–

Примечания: Ном – номинальные значения для свежих масел; Доп – значения параметров, при которых масло допускается в эксплуатацию на очередной межконтрольный период; Пред – браковочные значения, при которых масло подлежит замене на свежее; ПЛ – браковочные нормы, соответствующие аварийному состоянию американских машин (по данным фирмы «Лубризол»); * – пределы измерения установкой МФС-7М; ** – для масел без присадок с молибденом.

Таблица 5.4

Допускаемые значения рабочих и спектральных параметров работавших смазочных масел для исследованных объектов

Показатель	8ДМ-21А	КТА-19	КТА-38	КТА-50	ЯМЗ-240	Бензин	Дизель	Гидро-масло	Трансмиссионные	Тепло-возы ТЭМ	Автобусы «Кароса»	Свежее масло
$T_{всп}, ^\circ\text{C}$	180–240	180–240	180–240	180–240	170–250	160–200	180–240	170–230	150–250	180–240	180–250	200–240
$\text{H}_2\text{O}, \%$	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,05	0,3	0,3	0,2	0,05
ДСС, баллов	6	6	6	6	6	6	6	1,5	6	6	6	0,4
$\nu, \text{сСт}$	12–17,5	10,5–16,5	10,5–16,5	10,5–16,5	12–17	8–14	8–14	6–12	25–35	12–16,5	10–14	13–16
ЩЧ	4–12	4–12	4–12	4–12	3–12	4–12	4–12	2	1	3–10	4–10	7–12
ИЗЖ, %	0,15–2,65	0,15–1,85	0,15–1,85	2,15	2,15	2,65	2,15	0,1–0,4	3,65	3,12	2,65	0,1–0,2
Fe, г/т	80	60	65	75	75	45	60	30	150	150	80	6
Сг, г/т	3,5	3,5	3,5	3,5	4	3,5	3	1,5	5	5	4	0,5

Показатель	8ДМ-21А	КТА-19	КТА-38	КТА-50	ЯМЗ-240	Бензин	Дизель	Гидро-масло	Трансмиссионные	Тепловозы ТЭМ	Автобусы «Кароса»	Свежее масло
Al, г/т	20	20	18	20	20	15	15	25–30	5	40	25	5
Si, г/т	25	25	25	25	25	25	25	5	35	20	25	3
Pb, г/т	4	12	20	20	5	15	3,5	1	2	30	5	0,5
Cu, г/т	10	15	20	20	15	10	15	30	10	80	20	1
Sn, г/т	1,6	1	1,8	1,8	2	2	1,5	0,5	1,5	2	1,6	0,5
Ni, г/т	1	1	1,5	1,5	1,2	1,5	1,5	1	5	2	1,8	0,2
Mo, г/т	5	6	6	6	5	5	5	1	2	5	2	6
Ср. сл., ч*	500	1000	1000	1000	500	1000	1000	2000	1500	800	750	–

Примечания: по молибдену заданы не нормативы, а значения, исключаяющие влияние показателей содержания этого металла в присадках к маслу на результаты спектрального анализа масла. *Средние сроки службы масла, соответствующие нормальной эксплуатации автомобилей. Содержание металлов Са и Ва (основы моюще-диспергирующих присадок к маслам) детально не проработано, экспертно анализировались данные прожигов масел.

Сложнее оказалось установить нормы содержания кремния. Имелось большое разнообразие предельных его концентраций для выбраковки масел: 4–8 г/т зимой и 15 г/т летом для тракторных дизелей по ГОСНИТИ, 10 г/т по ПО «БелАЗ» и фирме Cummins, 30 г/т по ЯМЗ и последним данным НАМИ, но в основном 20 г/т по нормам НАМИ 1984 г., ИГД им. А. А. Скочинского, ЦНИИ МПС и фирмы «Лубризол». Начав выбраковку масел в АТП СП «Эрдэнэт» с нормы 1 г/т, принимая во внимание нормы по другим источникам, учитывая динамику фактического содержания кремния в маслах дизелей 8ДМ, ЯМЗ, Cummins, Caterpillar, Comatsu и других, анализируя зависимости величин угара масла и ресурса ЦПГ дизелей, зависимости концентрации металлов от содержания кремния, постепенно увеличивали эту норму, остановившись на значении 25 г/т. При такой норме устанавливались приемлемые безаварийные показатели работоспособности дизелей: угар моторного дизелей 8ДМ-21А – 0,1–3,0 %, дизелей КТА-38, КТА-50 – 0,05–2,0 %, среднесуточная наработка – 20,5 ч, среднесуточный объем перевозок 6–8 тыс. т (15–20 тыс. т·км), средний ресурс до текущего ремонта – 15–17 тыс. ч для дизелей 8ДМ-21А и 55–65 тыс. ч для дизелей Cummins КТА-38, КТА-50.

Загрязняющие примеси, находящиеся в масле, не только вызывают повышенный износ пар трения, но и приводят к их задиру и выходу из строя, а также уменьшают срок службы масла из-за необходимости повысить его чистоту. Поэтому предотвращение или значительное уменьшение загрязненности масел и абразивного изнашивания, определяемого спектральным анализом (единственным методом выявления причин повышенного изнашивания агрегатов), является значительным средством повышения ресурса моторов. Обеспечение высокого уровня технической эксплуатации машин, качественного проведения ТО систем очистки масла и воздуха по результатам диагностирования с проверкой герметичности уплотнений этих систем, устранением всех неисправностей и введением дополнительных защитных средств – неотложная задача предприятий, особенно имеющих дорогие импортные машины в любой отрасли, в т. ч. в АПК.

Точное обоснование нормативов содержания кремния является актуальным, т. к., по НАМИ, ресурс ДВС на 80 % обусловлен износом деталей, а износ, вызываемый абразивным изнашиванием, равен в среднем 60 % общего износа при эксплуатации дизелей в зоне с относительно небольшой запыленностью воздуха и на 80 % в зоне с повышенной запыленностью, к которой можно отнести полевые работы сельскохозяйственных тракторов, комбайнов и ДСМ.

Однако это обоснование требует длительных многоплановых исследований из-за специфики проявления мехпримесей. Так, неорганические мехпримеси, имеющиеся в небольшом количестве, мягкие, пластичные, в сопряжениях трения не производят абразивного действия. Но очень вредны твердые как минеральные, так и металлические частицы, обладающие истирающими свойствами [14, 19, 20, 69].

Считается, что абразивные частицы размером до 5 мкм не истирают поверхности трения, а лишь полируют их. Частицы же более 15 мкм уже участвуют в процессе изнашивания, а основную роль в изнашивании выполняют более крупные частицы – размером до 50 мкм. Кроме того, абразивные частицы менее 1 мкм, имея большую развитую поверхность, адсорбируя на себе продукты окисления масла, снижают интенсивность изнашивания, выполняя роль промежуточных тел скольжения и качения или же противоизносных и антифрикционных добавок, препятствуя непосредственному контакту поверхностей деталей.

Отсюда следует, что, не зная гранулометрический состав мехпримесей и их абразивные свойства, нельзя однозначно оценить их вредное влияние на ДВС и задать их норматив. Нужно учитывать и переменную интенсивность работы систем очистки масла, т. е. нормативы концентрации кремния должны быть различными не только для разных ДВС, но и для различных условий их эксплуатации. Например, для ДВС с интенсивной работой системы очистки масла эти нормативы должны быть меньше, а для других – несколько больше.

До сих пор нет общепринятого оперативного способа оценки мехпримесей по их действию в сопряжениях ДВС. Стандартное определение только количества мехпримесей в маслах основано на измерении веса нерастворимого осадка на фильтре после фильтрации через него навески масла, разбавленного растворителем. При этой длительной и кропотливой процедуре, неприемлемой для производственных условий, получают завышенные до трех раз показания из-за адсорбции на минеральных частицах органических соединений масла и различных продуктов его последовательного окисления. Также предлагалось для выделения опасных мехпримесей определять нерастворимый осадок от сжигания всей массы фильтрата. Другая оценка мехпримесей, по НАМИ, основана на определении соотношения их общей массы А к массе крупнодисперсной фазы Б после их разделения центрифугированием, где отношение $A / B \leq 2$ является критическим. Однако эти методы

не определяют абразивность мехпримесей, что является более важным, чем определение их концентрации.

Известен прием экспресс-оценки абразивности мехпримесей при истирании ими стальных оксидированных пластинок до появления светлых полосок с оценкой их яркости, ширины и глубины рисок (по В. М. Михлину). Но этот качественный прием пригоден лишь для выявления большой загрязненности пластичных смазок крупными минеральными частицами.

Для оценки достоверности спектрального анализа на загрязненность моторных масел по кремнию следует учитывать следующее:

- по данным ОКБ «Спектр», в дугу сжигания масла вязкостью 14 сСт попадают минеральные и металлические частицы размером не более 20 мкм. С маслами меньшей вязкости будут попадать еще менее крупные частицы;

- по литературным и нормативным материалам, бумажные маслофильтры отфильтровывают частицы размером более 25–30 мкм, в основном более 40 мкм.

Таким образом, для масел вязкостью 14 сСт частицы фракции до 5 мкм, попадающие в дугу, для износа ДВС незначимы; частицы 5–15 мкм для ДВС малозначимы; частицы 15–20 мкм, участвующие в изнашивании ДВС, попадают в дугу; частицы 20–30 мкм и более, которые могут составлять значительную долю самых опасных минеральных загрязнений, в дугу почти не попадают, а при случайном попадании принимаются на фоне обычных показаний за случайные выбросы и исключаются из анализа как ошибки.

Например, при контроле загрязненности работавшего около 800 ч моторного масла CF-4/SG дизеля Cummins KTA-38 на автосамосвале БелАЗ-75145 прибором ПКЖ-904А по результатам 17 проливок масла получен усредненный фракционный состав мехпримесей (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Гранулометрический состав мехпримесей в моторном масле «Квалитет», отработавшем 800 ч в дизеле Cummins KTA-38 а/с БелАЗ-75145, выявленный с помощью прибора ПКЖ-904А

Средний размер частиц, мкм	5–10	10–25	25–50	50–100	100–200	более 200
Число частиц	11	около 500	1057	2190	5129	993
	(0,11 %)	(5,33 %)	(11,28 %)	(23,77 %)	(54,74 %)	(10,6 %)

Анализ проведен по мехпримесям органического и неорганического состава, тем не менее их распределение с очень большим количеством крупных частиц вызывает вопросы, высока ли достоверность контроля по кремнию загрязненности моторных масел вязкостью 14 сСт и менее, правильно ли готовятся образцы масел с нормированным содержанием химэлементов, не следует ли отсюда, что не все работавшие масла подлежат качественному анализу, но хорошо пригодны для анализа свежие и малоработавшие масла.

Несоответствие между эталонными и работавшими маслами по составу частиц абразивных минеральных загрязнений (кремнезем, алюмосиликаты и др.) для дуги штатива установок МФС характерно также и для частичек стали (продукты износа зубчатых колес приводов ДВС), а при аварийном изнашивании – и для частичек алюминиевых сплавов поршней и медных сплавов подшипников КШМ, полностью выпадающих в осадок. Так как при этом может быть пропущено предаварийное состояние, эти обстоятельства требуют дополнительных методов и средств контроля.

Лучшая ситуация наблюдается при анализе более вязких масел, например трансмиссионных, но при соответствующей калибровке установки МФС-7М.

Как отмечено М. А. Григорьевым [19, 20], установление величин допустимой при ТО и предельной концентраций металлов (индикаторов износа) и кремния как индикатора загрязнения масла даже для одной модели ДВС является сложной и трудоемкой задачей. Поэтому установление их ориентировочных значений (по статистическим данным и результатам наблюдений за работой ДВС) должно сочетаться с анализом динамики концентрации индикаторов и их взаимосвязями. Для этого в разработанной технологической карте спектрального анализа приведены некоторые разъяснения, рекомендации и важное требование обязательного и полного единообразия выполнения всех без исключения работ для анализов. Особенно необходим единообразный и правильный забор пробы масла через чистые сливные отверстия чистым инструментом с обязательным сливом донного отстоя не менее 300 мл. Из-за трудности взятия пробы это требование может нарушаться, тогда результаты анализа не будут достоверны.

В математическом плане задача установления нормативных значений параметров состояния масла может быть облегчена компьютерной программой «Турбонэк» В. М. Михлина, основавшего в 70-х гг. новое научное направление – управление надежностью машин

и оборудования через обоснование допускаемых при ТО и предельных в эксплуатации и ремонте значений ресурсных параметров агрегатов. Проведение такого исследования для основных индикаторов состояния ДВС и масла, например кремния, является не только актуальной научно-технической задачей, но и позволит в дальнейшем аналогичным образом решать и другие задачи совершенствования системы ТО и ремонта автотракторной техники.

Таким образом, основными результатами спектрального анализа масел для МТП АПК должны являться концентрации таких химэлементов:

– Fe, Al, Cr – показатели темпа изнашивания ЦПГ ДВС отдельно по гильзе (Fe), поршням (Al) и компрессионным кольцам (Cr). Анализ причин повышенной скорости изнашивания составных частей дизеля проводят с учетом концентрации в масле абразивных примесей по содержанию кремния (Si, см. рис. 5.2);

– Cu, Pb, Sn – то же по подшипникам коленвала. Следует принимать во внимание показатели «капельной пробы» масла, загрязненности абразивами (см. рис. 5.2), обводненности и коррозионности (см. рис. 5.4) масла, период работы дизеля (обкатка после изготовления, ремонта, когда концентрации Sn и Pb естественно повышены, или длительная эксплуатация). Повышенная концентрация Pb и Sn свидетельствует о повышенном изнашивании подшипников КШМ, а повышенная концентрация Cu – об изнашивании уже основного тела подшипников, что является серьезной неисправностью;

– Ni, Mo – вспомогательные показатели, обусловленные интенсивностью изнашивания зубчатых колес и подшипников качения приводов в ДВС. В маслах с молибденовыми присадками диагностирование по этому элементу невозможно;

– Si – один из самых тревожных параметров масла, т. к. его загрязненность на 80 % обуславливает потерю ресурса ДВС. Предельное содержание кремния по нашему опыту – 20–25 г/т масла при рекомендациях 10 и 30 г/т.

5.4. Управление техническим состоянием автотракторных ДВС по результатам их диагностирования с помощью спектрального анализа масел

По результатам анализа масел необходимо определить наличие браковочных показателей, т. е. тех параметров, значения которых достигли предельных значений или превысили их. Далее необхо-

димо выявить, имеется ли зависимость повышенного содержания металлов от наличия в масле повышенного содержания кремния, воды, пониженного – вязкости и температуры вспышки.

В случае выявления таких браковочных показателей масла, как превышение норм воды, кремния, пониженных температуры вспышки, ЩЧ или диспергирующе-стабилизирующих свойств, следует рекомендовать незамедлительную его смену. Указывается причина брака масла и рекомендуется выявить и устранить неисправности дизеля по браковочными показателями масла – проникновению в систему смазки воды, загрязнений, дизельного топлива.

Если масло бракуется по повышенному содержанию воды, пониженным ЩЧ и ДСС, масло бракуется безвозвратно, без восстановления его рабочих свойств, или отправляется на регенерацию, т. к. в производственных условиях владельцев машин восстановить рабочие свойства такого масла практически невозможно.

Если в масле нет заметного количества воды и топлива, ЩЧ масла более 4 мг КОН/г, а масло бракуется только по повышенному содержанию кремния, то рекомендуется месячный отстой слитого масла для повторного анализа, а при последующем благоприятном анализе – повторное использование масла.

Если масло бракуется по повышенному содержанию свинца или меди с оловом при нормальном содержании кремния и нормальных значениях других показателей, то рекомендуется сменить марку масла.

Если в масле значительное содержание меди при незначительном содержании свинца и олова при некотором содержании воды, то сообщается о неисправностях системы охлаждения.

Ведущими исследователями спектрального анализа моторных масел установлено, что не следует давать заключение об аварийном состоянии ДВС по однократно выявленному повышению концентрации металлов. В некоторых случаях это может быть временным явлением. Если при временно действующих причинах сопряжения трения значительно не повредились, то при дальнейшей работе они могут приработаться и износ прогрессирует не будет. Иногда для нормализации показаний бывает достаточно сменить масло, что нередко наблюдалось и в нашей работе. Повышенное содержание металлов и кремния может быть и следствием ошибок при заборе пробы и проведении анализов.

Начало аварийного изнашивания ДВС по результатам анализа масел выявить несложно, т. к. при этом резко ухудшаются все показатели масел и повышается концентрация многих металлов.

Труднее выявить техническое состояние ДВС при нормальных показаниях анализов масел. В таких случаях решение вопроса о ТО или ремонте ДВС принимается на основании значений всего комплекса доступных диагностических параметров, а также по технико-экономическим критериям: по достижению минимума суммарных издержек на использование ДВС или равенства затрат на запасные части стоимости самого ДВС.

При уверенном освоении спектрального и других анализов масел, когда концентрация металлов, постепенно увеличиваясь от анализа к анализу, приближаются к предельным значениям с одновременным ростом угара масла, расхода картерных газов, дымности ОГ, расхода топлива, падением давления наддува и уменьшением мощности дизеля, службе ТО и текущего ремонта сообщается о приближающемся израсходовании моторесурса дизеля, не прибегая к использованию технико-экономических показателей.

С помощью установки спектрального анализа масел можно решать и некоторые другие задачи испытания масел, например коррозионное воздействие на свинец, медь, алюминий и их сплавы, что и апробировано.

Технико-экономическая эффективность спектрального анализа подтверждена многими исследователями. Установлено, что при годовой экономии от предотвращения ускоренного изнашивания и аварийных отказов, без преждевременной смены масла для энергонасыщенного трактора или зерноуборочного комбайна, а также при обслуживании 250 отечественных машин срок окупаемости лаборатории – один год. При обслуживании импортных машин эффективность работы лаборатории увеличивается пропорционально росту их стоимости, а срок окупаемости снижается.

Практика спектральных анализов российских моторных масел классов В₂, Г₂ и различных классов качества импортных масел Европы, Кореи, США, Японии при их использовании в 10 типах автотракторных и тепловозных дизелях, в бензиновых моторах грузовых и легковых автомобилей показала, что классическая (для тепловозов) стабилизация концентрации металлов в маслах автотракторных ДВС из-за их работы в нестационарных условиях, загрязнения, возникновения неисправностей и переменного уровня рабочих свойств масел хотя и имеет тенденцию, но практически не происходит.

Определяющими факторами изнашивания сопряжений ДВС и накопления металлов в маслах являются:

1) по ЦПГ – динамика поступления абразивных примесей во впускной воздушный тракт и их размол при работе ДВС;

2) по КШМ:

– динамика загрязнения масла через сапун, маслозаливную горловину, отверстие под масломерный шуп, через открытые при ТО и ремонте поверхности ГРМ и ЦПГ, а также динамика коррозионности масла к цветным металлам, зависящая от состава компонентов масла и особенностей их старения в ДВС;

– динамика обводнения масел и потери ими рабочих свойств (снижение ЩЧ, уменьшение концентрации активных добавок, снижение антизносных свойств, а также вязкости при разжижении топливом).

Разработаны основные браковочные показатели масел для их смены по данным спектрального и химмотологического анализов:

– содержание кремния – более 25 ppm;

– содержание свинца – более 10 ppm при содержании кремния не более 10 ppm;

– снижение ЩЧ до 3,5–4 мг КОН/г и увеличение показателя ДСС до 5,5 баллов;

– содержание воды – более 0,3 %;

– температура вспышки – ниже 175 °С;

– изменение вязкости более чем на 40 % от номинального значения (7–20 сСт).

Факторы, определяющие необходимость ремонта отечественных автотракторных дизелей:

– интенсивность изнашивания ЦПГ по концентрации металлов: Fe > 65, Cr > 5,5, Al > 25 ppm при содержании кремния в масле менее 10 ppm;

– интенсивность изнашивания КШМ по концентрации металлов: Cu > 25, Pb > 15, Sn > 2 ppm при содержании кремния в масле менее 10 ppm;

– интенсивность изнашивания зубчатых передач ДВС по концентрации металлов: Ni > 1,8 %, Mo > 2,0 %;

– угар масла – более 4,0 % для отечественных и более 3,5 % для импортных ДВС;

– четко определяемый (яркий) синий цвет ОГ.

Предложены последовательности критериев выбраковки моторных масел и постановки дизелей на ремонт.

6. НЕТРАДИЦИОННАЯ ТРИБОТЕХНИКА ДЛЯ БЕЗРАЗБОРНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ СОПРЯЖЕНИЙ ТРЕНИЯ

6.1. Модифицирование поверхностей трения

Современное материаловедение располагает эффективными методами выполнения профилактических и ремонтно-восстановительных работ, которые позволяют обходиться без технологического оборудования с соответствующим штатом персонала и снизить требования к квалификации исполнителей работ. Примером малозатратного метода ремонтно-восстановительных работ может служить безразборный ремонт сопряжений трения узлов и агрегатов машин и оборудования серпентиновыми трибосоставами или ГМТ-технология [5, 8–10, 13, 28, 31–33, 35, 37, 45, 46, 64, 68, 72, 83, 93, 95, 97, 99, 115, 118, 120, 121, 145, 147, 152, 153].

Нетрадиционный безразборный ремонт основан на введении в систему смазки узлов и агрегатов специальных добавок к маслам – триботехнических составов. Последние обуславливают частичное восстановление поверхностей трения, что позволяет обеспечить практически полное восстановление работоспособности изношенных узлов и агрегатов. При этом улучшаются их технические характеристики, включающие диагностические параметры, которые повышаются в ряде случаев вплоть до номинальных значений. Получаемые результаты соответствуют текущему, а в ряде случаев и капитальному ремонту машин, хотя не проводится разборка агрегатов, дефектация и замена изношенных деталей. Ремонтно-обслуживающие воздействия выполняются в режиме ТО и обычной эксплуатации, связанной с устранением неисправностей и отказов машин.

При значительном износе более эффективны аналогичные приемы с частичной разборкой, заменой чрезмерно изношенных ресурсопределяющих деталей и непосредственным нанесением на годные к работе детали ремонтно-восстановительных составов в пластичной смазке. В этом случае вместо обычного для капитального ремонта 50–70%-го ресурса достигается ресурс на уровне новых машин и более.

Практика ТО и ремонта автотракторной техники может быть существенно дополнена нетрадиционной триботехникой для безразборного восстановления изношенных сопряжений трения и профилактики нового оборудования, т. е. ГМТ-технологией. Предшест-

венники данного направления – твердые смазочные материалы и твердосмазочные покрытия, которые прочно вошли в машиностроение, особенно в век космоса и атомной энергетики. Но для рядовых машин и оборудования приемлема нетрадиционная триботехника с разнообразием обкаточных, профилактических и ремонтно-восстановительных трибосоставов, вводимых в агрегаты при ТО и текущем ремонте.

Не так давно трибосоставы недооценивались поставщиками масел, но постепенно получили распространение среди владельцев техники, работая не с маслом, а с поверхностями трения. Некоторые маслоработчики, например во ВНИИ НП, уже не игнорируют трибосоставы, а концерн «ХАДО» с 2000 г. выпускает масло с серпентиновой добавкой. Близки к этому концерн «Лукойл», фирма Oil Standart. Одним из новых моторных масел является LUXE Gold с серпентиновым трибосоставом, испытанным в лаборатории фирмы Delfin Industry и на ДВС автомобилей Caterpillar, Mercedes, Toyota, Audi, Suzuki и др. [32].

Обработка агрегатов и узлов трибосоставами в процессе эксплуатации машин приводит к образованию на поверхностях трения антифрикционного покрытия толщиной от долей микрометра до сотни (зафиксированы случаи наращивания покрытия до 0,6 и 1,0 мм, а нанодиазными частицами – до 0,32 мм). Так как значительная доля неисправностей машин и оборудования обусловлена именно небольшим износом сопряжений (0,1–0,3 мм), то достигаемое частичное их восстановление трибосоставами даже на 0,02 мм весьма целесообразно, технически и экономически оправданно. С реализацией маслофильности антифрикционного покрытия значительно улучшается работоспособность обработанных агрегатов. Практика безразборного ремонта показала, что такая обработка неаварийных узлов и агрегатов, особенно не имеющих предельного износа, является оправданной альтернативой текущему и капитальному ремонту машин, используемых в АПК в предремонтный и послеремонтный период эксплуатации. Доремонтный ресурс агрегатов продлевается от 1–3 до 3–5 лет, уменьшаются затраты на ремонт и на ТСМ, повышается производительность машин [30–33, 36, 37, 147].

К настоящему времени заложено принципиально новое эффективное направление в триботехнике – восстановление изношенных сопряжений под воздействием природных минералов, вводимых в трибосреду при ТО. Восстановление работоспособности узлов

трения возможно до номинальных, паспортных, показателей, а в некоторых случаях и выше – за счет образования тонкого покрытия с высокой износостойкостью и низким трением.

Разработчиком и производителем первого профессионального триботехнического состава «ТС НИОД» с 1993 г. является научно-производственная инновационная фирма «Энион-Балтика» [32]. За прошедшее время компанией, ее филиалами, многими продолжателями ГМТ-технологии обработаны самые разные машины и оборудование в разных странах, во многих отраслях машиностроения, на наземном, морском и водном транспорте, в энергетике, металлургии, горном деле, АПК, МО. Наиболее успешной в настоящее время организацией, выпускающей хорошие трибосоставы по 40–50 тыс. флаконов в год, является ООО «НПТК СУПРОТЕК».

С 1998 г. триботехнологии минералов стали осваиваться на коммерческой основе. Появились фирмы, образованные бывшими сотрудниками научных учреждений и торгующие минеральными триботехническими составами. Первые из них – «Энион-Балтика» с трибосоставом НИОД, проверенным в конце 80-х гг., и «Дедал». Получили известность и такие трибосоставы, как РВС (серия составов), РЮ-11, «Живой металл», «Реагент 2000», «ФОРСАН», «СУРМ», «Ресурс», РВК, «НЭСК». После 2000 г. высокая эффективность ГМТ-технологии способствовала образованию новых коллективов: «НЕОСФЕРА» (состав А.Р.Т.), «СУПРОТЕК», «Ньюмен», «НАНОПРОМ», ЦНТ (MEGAFORCE), «ХАДО», «Конверс-Ресурс», VICCO (RUTEC), REWITEC (Германия), «ТРИГТЕР», TriboTECHNOLOGY, «ЭДИАЛ» и др. Были созданы новые ГМТ: Forsan Nanoceramic, Motor doctor, «Трибо», «КАРАТ», АВРК, ТСК-М, Evo[®] lution, «Реновит», «АТРИ», «ТИГР», «РЕВИТАЛ», R1METALL, WL-1, WL-2.

Применение серпентиновых трибосоставов является достаточно простым и осуществляется при плановом ТО машин и оборудования. Для этого необходимо ввести трибосостав штатной смазкой в зоны трения, затем оборудование должно проработать несколько часов с пониженной и необходимой нагрузкой. В результате действия составов на поверхностях деталей образуются пленочные покрытия, существенно увеличивающие ресурс, нагрузочную и температурную стойкость сопряжений в критических режимах (перегрев, перегрузка, аварийная потеря смазки), снижающие требования к качеству смазочных материалов. Покрытия работают в течение времени, превышающего нормативные сроки обслуживания машин и оборудования.

В настоящее время минеральные трибосоставы применяются во многих регионах России, в Республике Беларусь, Украине («ХА-ДО»), ряде других стран СНГ и за рубежом: в Финляндии (RVS Tec Oy); Китае, Японии (под брендом RVS METARIZER выпускаются составы нескольких марок, в т. ч. Metal Surface Treatment, Fe-Do); во Вьетнаме (Голубой нефрит); в Германии, Швеции (RESTAL)).

ООО «НПТК СУПРОТЕК» производило в России и Чехии до 80–100 тыс. флаконов серпентиновых трибосоставов в год (ныне вдвое меньше) и поставляло их в 30 стран. Масштабно производство ГМТ и в Финляндии. Причем крупные компании производят их комплекс: для бензиновых, дизельных ДВС, для КП и автоматической КП, ТНВД, для гидроагрегатов; профилактического назначения на период эксплуатации новых машин и ремонтно-восстановительные – для безразборного ремонта. Эффективность многих составов подтверждена, что обеспечивает их дальнейшее развитие развитие и совершенствование.

Вместе с тем встречаются несертифицированные трибопродукты, порой дискредитирующие ГМТ-технологию. По статистике 90-х гг., около 3 % из обработанных ДВС автомобилей получали повреждения вследствие применения некачественных трибосоставов. Повышать культуру нетрадиционной триботехники крайне важно.

Работы в данном и сопутствующих направлениях в России, Беларуси, Украине и других странах продолжаются. Для безразборного ремонта предлагается ассортимент добавок к смазочным материалам (20–30 марок) – отечественных и зарубежных. В их многообразии работникам технического сервиса разобраться сложно, т. к. информация о составах представлена рекламно, порой некорректно, а в отдельных случаях не подтверждена практикой. Недосток объективной информации, недоверие ко всему новому, наличие низкокачественных составов, отдаленность разработчиков от регионов с изношенной техникой тормозит применение нетрадиционного метода ремонтно-восстановительных работ.

Нетрадиционная триботехника актуальна практически во всех отраслях промышленности в связи со значительной выработкой ресурса оборудования и недостатком средств на полную или частичную его модернизацию. Но в то же время, когда обработаны миллионы единиц агрегатов, машин и оборудования, проведены сотни исследований, разработчики направления все еще вынуждены доказывать высокую эффективность ГМТ-технологии.

6.1.1. Развитие способов воздействия на условия трения тел

К настоящему времени смазочные материалы достигли высокого качества, и пределы их совершенствования практически исчерпаны. Вместе с тем они все же не устраняют изнашивание сопряжений, поэтому поиск дополнительных материалов к маслам продолжается.

Практика использования таких, природных веществ, как речной ил, и полезных ископаемых имеет многотысячелетнюю историю. Необычные притирочные составы к маслам впервые начали широко применять в 1942 г. в США для устранения дефектов коробок передач большой партии армейских вездеходов фирмы «Дженерал Моторс». Успешное применение трибосоставов инициировало в 70-е гг. их развитие в различных направлениях. Однако масштабных и эффективных трибосоставов для избирательного переноса к парам трения «сталь–сталь» в маслах со щелочными присадками, требующего сочетания до десятка сложных факторов, не создано [48, 90, 95, 131, 142, 143]. Вместе с тем для реализации избирательного переноса была создана гамма металлоплакирующих добавок к смазкам: масляных суспензий порошков мягких металлов, их сплавов; масляных растворов солей жирных кислот этих металлов, осуществляющих электрохимическое осаждение пленок на стальных поверхностях [32].

Наибольшее развитие избирательный перенос с 90-х гг. получил именно в виде металлоплакирующих составов. Но им присущи совсем другие триботехнические процессы, идущие не по механизму трибополимеризации смазки, активируемой медью в кислой среде, а по адгезии, диффузии и электролитическому осаждению мягких металлов в среде масел [32].

Разработки разнообразных трибосоставов активно шли за рубежом, результатом чего к настоящему времени являются более десятка эффективных серийных трибосоставов стран ЕС и США, а всего в историческом плане рекламировалось около 100 наименований. Из 160 патентов России по применению трибосоставов выявлено: серпентиновых – 53, металлоплакирующих – 36, фторсодержащих – 9, наноалмазных – 7, многокомпонентных – 6, с графитом – 3, с дисульфидом молибдена – 2, средств и приемов щелочной, магнитной, электрической и другой обработки масел – 10, приемов комплексной обработки деталей и трибосопряжений – 13, масел с добавками – 9 [32].

Десятки патентов США и ЕС защищают специфические составы масел, а также трибосоставы на основе химических реагентов, наноалмазов, металлоплакирующих и полимерных веществ.

Основное содержание трибосоставов – минеральное, металло-содержащее, органическое и трибохимическое, но наиболее востребованы серпентиновые – смеси гидросиликатов магния, никеля, алюминия, железа, хотя имеются и углеродные кластеры «КАРАТ-М», «ГРАФ», нанографены и др.

К 2000-м гг. коллективами разработчиков создана серия серпентиновых трибосоставов НИОД (НПИФ «Энион-Балтика»), А.Р.Т. (ТК «НЕОСФЕРА»), РВС (НПО «Руспромремонт»), «Реагент 2000», «Живой металл», РЮ-11, «Форсан», «Трибо», Motor doctor, «СУПРА» и др. Российские ГМТ испытаны в Беларуси, Болгарии, Молдавии, Египте, Греции, Франции, Италии, Испании, Австрии, Швейцарии, Бельгии, Чехии, Сан-Марино, Португалии, Бразилии, Аргентине, Сирии, Чили, Новой Зеландии. Позже на основе серпентинов созданы другие простые и комплексные составы: «ВИК-КО», «ЭДИАЛ», АРВК, «Стрибойл», «Моторвита» и др.

Отличия серпентиновых трибосоставов от присадок к маслам показаны в табл. 6.1, 6.2 [32, 72].

Таблица 6.1

Присадки к маслам и серпентиновые трибосоставы, химмотологические признаки

Показатель	Характеристики показателей	
	присадок	трибосоставов
Обеспечение рабочих свойств смазочных масел	Антизадирные, антиизносные, антифрикционные, моюще-диспергирующие, антикоррозионные свойства	Антизадирные, антиизносные, антифрикционные свойства
Обеспечение конституционных свойств смазочных масел	Вязкостные, антиокислительные, деэмульгирующие, низкотемпературные свойства	Не обеспечивают. Собственные показатели: дисперсность, фракционный состав, материальный состав
Объект воздействия	Базовое масло – углеводородная жидкость	Сопряжения трения при поступлении к ним со смазочным маслом

Показатель	Характеристики показателей	
	присадок	трибосоставов
Используемая концентрация	До 20 %	0,01–3 %
Взаимодействие со смазочными маслами	Растворяются в маслах и смазках, расходуются на поддержание их рабочих и конституционных свойств	Образуют масляные суспензии, расходуются на модифицирование поверхностей трения, а при избытке удаляются со сменой масла
Механизм работы в трибосопряжениях	Адсорбция, хемосорбция	Адсорбция, хемосорбция, электроосаждение, каталитическое действие на трибосреду и трибополимеризация
Толщина слоя, образуемого на поверхностях деталей	До 40 Å	До 650 мкм – наноалмазные; 20, 100, 600 и до 1000 мкм – серпентиновые составы в разных узлах
Температурный предел действия	До 150 С у ПАВ, 150–350 °С у хемосорбционных	От 150 до 500 °С и в пределах температурной стойкости конструкционных материалов
Длительность действия	До смены масла	До 3–5 сроков смены масла или 30–50 тыс. км пробега автомобилей, год-два работы агрегатов МТП
Обеспечение работы без масла	Запрещается	Гарантируется безаварийный пробег до 200 км. Показательны пробеги Москва–Питер–Москва (900 км) согласно книге рекордов Гиннеса, годичная работа тепловозов без масла в тяговых редукторах и др. без масла в моторах

Таблица 6.2

Сравнительная триботехническая характеристика присадок к маслам и серпентиновых трибосоставов (данные НПО «Руспромремонт»)

Показатель	Присадки к маслам	Трибосоставы, компенсирующие износ
Упрочнение исходных поверхностей	Незначительное, не для всех присадок	Существенное, в 1,2–1,5 раза
Выравнивание микрорельефа поверхностей трения	Небольшое	Заметное, до 0,06 мкм
Наращивание восстановительного слоя и оптимизация зазоров в сопряжениях	Не происходит	До 1 мм; при больших износах требуется неоднократная обработка
Увеличение ресурса пар трения в сравнении с ресурсом стандартных деталей	Происходит, но менее эффективно	Для новых деталей – до 2,5 раз, после ремонта – до 150 %
Снижение вибраций и шума агрегатов	Преимущественно незначительное, у некоторых хорошее	Существенное, максимум – на 6 дБ
Коррозионная стойкость	Нормативная, для спецприсадок высокая	Высокая, снижение коррозионного износа
Теплостойкость восстановленной поверхности	–	Высокая, до 500 °С
Коэффициент трения, механические потери в агрегате	Снижаются, но в меньшей степени	Коэффициент трения снижается до 0,025, механические потери – на 20 %
Снижение температуры узла трения и смазочного масла	Заметное, но без смазки работа не допускается	Существенное; агрегат может работать длительное время без смазки
Защита агрегата от аварии при потере смазки	Небольшая	Полная

Показатель	Присадки к маслам	Трибосоставы, компенсирующие износ
Снижение пусковых износов у ДВС при работе с всесезонными маслами	Для присадок, образующих износостойкую защитную пленку	Значительное
Совместимость со смазочными маслами и рабочими жидкостями	Индивидуальная для разных пакетов присадок к различным типам масел	С маслами, гидрожидкостями, дизтопливом, керосином, бензином, спиртом, охлаждающей жидкостью (СОЖ)
Повышение срока службы масла	Нужно соблюдать сорт и срок службы масла	Заметное, требования к качеству масла снижаются
Периодичность применения	По исчерпанию ресурса масла	На срок до 2500 ч
Избирательность действия	Сбалансированные пакеты присадок универсальны	В основном для стальных и чугунных деталей
Технико-экономический эффект	Повышение ресурса и отдельных показателей	Показатели агрегатов, зависящие от узлов трения, обеспечивают рентабельность 500–800 %

Первые серпентиновые составы были созданы на основе породы серпентинита. Впоследствии из минералов группы серпентина выбрали наиболее эффективные кристаллические формы серпентина: антигорит, хризотил и лизардит.

Серпентины – минералы из подкласса слоистых силикатов (формула – $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$). По морфологии и характеру деформации кристаллической решетки выделены три основные разновидности серпентина:

- микрочешуйчатая листовая – антигорит (35–50 % в составе ГМТ);
- тонковолокнистая – хризотил (30–50 % в ГМТ), не принятый академиком РАЕН В. В. Зуевым как эффективный трибоматериал. По Д. Н. Телуху, хризотил-асбест волокнистый ухудшает свойства трибосоставов;
- тонкозернистая – лизардит структурной формулы «Лизардит-1Т» (10–30 %).

Серпентины относятся к группе триоктаэдрических слоистых гидросиликатов с кремнекислородными тетраэдрами SiO_4 . Их цвет – беловатый, зеленоватый, желтоватый, темно-буро-зеленый в зависимости от разнообразия содержания атомов Fe^{3+} , Fe^{2+} , а также примесей Ni . Твердость по минералогической шкале – 2,5–3, плотность – 2550 кг/м^3 ; они являются породообразующими минералами горной породы серпентинита.

К основным серпентинам относится большая группа минералов близкого химического состава, описываемых по-разному. Кремний может частично замещаться алюминием, а магний – алюминием, марганцем, никелем, железом.

Модель конструкции серпентинов приведена на рис. 6.1, 6.2 [32, 72].

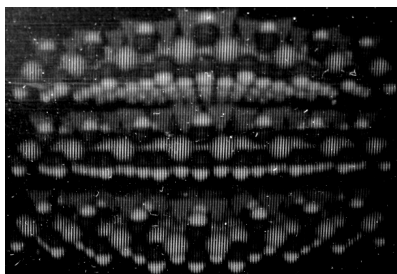


Рис. 6.1. Структурная модель слоев химических элементов, образующих серпентины

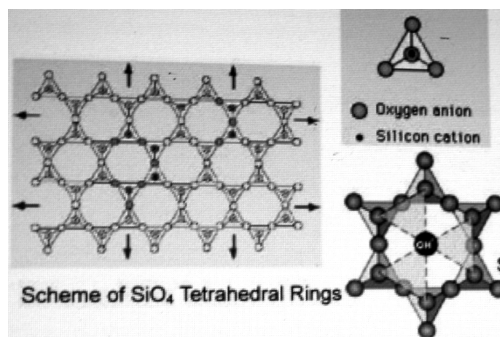


Рис. 6.2. Компоновка силикатных (SiO_4) тетраэдров серпентина (лизардит)

В серпентинит входит до 28 разновидностей серпентина и множество сопутствующих минералов на основе алюминия, никеля, железа, кальция и других химических элементов. Известны 4 типа

реакций при разложении серпентинов с выделением силиката магния, кварца, окиси магния, воды, кислорода.

Переменность состава ГМТ проявляется на дифрактограммах. Примерный компонентный состав ГМТ из высокодисперсных (5–40 мкм) порошков: MgO – 40–45 %, SiO₂ – 40–44 %, H₂O – 12,1–12,9 %. Конституционная вода выделяется при температуре 150–300 °С с разрушением кристаллов. Состав классических минералов группы серпентина приведен в табл. 6.3.

Отличаясь структурой, минералы триботехнически работают неодинаково. Для триботехники важен гидросиликат магния – серпентин в форме лизардита структурной формулы 1Т. Создать ГМТ только этим минералом затруднительно.

На дифрактометре XRD 6000 проведен рентгенофазовый анализ 15 порошков ГМТ от ООО «Венчур-Н», ООО «НЕОСФЕРА», ООО «РеалИнПроект», ГНУ ВИЭСХ и др. Один из результатов анализа приведен на рис. 6.3 [31, 32, 72].

Таблица 6.3

Состав классических минералов группы серпентина

Основные минералы	Формула химического состава	Подтверждение дифрактограммами
Клинохризотил	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$	Да
Антигорит	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$	Нет
Лизардит	$Mg_6(Si_2O_5)_2(OH)_8$	Да
Амезит	$Mg_2Al(AlSiO_3)(OH)_4$	Нет
Гриналит	$Fe_3(Si_2O_5)(OH)_4$	Нет
Непуит	$Ni_3(Si_2O_5)(OH)_4$	Да
Серпентин (обобщенная двойная формула)	$Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$	Да

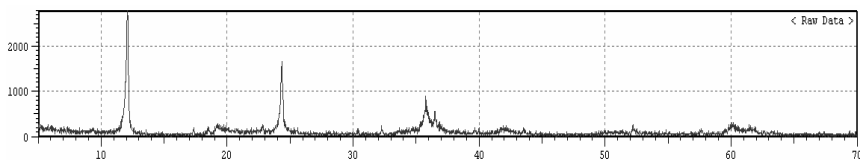


Рис. 6.3. Дифрактограмма состава 1 от ГНУ ВИЭСХ (идентифицирован «Лизардит-1Т»)

На всех дифрактограммах [31, 72] между характерными импульсами сигналов основных веществ наблюдался как помеха небольшой фон излучения, что свидетельствует о наличии в ГМТ примесей. Названия основных выявленных в порошках веществ по международной библиотеке спектров ICDD следующие: $(\text{Mg}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Fe})_2\text{O}_5$ – Aluminum Iron Magnesium Silicate (Lizardite-1T); $(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ – Magnesium Iron Silicate Hydroxide (Lizardite-1M); $(\text{Ni}, \text{Mg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ – Nickel Silicate Hydroxide (Nepouite-20); $(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Mg}, \text{Mn})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ – Iron Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide (Orthochamosite-10lb); $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})_{2,5}(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ – Iron Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide (Odinite-1M); Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide (Chlorite-serpentine (NR)).

На основании результатов анализа дифрактограмм порошков сделаны следующие выводы [31, 72]:

- порошки практически соответствуют классическим составам гидросиликатов магния, никеля, алюминия с примесями, хотя по библиотеке спектров ICDD они включают также тальк, Orthochamosite-10lb, Odinite-1M, Chlorite-serpentine (NR);

- библиотека спектров ICDD выявила антигорит, являющийся, по данным производителей ГМТ, одним из основных его компонентов в составах ООО «Жилсервис» и ВИЭСХ;

- треть порошков – смеси до 10 соединений. Особенно сложны составы от ТК «НЕОСФЕРА» и ООО «РеалИнПроект». Исключением является состав РВД (ООО «Триггер»), состоящий в основном из минерала «Лизардит-1Т»;

- серпентин лизардитовой 1Т-конфигурации представлен только в 6 порошках из 15: порошки ТК «НЕОСФЕРА», состав РВД, серия составов ООО «РИП»;

- для некоторых ГМТ в разное время исследований выявлено некоторое различие дифрактограмм и фазового состава, т. к. высокодисперсные порошки ГМТ при хранении претерпевают фазовые изменения;

- среди химических элементов в порошках доминируют Mg, Si, а по убывающей концентрации заметны Ni, Fe, Al, Ca и следы Ge, Na, Mn, Sr, Zn, Cu, S, U;

- библиотека спектров ICDD при попытках идентификации минералов выдает на один и тот же порошок различающиеся наборы до 20 веществ, что затрудняет идентификацию ГМТ.

Дифрактограммы ведущих производителей подтверждают, что в основном ГМТ являются гидросиликатами магния, никеля и алюминия, в некоторых имеются примеси железа, марганца и других элементов.

В целом лабораторные и производственные данные исследователей ГМТ-технологии и легли в основу принципиально нового направления в триботехнике – безразборного ремонта минеральными трибосоставами [72].

К настоящему времени подготовлено несколько рекомендаций и инструкций по обработке различных агрегатов тепловозов, судов, автотранспорта, тяжелого и станочного оборудования различных отраслей, издается Интернет-журнал «Трение, износ, смазка», имеется более тридцати Интернет-сайтов триботехнических фирм [32].

В Европе (Австрии, Франции, Голландии), а наиболее масштабно – в США выпускается несколько типов модификаторов трения. На 2015 г. рынок препаратов автохимии вместе с трибосоставами приближался к миллиарду евро.

6.1.2. Качественные признаки работы серпентиновых ремонтно-восстановительных трибосоставов и свойства ГМТ-покрытий

Качественные и физико-химические признаки работы ГМТ:

– работают только на поверхностях трения и взаимодействуют при закреплении ГМТ-покрытия с поверхностями деталей только на 10–100 атомных слоев;

– работают в основном на деталях из железоуглеродных сплавов, но есть лабораторные и эксплуатационные подтверждения ГМТ-покрытий на цветных сплавах;

– обычно нейтральны к присадкам и смазкам [32], что обеспечивает возможность их применения в любых узлах, агрегатах, но требуется оптимальная гранулометрия и концентрация трибосостава; следует учитывать и то, что высокодисперсные частицы ГМТ, имея нескомпенсированные связи, химическую активность, не могут не влиять на композицию масел и смазок; это влияние усиливается при нанодисперсности частиц любых минералов, повышенной температуре, давлении и механохимии трения;

– эффективность обработки зависит от материала деталей, химического, фазового и фракционного состава порошка ГМТ;

– факторы процесса – высокая контактная температура и давление, поэтому ГМТ-покрытие образуется в первую очередь в зоне ударных нагрузок деталей, а после их выравнивания наращивание покрытия замедляется;

– частицы серпентина (если они крупные или их много) очищают поверхности трения, отчего могут загрязняться маслофильтры и может падать давление масла в ДВС; оптимальный размер частиц ГМТ должен быть больше минимальной толщины пленки смазки и больше суммарной шероховатости сопряженных поверхностей; для ЦПГ и КШМ ДВС это более 7–8 и до 25 мкм. Наноразмерные частицы ГМТ коагулируются, отфильтровываются и без спецподготовки бесполезны, вследствие этого определено, что для ДВС оптимален размер частиц по Д. М. Телуху – 5–10 мкм, а для агрегатов силовой передачи, где более вязкое масло, – до 50 мкм [122];

– антифрикционное ГМТ-покрытие толщиной по Д. Н. Телуху до 20–30 мкм, по С. Н. Подчуфарову – до 70 и 120 мкм обеспечивает низкий коэффициент трения – 0,027–0,040 (в отдельных условиях – до 0,005), незначительно увеличивает микротвердость подложки, ускоряет приработку сопряжений, снижает их коррозионный износ;

– ГМТ повышают износостойкость сопряжений и ресурс агрегатов в 2–3 раза, пробеги легковых автомобилей после ГМТ-обработки достигают 550–870 тыс. км;

– поверхность покрытия имеет сопротивление 10–12 Ом/см (до 300 Ом/см по И. Ф. Пустовому) на поршневых кольцах, толкателях ГРМ, высокую чистоту (14-й класс, Ra = 0,03–0,05 мкм) и твердость, в тонком слое прозрачно (под поверхность видны следы механической обработки), цвета покрытия – желто-золотистый, золотисто-сиреневый, светло-серый;

– покрытие разрушается от непосредственного воздействия электричеством (в точках контакта электродов тестера Ц-4324 коричневые кратеры за полгода разрастаются на всю поверхность детали);

– покрытие 2%-м раствором азотной кислоты не травится;

– электросопротивление между поверхностями деталей при обработке лизардитами в масле постепенно увеличивается от начальных 0,5–5 Ом до 250–400 кОм;

– по результатам рентгеновской растровой микроскопии (Camscan-4DV), покрытие резко отличается от подложки и пористо, а по данным Китайских исследователей, между покрытием и подложкой нет четкой границы [32, 153];

– по Оже-спектromетрии (установка РНІ-660 в пекинском университете «Циньхуа» [153]) и спектральному анализу (микроанализатор LINK), в слое до 40 Å от подложки регистрируются пики Mg, Si и C, но выше 150 Å концентрация элементов Mg и Si быстро снижается, а C – увеличивается до 100 %;

– по исследованиям Д. Н. Любимова, подложку ГМТ-покрытия составляет сталагмитовая по форме пространственная минеральная структура, на которой происходит полимеризация компонентов смазки [68];

– по некоторым данным, первичное ГМТ-покрытие легко снимается, требуется остановка обработки для упрочнения покрытия и усиления его адгезии к металлу [145]. Возможно, поэтому в НПИФ «Энион-Балтика» после быстрой обработки масло сливают из двигателя вместе с ГМТ, что, по-видимому, предотвращает истирание первоначального ГМТ-покрытия обилием трибосостава (2–3 %) и удаляет загрязнения из зоны поршневых колец. Для упрочнения и закрепления покрытия С. Н. Подчуфаров предложил останавливать ДВС в теплое и холодное время по-разному, на сутки-двое, обеспечив резкий перепад температур поверхностей трения и усилив миграцию к ним атомарного водорода. Однако в НПИФ «Энион-Балтика» отмечено положительное влияние эксплуатации машин и оборудования сразу после удаления трибосостава и ввода масла без серпентина, а в большинстве случаев длительный простой машин после обработки не планируют;

– считается, что твердость модифицированных в трении частиц из ГМТ должна быть не ниже микротвердости поверхностей трения, т. к. соответствующая твердость является условием запуска абразивной приработки и последующего формирования покрытия, минералы же с твердостью по Моосу более 2,5 вызывают абразивное изнашивание. В МИИТ показано, что мягкие абразивы в ГМТ необходимы, их оптимум – до 4 %: без абразивов ГМТ-процесс может не протекать, с малым количеством ГМТ он неинтенсивен, а если абразива больше 4 %, то будет происходить не наращивание покрытия, а износ поверхностей трения;

– серпентины после дробления в трении и тем самым активации, имея нескомпенсированные связи, вместе с ювенильными поверхностями трения при минимальной концентрации (0,01–0,4 %) могут благодаря высокой энергоплотности [45] действовать как катализаторы и обуславливать конденсацию некоторых компонентов трибосреды с образованием ГМТ-покрытия;

– слои частиц серпентина могут плотно ложиться на поверхность металлов за счет высокой их спайности и сил межкристаллитного взаимодействия с металлами;

– некоторые минералы могут обладать пьезоэлектрическими свойствами и вызывать электрические явления; в зонах дробления частиц может формироваться трибоплазма, способствующая ГМТ-процессу;

– толщина ГМТ-слоя – от нескольких микрометров до их десятков, а высокую эффективность даже самого тонкого слоя в увеличении пневмоплотности, повышении компрессии в ЦПГ, снижении трения и улучшении функционирования ДВС можно объяснить [145] закрытием рисок и царапин на поверхностях гильз цилиндров и поршневых колец, а по Н. В. Ветчинкину – и маслофильностью покрытий, обеспечивающей полужидкостное (смешанное) трение;

– добавление по О. Г. Павлову в порошок серпентинов кузнечной сажи интенсифицирует образование ГМТ-покрытия;

– добавление по С. Н. Подчуфарову в порошок серпентинов магния или его маслорастворимых соединений ускоряет ГМТ-процесс;

– эффект ГМТ-обработки проявляется через час, но продолжает наращаться в эксплуатации даже после смены и удаления масла, а непонятный в этом случае рост толщины покрытия возможен благодаря адсорбции им компонентов трибосреды;

– параметры низкого трения сохраняются до износа покрытия;

– образовавшиеся покрытия сохраняются в ДВС до 3 лет; после ГМТ-ремонта бензиновые двигатели автомобилей работали без аварийного износа деталей ЦПГ и КШМ до 870 тыс. км [99], а у С. Н. Подчуфарова – более 1,2 млн. км;

– ГМТ-процесс интенсивнее идет на поработавших, частично расходуемых маслах и целесообразен за 50–100 ч (500 км пробега) до смены масла [8];

– по данным В. В. Ладикова [8], ГМТ-процесс с составами «ВИК-КО» не идет при силиконовых маслах, но согласно исследованиям фирмы «Энион-Балтика» состав НИОД работает со всеми маслами;

– факторами ГМТ-процесса являются высокие контактное давление и температура, в холодном масле процесс идет неинтенсивно, а в сопряжениях, обеспеченных гидродинамическим смазыванием, не наблюдается;

– в начале обработки температура ДВС и расход топлива могут повыситься, но в конце они становятся меньше исходных на 5–8 % [8];

– после обработки, раскоксовывания и очистки деталей ЦПГ компрессия может увеличиться/уменьшиться, но после наращивания ГМТ-покрытия, закрытия им рисок на гильзах, кольцах она увеличивается [8];

– по В. В. Ладикову [8], вследствие ГМТ-очистки поверхностей трения, вывода загрязнений в маслофильтры, использования компонентов масла как строительного материала для ГМТ-покрытий в ДВС может наблюдаться убыль до 1 л масла;

– в трибообработке из-за очистки ЦПГ и вывода ее загрязнений в маслофильтры давление масла в ДВС может понизиться, но после смены фильтров и образования ГМТ-покрытий оно в сравнении с исходным значительно возрастет;

– при интенсивной обработке ДВС работают неустойчиво, через 5–15 мин после ввода серпентинов из выпускной трубы прогретого до нормы ДВС могут в течение получаса выделяться серый дым и пар, капли и брызги воды до 1,5 л с грязными хлопьями. Незначительное водовыделение, наблюдающееся и через несколько дней после обработки – не редкость, что подтверждает практика ГМТ-ремонта [8, 64, 86, 93, 99, 120]; возможно, в выпускном тракте ДВС происходит разложение водомасляного шлама.

Повышенное водовыделение из выпускного тракта ДВС в ГМТ-обработке замечали с 1998 г. Выяснение его причины поможет уточнить ход ГМТ-процессов, но имеющиеся в данный момент трактовок могут быть ошибочными, т. к. опираются на закономерности работы ДВС, по которым повышенного (до 1,5 л за короткое время) водовыделения наблюдаться не может.

Повышенное паро- и водовыделение при РВС-обработке характеризуется следующим:

– паро- и водовыделение у прогретого ДВС при любой, даже очень жаркой погоде в 2000 г. впервые было охарактеризовано как побочное и стало считаться признаком ГМТ-процесса, чего не наблюдается при обычном пуске ДВС;

– вода выделяется с 10-й по 35-ю мин после ввода составов, когда температура охлаждающей жидкости ДВС, как правило, снижается на 5–7 °С, но может повыситься до 90 °С, а после обработки становится немного ниже исходной [32];

– сезонной зависимости водовыделения нет, оно может не прекращаться и после ГМТ-обработки в течение нескольких дней [32, 64], а некоторые ГМТ-обработанные ДВС парят постоянно и имеют пониженный расход бензина. Так, полностью трибообработанный автомобиль «НИВА» ВАЗ-2131М (А. И. Железницкий) парит постоянно, а расход бензина АИ-92 при скорости 80–90 км/ч

составляет не более 8,0, зимой – 8,5 л/100 км при паспортных данных 12 л/100 км бензина АИ-95;

– водовыделение тем интенсивнее, чем интенсивнее наращивание покрытия [8];

– вода при первой ГМТ-обработке выделяется чаще всего, обычно по 50–100 мл, но скрадывается в нейтрализаторе ОГ; может идти «парок», наблюдающийся и долгое время после обработки [8];

– особенно много воды выделяется при обработке ДВС, долго работавших с минеральными маслами [120];

– объем водовыделения пропорционален длительности эксплуатации ДВС до ГМТ-обработки; при повторной обработке, спустя долгое время после первой, водовыделение может повториться [31];

– у бензинового ДВС водовыделение интенсивнее, чем у дизеля [120];

– объем воды пропорционален рабочему объему ДВС. На дизеле КамАЗ-740 наблюдалось выделение до 1,5 л воды. При перегазовке вода брызжет из выпускной трубы или вылетает струей [32, 120].

В. Ф. Пичугин провел безразборный ремонт более 500 ДВС автомобилей ВАЗ металлоорганическим составом на основе олова (без минералов). При каждом введении состава (по 10–15 % – в цилиндры через свечное отверстие, по 50 % – в картерное масло) через несколько минут работы мотора, обязательно прогретого предварительно, начиналось выделение капель и брызг воды [28, 93].

Для более точного объяснения водовыделения и образования ГМТ-покрытий требуются исследования при обработке силовых и гидроагрегатов не только серпентинами, но и монтмориллонитом, каолинитом, цеолитом и полититанатом калия. А при анализе испытаний ДВС необходимо учитывать их рабочий объем, объем масла, количество введенного минерала и диагностические параметры ЦПГ до и после обработки: расход топлива, состояние масла по «капельной пробе», его угар и другие доступные параметры.

Практика ГМТ-технологии показала, что универсальных однокомпонентных ГМТ не существует. Были попытки создания комплексных составов, содержащих различные минералы, органические вещества, например ПАВ для обеспечения стабильности частиц порошков, трибополимеризующие вещества (ЭФ-357 и аналоги), как в композиции АРВК, где усиливающим образом объединены антифрикционные и противоизносные свойства присадки ЭФ-357 и восстановительный эффект серпентинов. В комплексных составах может работать

несколько последовательных механизмов образования различных компонентов покрытия, что повышает их эффективность.

Имеются обоснованные нарекания на нестабильность эффективности работы ГМТ при их приготовлении малыми партиями по примитивным технологиям. Предполагалось, что можно создать искусственные серпентины, но ведущие исследователи (В. В. Зуев, И. Ф. Пустовой, Д. Н. Телух) отрицают возможность создания многокомпонентного по составу, состоящего из чередующихся силикатных и бруситовых слоев и уникального по триботехническим свойствам ГМТ. О неудачных попытках такого синтеза было известно 15–20 лет назад.

Разные трибосоставы создают покрытия различной природы и толщины с различной долговечностью, имеют различную стоимость. Имеются и составы органической и неорганической природы, которые нежелательны из-за малых толщины и стойкости пленок на поверхностях трения. Такие составы вызывают срывы, забивания маслосканалов ДВС и аварии, дают побочные негативные эффекты из-за образования в ДВС вредных веществ и отложений. Предпочтительны составы экологически чистые, недорогие, простые в применении, эффективно модифицирующие поверхности трения и/или наращивающие заметные покрытия за короткий период работы сопряжений.

К простым в применении, экологически безвредным, создающим ремонтно-восстановительные слои, заслужившим с 1991 г. одобрение по комплексу показателей и распространенными в России, Японии, Финляндии, ФРГ, Китае, Украине, других странах можно отнести составы на основе минералов группы серпентина, углеродные нанокластеры «Карат-М», «Карат-5», углеродные нановолокна «ГРАФ» (ТУ 0257-004-10182605–2016). Последние более дешевые, но равноэффективны наноалмазным, поэтому ими заменили наноалмазные составы в Красноярском ИХХТ СО РАН. На маслозаводе в г. Хэган (Китай) в 2019 г. кроме восьми марок моторных масел начато производство пластичной смазки с трибосоставом «ГРАФ» Красноярского НИИ ИХХТ СО РАН.

Однако не все составы работают эффективно, каждая их партия требует эксплуатационной проверки. Некоторым ГМТ для образования заметного покрытия требуется не менее недели, а при больших износах сопряжений обработку малоцентрированными составами необходимо повторять до 3 раз. Но требуется и ограничение порошка, т. к. чрезмерная доза может создать толстое покрытие

и тем самым нарушить требуемое сопряжение, например в ЦПГ, привести к перегреву и аварии ДВС. Так, состав РВД от ООО «Триггер» вводят в масло в концентрации 0,01 %. Кроме того, эти составы вызывают раскоксовывание и очистку деталей ЦПГ, освобождение их обломков, образование заметного количества загрязнений масла, засорение фильтров, а при отсутствии должного внимания происходит опасное падение давления в системе смазки ДВС.

Геомодификаторы существенно изменяют условия трения, а присадки лишь улучшают его характеристики. Геомодификаторы создают условия, близкие к «безызносности», что особенно актуально для дорогостоящих узлов и агрегатов, и дают инструмент для борьбы с трением и износом, ежегодно расходуемыми 10–15 % ВВП человечества.

Достоинство составов «Энергия 3000», «Микро-ХЗ» – почти мгновенное действие. Маслорастворимые соли щелочных металлов сульфокислот универсальны, они защищают от адгезионного изнашивания многие поверхности.

Весьма эффективны дорогие составы фирмы Wagner на основе гексагонального нитрида бора (известен как «белая сажа», производимая в России несколькими предприятиями). Но они не образуют ремонтно-восстановительного покрытия и могут применяться только как временные, притирочные на любой технике: обкатка узлов, агрегатов при изготовлении, капитальном ремонте.

Оригинальные ГМТ и технология их применения W1-Technology в 2005 г. созданы в ООО «РУСНОИНКОМ» (Москва). Здесь после 3-часовой тепловой обработки порошка для уменьшения содержания в нем адсорбированной воды производятся два ГМТ: W1-1 – для ДВС, W1-2 – для ведущих мостов автомобилей.

Трибосостав REWITEC – аналог состава Rutec Reanimator московской компании VICCO, успешно использующийся на судовых дизелях немецкими судовладельцами в гавани Гамбурга. Сам состав Rutec Reanimator внедряется в практику обслуживания дорожно-строительных машин в Подмосковье Д. В. Лисенковым (ОКДМ, г. Подольск), аналоги производятся в Карелии, а в Москве они выпускаются компанией «ЭДИАЛ». Под торговой маркой «ЭДИАЛ» имеются серпентинные составы ТАВД, «Трансмиссия МНПП», «Двигатель внутреннего сгорания», «Гидравлика АКПП ATF».

Известны и новые ГМТ: Nanoprof, «Эконовит» (ООО «RBC»), «ИКСАР», апробированные во время стендовых испытаний ДВС и в эксплуатации.

6.1.3. Специфика геомодифицирования поверхностей трения. Механизм трибообработки изношенных поверхностей с помощью ГМТ

Характерные особенности использования ГМТ при безразборном ремонте ДВС:

1. Объем покрытий, инициируемых серпентинами, больше вводимых в масло порошков (в 5 раз при толщине слоя 10 мкм на деталях бензинового ДВС при концентрации ГМТ в масле 0,01 %). В масло требуется 0,01–3 % ГМТ, а других трибосоставов – до 10 %. Масса образованного серпентинами покрытия может превышать массу введенного в ДВС ГМТ в 25 раз [32]. Нарастание ГМТ-покрытия идет и после слива масла из агрегатов, т. е. при работе трибообработанных агрегатов без масла. Все это позволяет утверждать, что к формированию покрытия вместе с ГМТ привлекаются и другие компоненты трибосреды, возможно CO_2 .

2. Формирование покрытия замедляется при свежем масле, имеющем номинальное ЩЧ, при малом количестве продуктов окисления масла и сажи. В противном случае в формировании покрытия принимают участие продукты окисления масла, а высокая щелочность свежего масла препятствует новым трибопроцессам. Поэтому для безразборного ремонта ДВС рекомендуется масло, проработавшее половину или большую часть нормативного срока или имеющее остаточный ресурс около 500 км пробега (три-пять смен работы тракторного дизеля).

3. Имеется оптимальная продолжительность ГМТ-обработки до достижения максимума крутящего момента и минимума удельного расхода топлива. Если обработку не остановить и не удалить ГМТ с маслом, то параметры трибообработки ухудшатся, т. к. возможен срыв частиц покрытий и дальнейшее образование зон с повышенным трением [145].

Масштабными стендовыми испытаниями различных ГМТ на ДВС А. Ю. Шабанов [145] показал, что образование ГМТ-покрытий после некоторого времени обработки может пойти вспять, и назвал это явление наличием оптимальной точки обработки. Автор составов WL-Technology С. Н. Подчуфаров утверждает, что после непродолжительной обработки следует остановить ДВС на сутки-двое для резкой смены температур в поверхностях трибообработанных деталей и притока в ГМТ-покрытия атомарного водорода. Новообразованному и непрочному РВС-покрытию необходимо время

для упрочнения водородом (из смазки и из металла детали) и схватывания пленки с поверхностью трения. Если же непрерывно продолжать обработку, то непрочное ГМТ-покрытие трибосоставом же и истирается. А участие водорода в образовании ГМТ-покрытия путем присоединения к оборванным силоксановым группам (Si-O^\cdot) измельченного серпентина предположено В. В. Зуевым [45]. Но возможна и связь силоксановых групп с атомами железа поверхностей трения.

4. После ГМТ-обработки изменяется характер зависимости крутящего момента бензинового ДВС по частоте вращения коленчатого вала – расширяется зона частоты вращения с высоким и постоянным значением крутящего момента.

По-видимому, ГМТ-покрытия образуются только после дробления и активации трением частиц ГМТ, после образования трибоактивных ювенильных поверхностей трения абразивными (твердость 6–7 по шкале Мооса) продуктами разрушения серпентина: форстеритом (Mg_2SiO_4), кварцем (SiO_2) и другими абразивами – цеолитом, монтмориллонитом, каолином, тальком, а по В. В. Зуеву и высокодисперсным кварцем, хлоритами, т. к. все они по структуре – слоистые гидросиликаты. Ювенильная поверхность может образовываться на многих металлах.

Активная роль в трибопроцессах ювенильных кристаллических поверхностей, очищенных от различных наслоений и пленок, от разрушенных структур кристаллов, показана еще в 1963 г. трибологом А. С. Ахматовым, а также находит подтверждение в том, что кроме серпентинов ГМТ-покрытия образуют многие минералы как мягкие абразивы, открывающие ювенильные поверхности металлов.

ГМТ-покрытие со временем изнашивается (в ДВС – за 500–700 ч работы), поэтому его нужно обрабатывать повторно. Наиболее удобны для ГМТ-обработки дизели, а масло в них по мере обработки, как бы обновляясь, заметно светлеет.

Наиболее важные ГМТ-проблемы:

- оптимизация состава сырья (фракционный анализ, дифрактометрия для фазового и химического анализа) для обеспечения в трибосоставе преобладания микрочешуйчатых частиц «Лизардит-1Т»;
- оптимизация метода механоактивации (пыль пересушенного порошка не работает);
- оптимизация баланса абразивных и активных компонентов ГМТ для обеспечения физической химии мономолекулярного наслоения покрытия;

- оптимизация количества ГМТ для узла, агрегата с учетом режима трибообработки, материала узлов трения;
- эксплуатационный контроль эффективности ГМТ.

Неполное разрешение приведенных проблем тормозит развитие ГМТ-технологии и сохраняет к ней недоверие.

Пленочные ГМТ-покрытия от микрона (5–10 мкм, редко – до десятков мкм) заметно уплотняют зазоры в сопряжениях. Для ЦПГ это можно объяснить закрытием рисок на гильзах цилиндров и поршневых кольцах, а также высокой сорбцией покрытий к маслу, что впервые было обнаружено Н. В. Ветчинкиным на кулачках распределительного вала ГМТ-обработанного ДВС.

Благодаря высокой сорбции к маслу ГМТ-покрытия могут годами работать без масла, что подтверждено испытаниями обработанных ДВС автомобилей, других агрегатов, испытаниями авторитетного журнала «За рулем» при сравнительном пробеге двух автомобилей на 150 км, полномсменной работой без масла дизеля автосамосвала в Китае и многими другими примерами безаварийной работы автотранспорта без масла [32].

Доказательством ГМТ-процесса являются и шлифы среза ГМТ-обработанных деталей различных агрегатов: в ИМАШ РАН, в ТК «НЕОСФЕРА» при исследовании трибосостава А.Р.Т., у С. Н. Подчуфарова, В. Ф. Пичугина (РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина).

Если рассматривать классическую трибологию при сухом или смешанном трении в стандартных смазках с присадками и без них, то без трибосоставов образование новых структур на поверхностях трения и активация их состояния – естественное и неизбежное явление, обусловленное «молекулярно-механической» природой трения. При отсутствии агрессивного влияния трибосреды поверхности трения подвергаются воздействию следующих процессов и явлений:

- механических: упругая и/или пластическая деформация с течением поверхностных слоев;
- адгезионных: схватывание и вырывание частиц поверхностей, образование ювенильных, каталитически активных поверхностей;
- хемосорбционных: образование новых соединений и поверхностных структур;
- термических: окисление, реструктуризация, образование новых фаз;
- диффузионных: дрейф одних атомов химических элементов вглубь, а других – к поверхности детали, например обезуглероживание, наводороживание, движение вакансий и дислокаций и др.;

– электрических: образование зарядов, их переток с поверхности, где низка работа их выделения, на поверхность с высокой работой выхода зарядов, с искрообразованием и возможным образованием трибоплазмы.

Следует учесть и процессы в самой смазочной трибосреде: окисление, деструкция, трибополимеризация, загрязнение внутренними и внешними продуктами, изменение ее конституционных и уменьшение функциональных свойств, что отражается на кинетике указанных процессов на поверхностях трения.

Комплекс явлений при трении включает непрерывное чередование процессов: взаимодействие поверхностей с образованием новых структур, разрушение и восстановление новых структур, безвозвратное разрушение поверхностей при сверхкритических режимах трения с аварийным изнашиванием [32, 44, 58, 97, 145].

При наличии же в трибосреде активных добавок, умеренных стационарных режимах трения главными могут становиться иные процессы, особенно после образования триботехнической пленки, когда дальнейшее ее наращивание от единиц до десятков микрометров уже не связано с явлениями на исходных поверхностях деталей.

Процессы взаимодействия поверхностей трения и трибосреды включают разнообразие механического контактирования, химических и электрических явлений, термических и диффузионных процессов. При наличии добавок их набор, последовательность, интенсивность проявления изменяются с динамикой нагрузочно-скоростных и температурных режимов трения, физико-механических и других характеристик среды, порой неизвестных и меняющихся в процессе трения.

Механизм образования ГМТ-покрытий изучен мало. Практики, успешно применяющие ГМТ, имеют о нем противоречивые представления.

Первое предположение горняков – исследователей ГМТ-технологии: образование на поверхностях трения «природных зеркал скольжения». Это предполагает «футеровку» поверхностей трения неизменным ГМТ, но идентичности химического и фазового состава ГМТ и образованного им покрытия не наблюдается.

Самая распространенная гипотеза – «технологическая» от НПО «Руспромремонт», аналогичная вышеприведенной, т. е. нагартовка (механическая напрессовка на поверхностях трения продуктов измельчения и деструкции минералов). Достоинство этой гипотезы – учет давления, одного из главных факторов ГМТ-процесса. Гипотеза

подтверждается тем, что образование покрытий идет и при натирании колес локомотивов на самих колесах и на железнодорожных рельсах, и тем, что при усиленной обработке трибосоставом повышенной концентрации возможны вырывы частиц покрытий. Но и эта гипотеза не объясняет сложный состав ГМТ-новообразования с маслом, существенно отличающегося от состава ГМТ.

Другие исследователи ГМТ-технологии предполагали, что трибообработка – результат микрометаллургических процессов в локальных точках контакта. Достоинство этой гипотезы – учет температуры, другого важнейшего фактора трибохимии. Разрушение частиц минералов и деформация выступов микрорельефа поверхностей трения могут сопровождаться локальным повышением температуры, по некоторым данным до 1000 °С, благодаря чему в присутствии ГМТ могут происходить микрометаллургические процессы плавки. При этом предполагают диффузию некоторых продуктов деструкции серпентинов в металл деталей, что обеспечивает хорошую адгезию покрытия.

Однако в слоистом аморфном покрытии выявлены элементы Fe, C, O, а количество Mg и Si незначительно или находится за пределами чувствительности анализаторов (менее 1 %); отмечено преобладающее (70–85 %) количество углерода, небольшое (3–5 %) количества железа, что не подтверждает достоверность микрометаллургии и металлокерамики. В отношении этой гипотезы в НИИФ «Энион-Балтика» считают, что термическое разрушение и обезвоживание серпентинов дают негативные результаты.

В трибологической лаборатории китайского университета Циньхуа [153] предполагают, что матрица покрытия металлокарбидная, по толщине неоднородна, с вкраплениями зерен, богатых углеродом до 90 %, что близко к алмазоподобным углеродным пленкам (DLC-films). Углерод из масла может поставляться трибоплазмой, возникающей при дроблении частиц минералов с пьезосвойствами.

Особенности ГМТ-покрытия: слоистость, нарастающая аморфность, зеркальная чистота 14 класса (ГОСТ 2789–59, $R_a = 0,006–0,160$ мкм), соответствующая только мономолекулярному наслаиванию. Высокая маслоудерживающая способность способствует смешанному (полужидкостному) режиму трения.

Подтверждено явное превалирование в покрытии углерода, поэтому оно и прочное, и пластичное, и «скользкое». Обладая самой высокой пластичностью (аллотропностью) из всех известных

элементов, углерод и обуславливает необычные свойства покрытий. Ими можно управлять по методике трибообработки [4, 145].

Целостный анализ ГМТ-покрытий и кинетики их образования не подтверждает гипотез НПИФ «Энион-Балтика» и явлений [13] замещения магния в серпентине железом с поверхностями трения, а железа на поверхностях трения – магнием из серпентина.

Так как ГМТ-покрытия, по некоторым данным, образуются и на поверхностях подшипников дизелей из цветных металлов, на червяках редукторов без наличия железа, то версии образования ГМТ-покрытий по механизму обмена атомов Fe и Mg сомнительны.

Другие гипотезы – частные случаи действия конкретных составов:

– по О. Г. Павлову, важна роль железосодержащих компонентов ГМТ для начальной адгезии его частиц. Это не противоречит роли ювенильной поверхности трения, но на цветных металлах роль железа сомнительна, а покрытия по И. Ф. Пустовому, А. Ю. Герману, А. А. Гвоздеву все же образуются, хотя теоретически этого не может быть. Поэтому затравка процесса неясна, хотя сталагмитовая структура по Д. Н. Любимову [63] может ее прояснить;

– в НПЦ «Конверс-Ресурс» действие трибосостава «СТРИБОЙЛ» из солей меди жирных кислот и серпентина объясняют с позиции избирательного переноса. Однако редко реализуемый избирательный перенос проявляется лишь при строго определенных сочетаниях материалов пар трения и трибосреды: при трении стали по медным сплавам, в кислых средах (в глицерине, спиртоглицериновых средах, ПАВ, морской воде), в определенных нагрузочных, скоростных и температурных режимах. Медь в трибосоставе «СТРИБОЙЛ» имеется, но электролита в моторном масле нет, трибосреда не кислая, а щелочная. Трибообработка составом все же проводится, и основную роль, вероятно, играет серпентин;

– кристаллохимический механизм работы и методы использования минералов в качестве модификаторов трения обосновываются в работах одного из исследователей ГМТ-технологии – академика РАЕН В. В. Зуева, в т. ч. его геоэнергетическая позиция [45].

Представления В. В. Зуева [45]: в силикатных геомодификаторах имеются силоксановые (мостиковые) связи Si–O–Si, при разрыве которых с измельчением минерала образуются оборванные связи Si–O[•] или Si–O⁺, являющиеся активными акцепторами водорода в форме H⁺ или H[•]. При их взаимодействии образуются скомпенсированные силанольные группы Si–OH. Поэтому тонкоизмельченный

серпентин с большой удельной поверхностью и большим числом оборванных силоксановых связей является эффективным адсорбентом атомарного водорода, предотвращая водородное изнашивание.

Согласно В. В. Зуеву, вода весьма конструктивна в трибосреде, она создает условия для явлений проводимости, диффузии ионов и массопереноса, а также окислительно-восстановительных процессов для металлов переменной валентности (Fe, Cu, Co, Ni, Ti, V, Cr) на поверхностях деталей и в ГМТ. Поэтому явления с участием воды как среды-катализатора, образующейся при деструкции серпентинов, обеспечивают условия для формирования антифрикционных пленочных зеркал скольжения [45]. Одновременно происходит упрочнение поверхностей путем залечивания дефектов, заполнения вакансий и устранения других нарушений, что приводит к созданию более совершенной кристаллической структуры поверхностей трения и к продлению их ресурса.

Способность аккумулировать и удерживать воду – второе важное свойство ГМТ [45]. Оно определяется их составом (наличием ОН-групп конституционной воды) и способностью взаимодействия с водой, мерой чему является энергия смачивания. По этому параметру основные ГМТ обладают существенным преимуществом перед традиционными твердыми смазками – графитом, тальком, молибденитом, у которых ярко выражена гидрофобность, а серпентины – гидрофильные минералы [45].

В. В. Зуев высказал предпосылки к ГМТ-процессу, не раскрывая его. Повышенное содержание углерода в ГМТ-покрытии им также не объяснено.

Заслуживают внимания физико-химические представления Д. М. Телуха. Его проверки показали [122], что фактически большинство ГМТ содержат лизардит, кальцит, доломит, клинохлор, мусковит, тальк, кварц, шпинель и другие незначительные примеси. Некоторые порошки ГМТ имели заметное содержание шпинели и кварца, являющихся абразивами в антифрикционном составе, поэтому выявлялось негативное влияние ГМТ при его передозировках, но, по данным МИИТ, содержание в ГМТ мягких абразивов и бемита производства ГОСНИТИ до 4 % все же благоприятно [32].

Серпентины (твердость – 2,5–3,5 по Моосу, или 70–150 кгс/см²) – самая мягкая основа серпентинита [122]. Атомы силикатных плоскостей серпентинов соединены сильными ковалентными связями, связь же между плоскостями посредством магния слабее, по ним

и происходит сдвиг слоев частиц трибосостава. Кроме того, серпентины обладают повышенной адгезией к кристаллам железа благодаря высокой спайности силикатных плоскостей, поэтому на поверхностях трения могут образовываться прочные силикатные слои, соединенные жидкой гидрофильной прослойкой, исключая адгезионное схватывание и обеспечивающие полужидкостную смазку, что значительно уменьшает силу трения. Образующиеся покрытия обуславливают также малую теплопроводность – в десятки раз ниже, чем у твердых смазок, – что дает высокую термостойкость покрытиям, но снижает теплоотвод из зон трения.

Полиморфные разновидности серпентинов обладают устойчивыми отличиями в кристаллохимическом строении. Их кристаллическая структура – многоэтажные слои, образованные кремнекислородной тетраэдрической и бруситоподобной октаэдрической сетками, соединенными через общие вершины. Слои могут быть плоскими или дугообразными. Присутствие брусита и кварца в ГМТ положительно влияет на его свойства. Брусит $Mg(OH)_2$ обладает слоистой структурой, механически легко разрушается, является диэлектриком. Это сравнительно низкотемпературный минерал, который при разложении дает необходимые для процессов ионообмена магний и воду [122]. Высокие же пьезоэлектрические свойства кварца способствуют подавлению трибоэлектричества.

Игольчатый хризотил-асбест в составе серпентинов ухудшает свойства ГМТ [122]. Пластинчатые серпентины, в особенности антигорит, – наиболее стабильная модификация, устойчивая к механическому воздействию и высоким температурам, благоприятная для формирования трибопокрытия. Наиболее ценная триботехническая разновидность серпентина – тонкозернистый лизардит, напоминающий по структуре антифрикционный сплав [122]: в мягкой пластинчатой и волокнистой основе – твердые кремнекислородные кристаллы. Приготовление ГМТ из разновидностей серпентина должно учитывать их фактический состав и структуру. Отсюда следует, что воспроизвести особенности строения и свойства ГМТ искусственно невозможно.

Для сохранения уникальных свойств серпентинов нельзя подвергать их «жесткому» наноизмельчению, т. к. они теряют структуру и трибоэффективность. Нецелесообразно их измельчение в водной фазе. Для уменьшения содержания адсорбированной воды С. Н. Подчуфаров подвергает порошки WL тепловой обработке.

В трибопаре частицы серпентинов, оптимальные размеры которых – 20–40 мкм, измельчаются до 2 мкм, что соответствует оптимальной шероховатости и наибольшей износостойкости сопряжений. Более мелкие частицы, особенно меньше толщины масляной пленки и расстояния между впадинами шероховатостей контактирующих поверхностей, коагулируются в конгломераты размером 100–120 мкм, отфильтровываются в системе смазки и в трибопроцессе не участвуют, поэтому в трибосоставах нежелательны. Использование термина «наноматериалы» для серпентинов неуместно.

При низкой температуре дегидратации лизардита (до 150 °С) в большей мере происходит его деструкция, уменьшение размеров частиц, что предотвращает царапание ими поверхностей трибопары. Это обеспечивается только за счет тщательного отбора, очистки от твердых инертных примесей и фракционирования порошков.

Способностью инициировать пиролиз, карбонизацию и трибополимеризацию, образовывать DLC-подобные пленки кроме серпентинов обладают и другие силикаты [32, 45, 122], характеризующиеся гидрофильностью, способностью связывать углерод и углеродсодержащие структуры из воздуха (CO₂), растворов масел, смазок, – диопсид, энстатит, хлориты (более перспективные, по мнению В. В. Зуева), высокодисперсный кварцит. Даже разные по составу, но правильно подобранные для условий работы конкретных трибопар мягкие абразивы, обуславливающие ювенильные поверхности, могут быть триботехнически эффективны.

Под действием давления измельченные частицы ГМТ вдавливаются во впадины рельефа [122]. Благодаря выделению тепловой энергии и активности металлов ювенильной поверхности возможно замещение атомов магния в серпентине атомами железа, а атомов железа деталей – атомами магния. Скорость наращивания ГМТ-покрытия пропорциональна вспышкам температуры и давлению в пятнах контакта.

Пример структуры одного из известных ГМТ-составов (% мас.): серпентины – 70, энстатит – 20, магнетит – 10. Химсостав (% мас.): SiO₂ – 33–35, MgO – 20–35, FeO – 5, Fe₂O₃ – 15, Al₂O₃ – 3, S – 6 и др. [122].

Заключительная фаза образования ГМТ-покрытия – спекание вторичных частиц под действием давления и нагрева с образованием сплошного покрытия из металлов, углерода, кремния, что характеризуется некоторыми исследователями как металлокерамика, хотя состав ГМТ-покрытия, по исследованиям в Китае, Франции и Финляндии для ТК «НЕОСФЕРА», совсем другого рода [32].

При размере чистого порошка серпентина 5–40 мкм его рациональное содержание в маслах – 0,05–0,50 %, не более 3 % мас., а в пластичных смазках – не более 4 % мас. При большей концентрации, как показали исследования МИИТ, абразивное изнашивание составами будет подавлять процессы наращивания покрытия.

Для гипотезы механотермохимического преобразования серпентинов [122], где первым этапом является их дробление и «терка» поверхностей трения, важны соотношения размеров их частиц с зазорами в трибопаре и твердостей компонентов ГМТ – с твердостью поверхностей деталей. В НАМИ М. А. Григорьевым [19, 20] проведены исследования версий поведения в трибопаре частиц минералов (при их твердости, сопоставимой с твердостью поверхностей деталей или превышающей ее) и предложены четыре версии поведения частиц минералов в трибопаре:

1. Частицы шаржируют деталь пары с наименьшей твердостью, если наименьший диаметр частиц D больше зазора в паре λ , но меньше критического размера измельчения D_{δ} , при котором частицы могут дробиться: $\lambda < D \leq D_{\delta}$.

2. Частицы дробятся, если их наименьший диаметр больше зазора λ и размера измельчения D_{δ} : $\lambda < D > D_{\delta}$.

3. Частицы не шаржируют детали трибопары, могут дробиться, если они меньше зазора в паре, но больше размера измельчения D_{δ} : $\lambda > D > D_{\delta}$.

4. Частицы мигрируют в трибосреде без какого-либо взаимодействия, если они меньше зазора в трибопаре и размера измельчения: $\lambda > D < D_{\delta}$.

Для механического воздействия поверхностей трения на частицы ГМТ должны обеспечиваться 2-го и 3-го состояния трибопар. В реальных агрегатах встречаются все варианты поведения частиц, и последние могут измельчиться до триботехнического балласта, если поступление свежих частиц прекратится.

Следовательно, для активного ГМТ требуется абразивное его воздействие на поверхности трения и дробление частиц. Размер частиц ГМТ должен составлять не менее толщины граничной пленки гидродинамической смазки, а лучше – превышать ее, т. е. составлять не менее 5–7 мкм. Твердость же частиц должна быть сопоставима с твердостью поверхности самой мягкой детали трибопары, поэтому для разных трибопар нужно подбирать различные ГМТ.

На высокотемпературных поверхностях деталей происходит термодеструкция масел с образованием тяжелых фракций и адгезия их пленок. В результате может образовываться композиционный слой из продуктов разложения масла и серпентинов (рис. 6.4–6.6). В формировании РВС-покрытия предположительно участвует и явление лакообразования [32], т. е. отложения смол на нагретых деталях ДВС в результате термоокисления масел. На днище поршня, в поршневых канавках, на верхней части гильзы, на головке цилиндров, нарастая и подвергаясь длительным термохимическим нагрузкам, лаковая пленка преобразуется в нагар. А тонкая пленка на рабочей части гильзы, на юбке поршня может долго сохраняться, уменьшая их изнашивание. В 70-х гг. в журналах «Двигателестроение» и «Вестник машиностроения» велись дискуссии о пользе или вреде этой пленки.

Лаковая пленка, образуемая трибополимеризацией при катализе ювенильными поверхностями металлов, открытой в 60–70-х гг. Ю. С. Заславским, Н. Р. Заславским, может способствовать одной из начальных стадий ГМТ-процесса.

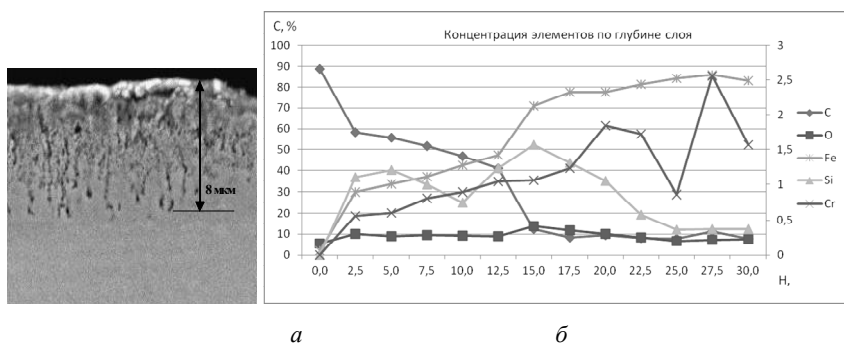


Рис. 6.4. Характеристики ГМТ покрытия:
а – микрошлиф (4000х) [86] среза гильзы цилиндра дизеля 16V280Z китайского тепловоза DF-11 с пробегом 150 тыс. км после двукратной обработки А.Р.Т.-составами О. Г. Павлова (ТК «НЕОСФЕРА»): просматривается граница между подложкой и поверхностным ГМТ-слоем;
б – элементный состав ГМТ-слоя по глубине по данным исследовательского центра в Хельсинки (табличные данные переведены в график Ю. Г. Лавровым в НИТК «СУПРОТЕК»): на поверхности детали, т. е. на глубине 25–30 мкм, преобладают химические элементы из состава стали, а глубже – углерод

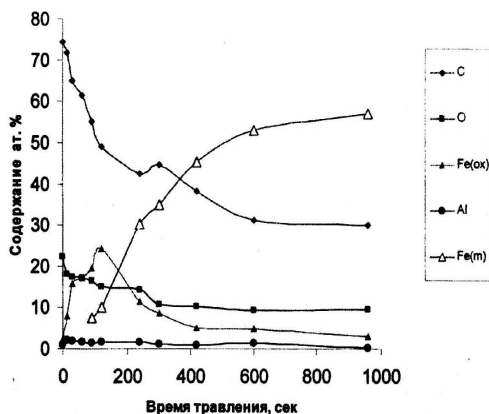


Рис. 6.5. График выявленной травлением динамики элементного состава углеродсодержащего антифрикционного покрытия, образованного в трибопроцессе с алюминийсодержащей смазочной композицией по исследованиям В. Ф. Пичугина [28, 93] в РГУ НиГ им. И. М. Губкина: на поверхности трения преобладает углерод

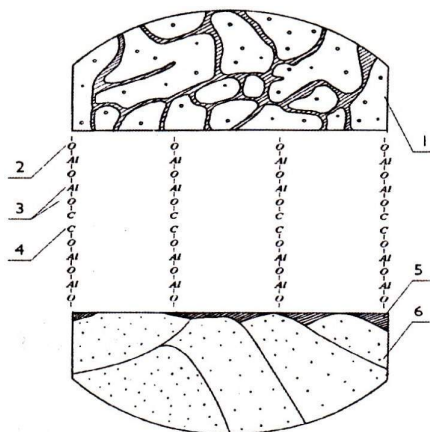


Рис. 6.6. Состав и строение покрытия на поверхностях пары «антифрикционный сплав–сталь», работавшей в глицерине по В. Ф. Пичугину (РГУ НиГ им. И. М. Губкина):
 1 – алюминиевый сплав; 2 – кислород; 3 – окиси алюминия; 4 – углерод;
 5 – алюминиевый сплав; 6 – сталь (на обеих деталях – углеродная пленка) [28, 93]

Версии образования ГМТ-покрытий противоречивы, что связано с недостатком знаний о процессах трения с ГМТ в различных условиях, в то время как исследованы только состав и свойства покрытий.

Для обоснования правдоподобной версии необходимо учитывать все особенности процессов при разнообразных способах применения ГМТ как в маслах, так и на сухую. По версии [68, 86], вначале происходит подтверждаемая многими наблюдениями «терка» – очистка поверхностей трения от наслоений, окисных пленок, непрочных деформированных структур кристаллов абразивным и кавитационным воздействием частиц ГМТ и тем самым открытие ювенильных, каталитически активных поверхностей трения, описанных А. С. Ахматовым [4].

Сопутствующим фактором является свойство свежееобразованных ювенильных поверхностей твердых тел испускать электроны высоких энергий, что согласно открытию № 290 от 03.12.1952 г. приводит к возникновению сильных электрических полей напряженностью до 10^7 В/см. Авторы этого открытия (Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. В. Карасев) оценивали возможность использования этих явлений при радиационно-химическом модифицировании поверхностей твердых тел. Возможно, полимерная пленка образуется и на электрических контактах, если вблизи есть пары углеводородов.

Важная роль ювенильных каталитически активных поверхностей подтверждается и тем, что образование ГМТ-покрытия идет при использовании, по Д. Н. Телуху, различных мягких (твердостью до 2,5 по Моосу) абразивов: всего многообразия серпентинов, монтмориллонита, каолинита, цеолита, других минералов, а по В. В. Зуеву [45] – даже высокодисперсного кварца.

Другую картину дают исследования Д. Н. Любимова [68]. После трения стальной пары «палец–диск» под давлением 0,5 МПа и при скорости скольжения 1 м/с выявлено, что общая толщина покрытия из двух слоев составила 1000 нм: минеральный ячеистый «скелет» – 400–600 нм, слой трибополимера – 200–400 нм.

Каталитически активные поверхности трения совместно с активно действующими частицами минерала образуют на гранях кристаллов металлов минеральный, сталагмитовый по форме, пространственный каркас (рис. 6.7) [68]. На нем идет пленочная трибополимеризация, открытая в 50-х гг. Ю. С. Заславским и Н. Р. Заславским, аморфного микропористого пленочного покрытия, возможно с сорбционной способностью к маслам, чем можно объяснить повышение пневмоплотности и компрессии в ЦПГ.

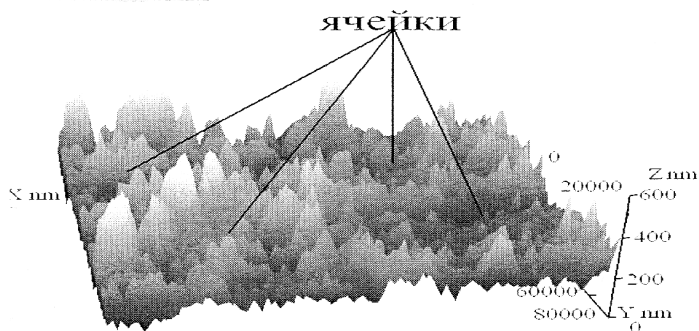


Рис. 6.7. Топография поверхности после трения в смазочной композиции с ГМТ: видна пространственная сталагмитовая структура на гранях кристаллов металлов, на которой и растет антифрикционное ГМТ-покрытие [68]

Затем идет наращивание покрытий, когда поверхности стекловидных трибополимеров значительно удалены от металлов пар трения. Рост покрытий продолжается и после смены масла, а по НПИФ «Энион Балтика» – и без смазки, что пока необъяснимо. Таким образом, все гипотезы образования покрытий и обмен Fe с Mg несостоятельны.

Согласно изданию [68] минеральный фундамент ГМТ-покрытия имеет статистически регулярное ячеистое строение со стенками переменной высоты – до 1 мкм, крайне высокую адгезию к поверхности (хотя некоторые РВС-специалисты утверждают, что первичное ГМТ-покрытие легко снимается), высокую износостойкость и антифрикционность (испытания порошка серпентина при практически сухом трении на ЧШМ-1 дали значение коэффициента 0,6–0,8 без схватывания и задира). Исходя из строения пленки, исследованной ИК-спектрометром Cary-100 (Varian), и величины работы когезии ГМТ-покрытие идентифицировано как ячеистый минеральный скелет, прочно удерживающий слой трибополимера сорбцией и капиллярными силами, а трибополимер перешит избытком радикальных фрагментов и заполнен смазочным материалом [68]. Это соответствует весьма долгой работе некоторых ГМТ-обработанных агрегатов без масла.

Тонкая и прозрачная ГМТ-пленка, прочно связанная с дорожкой трения, гидрофобна (угол смачивания водой покрытия – 58° , а стальной поверхности – 12°), полярнее минерального масла (краевой угол смачивания при нанесении тонкого слоя масла – 85°), не смы-

вается растворителями, окрашивается жирорастворимыми красителями («Судан-Ж»). Удаляется только механически и обеспечивает в смазочной среде коэффициент трения не более 0,10 [68] (в смазочных композициях – 0,03–0,04; по результатам испытаний в Китае при трении на сухую в шадящем режиме (80 МПа) – даже 0,005 [153]).

Исследование состава пленки с помощью ИК-спектроскопии показало наличие связей С–Н (волновые числа 1376, 1458, 2853, 2923 см^{-1}), С=О (1650, 1745 см^{-1}), С–О–С (1029, 1072, 1119 см^{-1}) и О–Н (3615, 3649, 3673 см^{-1}), а также некоторого количества ароматических соединений (1520 и 1541 см^{-1}).

Поначалу образованию покрытия способствует чисто механическое взаимодействие частиц ГМТ с поверхностями трения. Если они ударяются о поверхности трения со скоростью не менее 10^{-1} м/с, то могут разрушаться, активироваться, а их осколки – дополнительно получать нескомпенсированные валентности. Если частицы ударяются об активные центры ювенильной поверхности на гранях ее кристаллов, то такое закрепление образует когезионную связь: касательные силы трения не отрывают осколки частиц, а прижимают их к поверхностям по ее активным центрам. Такой процесс благодаря активации поверхностей трения и частиц ГМТ приводит к образованию минерального скелета, а на нем – ячеистого пористого трибополимера в виде сетки нерегулярной структуры, во многом повторяющей структуру минерального скелета, сшитого из избытков радикальных фрагментов, и пропитанной смазочной средой, что и обуславливает высокие антифрикционные и противоизносные свойства ГМТ-покрытия. Преимущество гипотезы – учет активации поверхностей трения и частиц ГМТ при их ударах о поверхности трения, но и она не объясняет последующий рост ГМТ-покрытий от одного микрометра до десятков и сотен (по С. Ю. Лазареву – 300 мкм, заклинивание редукторов с чрезмерно толстым покрытием на зубьях зубчатых колес [64]), а также рост покрытия после удаления масла вместе с остатками непроработавших частиц ГМТ.

Для объяснения версий работы ГМТ следует проанализировать другие признаки работы ГМТ-технологии и свойства образуемых ею покрытий:

– медленный рост покрытия при малых дозах ГМТ в маслах, продолжение роста покрытия и после удаления ГМТ до полугода и позже, даже до 5 лет;

– светло-золотистый, светло-сиреневый цвет (рис. 6.8), прозрачность и зеркальная чистота покрытий, соответствующая 14-му классу шероховатости [32]. По данным В. Г. Рыжова, поверхность гильзы золотистого цвета, зеркальная, 15–16-го класса чистоты, а покрытие находится в стадии наращивания. Наклонные черные линии – риски от заводского хонингования (исходная ширина – 30–40 мкм). Темное зернистое пятно – естественная каверна на чугуне. Золотистые линии – частицы ГМТ-покрытия. Оно может увеличивать теплопередачу и маслофильность поверхности гильзы;

– раствором 2%-ой азотной кислоты покрытие не травится;
– согласно результатам рентгеновской растровой микроскопии (Самscan-4DV) покрытие резко отличается от подложки и пористо [32];
– множественные ГМТ-обработки автотракторных ДВС показали, что твердость слоя, образованного после длительной их работы (пробег до 100 тыс. км), такова, что расточка гильз цилиндров существенно затруднена и требуется четыре резца вместо одного.

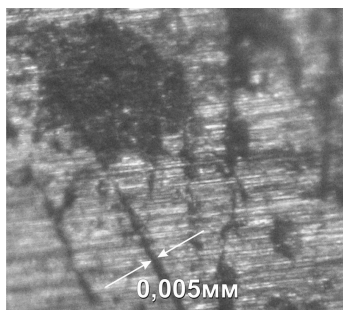


Рис. 6.8. Поверхность гильзы цилиндра ДВС (при освещении под острым углом, 100х) после пробега автомобиля 80 тыс. км до и 4,5 тыс. км после обработки составом РВД (В. Г. Рыжов, ООО «Триггер»)

Сложно объяснить то, что ГМТ работают не только в маслах, но и на сухую: на сверлах при сверлении в порошке ГМТ (по В. Г. Рыжову), на колесах при движении локомотивов (а с них передаются и на железнодорожные рельсы) и на деталях при мощных акустических воздействиях и посредством вибронатирания (по И. Ф. Пустовому). Носителем ГМТ могут быть разные материалы, по первичным наблюдениям известно повышение износостойкости колесных пар шахтных вагонеток от серпентиновой пыли и рудной

мелочи в горных выработках, а также повышение стойкости бурового инструмента при проходке серпентинитовых пород.

Известна версия Ю. С. Рыбникова создания железо-магниевого стекла, имеющего хорошее сродство к железу. Этой гипотезе соответствуют некоторые свойства покрытий, но остекловывание не объясняет маслофильность покрытия и наличие в нем заметного содержания углерода.

Действие ГМТ приводит к образованию им пленочных зеркал скольжения, что подтверждается микросондовым исследованием состава этих зеркал [45]. Тонкоизмельченный серпентин, обладающий большим числом оборванных связей, вместе с тонкоизмельченными ожелезненным кварцитом, гидрооксидами железа и магнетитом может создать условия для образования пленок путем соединения обрывков силоксанов с поверхностями трения. Однако В. В. Зуевым не изложен ход ГМТ-процесса, лишь его предпосылки, и не объяснены свойства покрытия с подавляющим содержанием на их поверхностях углерода [32].

Известна давняя версия инициации некоторыми явлениями трибоплазмы, обуславливающей полимеризацию компонентов трибосреды и формирование из них защитных DLC-пленок по гибридизации атомов углерода ([120], рис. 6.9, а).

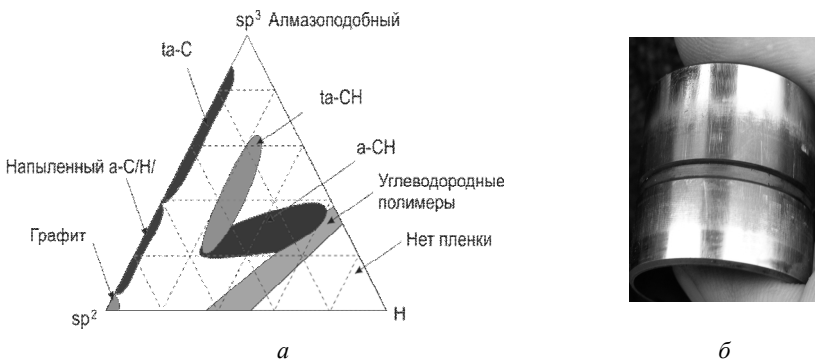


Рис. 6.9. Новые представления в модификации поверхностей трения:

- а – трехфазная диаграмма Робертсона и Феррари и области образования соединений с типовыми sp^2 - и sp^3 -гибридизациями углерода в зависимости от содержания в среде водорода и углерода [120];
 б – гидрокомпенсатор ГРМ дизеля MAN с алмазграфитной пленкой (С. А. Сокол); микротвердость по данным В. В. Острикова на его цилиндрической трущейся поверхности – 1840–1870 кгс/см², а на нетрущемся торце – 1220–1280 кгс/см²

DLC-пленка имеет следующие характеристики [32, 120]:

- 1) микротвердость 90–100 ед. по Виккерсу, что на 50 % выше, чем у азотированной стали (данные В. В. Острикова);
- 2) видимая глазу прозрачность пленки;
- 3) уменьшение пленкой коэффициента трения, например в паре «сталь/сталь» с синтетическим маслом на 30 % (по испытаниям трибосоставов С. А. Сокола в Наноцентре ГОСНИТИ на трибометре TRB-S-DE по схеме «палец–диск» в масле М-10Г_{2К} с давлением 60–80 МПа получены коэффициенты трения 0,027–0,030).

Технология синтеза DLC-пленок на поверхностях трения эффективна и при изготовлении деталей.

Следует учитывать явление полимеризации компонентов смазки с образованием «лаковой» пленки на высокотемпературных поверхностях трения ДВС. Можно предполагать совместимость катализа ювенильными поверхностями полимеров в ГМТ-покрытии с образованием лаковой пленки.

Насухую, в зубчатых передачах, в стволах оружия и орудий идет напрессовка частиц ГМТ с быстрыми физико-химическими преобразованиями их кристаллов благодаря высокому давлению и температуре.

Составлено заключение по результатам контроля работы тяговых тележек двух электровозов, где они были обработаны составом НИОД, а после масло было слито. За три месяца работы одного из электровозов толщина зубьев зубчатых колес редукторов увеличилась на 0,1–0,3 мм, а у другого электровоза (см. рис. 6.9, а) – на 0,6 мм. В НИИФ «Энион-Балтика», проводившей эти испытания, предположили, что рост толщины зубьев шел по химико-механическому легированию поверхностей зубьев и рекристаллизации стали.

В целом характерными, многократно подтвержденными особенностями ГМТ-покрытия из гидросиликатов магния, железа, никеля, позволяющими определить механизм их образования, являются:

– предпочтительное образование на железоуглеродных сплавах как при трении со смазками, так и при механическом натирании насухую и накатке, а из суспензии порошков – виброударным и ультразвуковым осаждением;

– пропорциональность толщины удельному давлению: на деталях ДВС обычно до 15 мкм, на шейках кривошипа тяжелых пресов – до 100 мкм, на зубьях зубчатых колес, по данным НИИФ «Энион-Балтика», – до 0,3, 0,6 и до 1 мм;

- прозрачность тонкого слоя, оранжево-золотистый цвет;
- медленное и длительное наращивание даже после смены и удаления смазки;
- маслофильность, повышенные твердость и электросопротивление;
- серпентиновый ГМТ работает независимо от его носителя до зоны трения.

В физико-химических процессах трения с различными ГМТ под влиянием давления, нагрева в образовании покрытия участвуют кремнекислородные соединения с активными металлами (магнием, алюминием, никелем), гидроксильные группы из ГМТ, особые соединения железа, а если ГМТ-процесс ведут в смазке, то и углеводородные радикалы, что доказано многими отечественными [13, 28, 45, 64, 68, 86, 93, 97, 99, 120, 122, 145] и зарубежными исследованиями на уникальной аппаратуре [152, 153].

В лаборатории трибологии пекинского университета Циньхуа [153] по заказу ТК «НЕОСФЕРА» (Санкт-Петербург) путем избирательной зонной дифракции, атомной электронной спектроскопии и конфокальной Раман-спектроскопии проведены анализы ГМТ-покрытий, а также эксплуатационные и лабораторные испытания ГМТ А.Р.Т. Тонкоизмельченные многокомпонентные смеси серпентиновых минералов (А.Р.Т.) с катализаторами способствуют [153]:

- механохимическим реакциям благодаря эмиссии частиц высоких энергий с образованных трением свежих (ювенильных) поверхностей;
- трибокаталитической карбонизации, графитизации и образованию твердых углеродсодержащих соединений;
- пиролизу углеродсодержащих соединений масел под влиянием некоторых каталитических элементов.

Обычно ГМТ-покрытия включают железо (15–17 % от трущихся поверхностей), углерод (60–65 %, на самой поверхности – до 100 %) из масел, а также кислород и водород трибохимических реакций [32, 153]. Содержание кремния и магния – менее 1 %. Толщина изученных покрытий – от пяти до нескольких десятков микрометров с упорядоченной аморфно-кристаллической структурой. Характеристики пленок: низкие коэффициент трения и теплопроводность, высокая прочность, микротвердость и коррозионная устойчивость.

Трибопокрытие, полученное в эксплуатационных условиях на гильзах цилиндров дизеля 16V280Z китайского тепловоза DF-11 [153], толщиной 8–10 мкм разделено пополам на слой и подслой

с различным элементным составом. Элементы из серпентина (Mg и Si) в покрытии также практически не выявлены. Его микротвердость по Виккерсу – 1119 Нv, что в два раза выше, чем у подложки, а шероховатость – 0,0694 мкм, что соответствует ультрагладкой зеркальной поверхности. Микротвердость H и модуль упругости Юнга E покрытия составляют 12,72 и 210 ГПа соответственно, а отношение H/E , как важный трибологический параметр, составляет 0,0606 [153].

В лабораторных условиях покрытие создавали на трибометре в течение 240 ч из того же трибосостава (А.Р.Т.) малой концентрацией (1,6 г/л) в моторном масле SD/CC SAE 40. Затем масло слили и провели трибоиспытание при давлении до 14,3 кг/см² и скорости скольжения 0,1 м/с. Покрытие обеспечило стабильно низкий коэффициент трения – 0,005, т. е. супермалянистость (Superlubricity) [153].

В этих покрытиях выявлено: Mg и Si также отсутствуют; элементов S, P и Zn из присадок в масле нет. Покрытие представлено как анизотропная нанокристаллическая матрица из Fe₃C, в которой рассредоточены наночастицы чистого железа, магнитного оксида железа (Fe₃O₄) и перекиси железа (FeOOH) [153].

Образованное на трибометре в ходе испытаний покрытие по изображению на SEM – это компактная структура толщиной 2 мкм без четко различимой границы с подложкой [153]. Его микротвердость в два раза больше, чем на стали Ст. 45. Отношение минимальной нанотвердости (13,32 ГПа) к максимальной упругости покрытия (240 ГПа) H/E , важных для оптимизации трибологических свойств нанокристаллических покрытий, составляет 0,0555, что соответствует высоким триботехническим свойствам [153].

Высокая поверхностная твердость с высокой эластичностью и соответствующим отношением H/E , более полно и точно коррелируемые с триботехническими свойствами покрытий, обеспечивают небольшую упругую деформацию нанокристаллических поверхностей с эластичным микроконтактом, что эффективно исключает пластическую деформацию, адгезию и истирание. Высокая триботехническая эффективность покрытия объяснена также благодаря трибохимическим формам оксидов и гидроксидов железа со слабыми водородными связями между O-содержащими соединениями железа, блокирующими адгезию, а также наноразмерностью шероховатости [153].

Спектр комбинационного рассеяния, полученный с поверхности покрытия на гильзе цилиндра дизеля с помощью Raman-спектрометрии на конфокальном спектрометре RM2000 [153], показал наличие

равных по интенсивности *D*- и *G*-пиков углерода, свидетельствующих о том, что аморфные нанозерна в покрытии вероятны из DLC-структур, т. е. из алмазоподобных углеродных пленок.

Данные китайских исследований [153] подтверждены аналогичными исследованиями во французской лаборатории [86].

Таким образом, исследованиями [13, 28, 45, 64, 68, 86, 93, 97, 99, 120, 123, 145] доказано, что разные трибосоставы, особенно серпентиновые из $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$, эффективно генерируют ГМТ-покрытие как в лаборатории, так и в условиях эксплуатации различной техники.

Антифрикционные, противoadгезионные (неактивные) покрытия, поверхности которых далеки (от микронов до десятков микронов) от подложки, по неизвестным причинам продолжают свое наращивание, что противоречит вышеизложенному. Трибологом А. С. Ахматовым обобщены механо-химические явления, отслеженные с 40-х гг. При механическом воздействии на цепочечные молекулы углеводородов происходит их разрыв с протеканием необычных химических реакций. Разрывы цепей возникают именно из-за механических напряжений в цепях, превышающих предел их прочности, а механическими воздействиями на углеводороды могут быть растирание, диспергирование, кавитация, продавливание через микроканалы и щели, что и имеет место, например, в ЦПГ ДВС. Под действием больших локальных давлений наблюдается нарушение ковалентных связей с энергией порядка 100 ккал/моль, разрываются связи C–C с энергией порядка 80 ккал/моль, и таким механическим путем возникают свободные радикалы, например $R-CH_2^{\cdot}$, обладающие высокой реакционной способностью. После их образования дальнейший ход химических реакций может быть различен [4]. Так, если механической обработке подвергается смесь двух и более видов гомогенных цепей, то в результате механо-химических эффектов могут возникать новые гетерогенные цепи, построенные из различных блоков. Согласно исследованиям А. С. Ахматова, в условиях механо-химических явлений возможны и прямые химические реакции свободных радикалов с ювенильной поверхностью металлов на участках ее обнажения при трении и износе. Можно предположить, что механо-химические явления имеют место и при трении со смазкой, когда механической деструкции могут подвергаться высокомолекулярные молекулы смазки. Именно этим частично и объясняется смазочная способность неполярных углеводородов [4].

Неоднократно выявляется трибодеструкция смазок с выделением водорода и метана в результате трибохимической активации материалов в зоне трения и разрыва связей в углеводородах. Интенсивность выделения водорода и метана значительно возрастает с повышением сил трения, хотя трибовыделение водорода может снижаться примерно в два раза, а выход метана остается прежним с повторяющимися всплесками.

В подтверждение предположений А. С. Ахматова выявлено образование полимерных пленок из свободных радикалов органических веществ, образующихся при деструкции смазки на активных центрах частиц минералов [68], разрушающихся в процессе трения. Активными центрами и частицами реагентов могут быть и точки контакта поверхностей трения, заново образующихся при трении в среде минералов. Частота эффективных столкновений частиц, зависящая от нагрузочно-скоростных режимов трения, и количество активных центров в единице объема реакционной среды, зависящее от свойств ГМТ, определяют скорость трибохимических реакций, т. е. интенсивность образования ГМТ-покрытия [68].

Предварительно предполагается следующий набор ГМТ-трибопроцессов в углеводородных жидкостях:

- абразивная очистка поверхностей трения от наслоений, окисных пленок, менее твердых, чем основной металл, разрушенных частиц кристаллов с открытием ювенильных, каталитически активных поверхностей трения;
- вывод загрязнений в смазочное масло и в маслофильтры, что подтверждается многими РВС-технологами;
- механо-термо-химические преобразования частиц серпентинов и образование ими минерального наноразмерного каркаса;
- гипотетические ионно-обменные и диффузионные процессы;
- трибополимеризация компонентов трибосреды и образование полимерной пленки, заполняющей минеральный каркас с образованием фрикционно-адаптированной пары, отличающейся низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью.

Исследователи РВС-технологии сообщали, что РВС-процесс может идти и в водных, и в атмосферных условиях с потреблением CO_2 . Возможно, в смазках и без них (насухую) идут разные трибопроцессы.

Несмотря на уверенность некоторых исследователей в образовании металлокерамических покрытий, в ГМТ-покрытии имеется

только значительное количество углерода, отсутствующего в серпентинах, небольшое количество железа и кремния (рис. 6.4–6.6). Сведения о химическом составе ГМТ-покрытий, полученные при исследованиях в России, Китае, Франции, Финляндии, явно не соответствуют в ГМТ-покрытии металлокерамики.

При использовании ГМТ одним из ведущих механизмов образования антифрикционных ремонтно-восстановительных покрытий в смазках может быть *трибополимеризация компонентов трибосреды на минеральном наноразмерном каркасе*. ГМТ-покрытия в особых условиях образуются и на сухую. Общей чертой способов образования в смазках и на сухую является быстрая модификация трибосреды и поверхностей трения под высоким давлением. Для выяснения механизма ГМТ-процесса при трении на сухую необходимы данные о структуре и фазовом составе покрытий.

Большое количество гипотез, объясняющих образование ГМТ-покрытий в смазках и на сухую, свидетельствует о сложности и многогранности комплекса явлений в нетрадиционной триботехнике. По мере углубления их изучения они становились более понятными. Рассматривались одна или несколько сторон этих процессов, в действительности же процессы могут происходить разные.

6.1.4. Механизмы образования алмазоподобных углеродных пленок

С середины XX в. в трибологии описываются тонкие, но прочные алмазоподобные углеродные антифрикционные пленки (*diamond like carbon films – DLC-films*) [152]. Их образование при граничной или смешанной смазке приписывают трибоплазме (Кейджи Накаяма) [120]. Из-за высоких механических и триботехнических показателей (рис. 6.10) DLC-пленки широко используются за рубежом в разных узлах, о чем свидетельствуют два объемных издания в США и Франции [151, 152].

Семейство DLC-покрытий было открыто в начале 50-х гг. в Германии, но не привлекло внимания, и только 1990 г. дал импульс их изучению. С 2000 г. и до сих пор эти пленки являются предметом многочисленных исследований [120].

В трибохимии нет единой теории, объясняющей многообразные физико-химические и электрические явления при трении, возникающие, например, при высекании искр во время взаимного удара кусков кварца. Это общность деформационных, термических, элект-

тромагнитных и химических процессов, включающих возникновение и миграцию дефектов структуры твердого вещества, его аморфизацию, быстрый локальный разогрев в месте удара. При образовании свежей поверхности химические связи рвутся, и на ней появляются короткоживущие активные центры. Идет эмиссия электронов, фотонов, ионов и возникновение электростатического заряда согласно рис. 6.11. В свете таких комплексных явлений синтез DLC-пленок при трении способен объяснить гипотеза инициации трибоплазмы (рис. 6.11, 6.12).

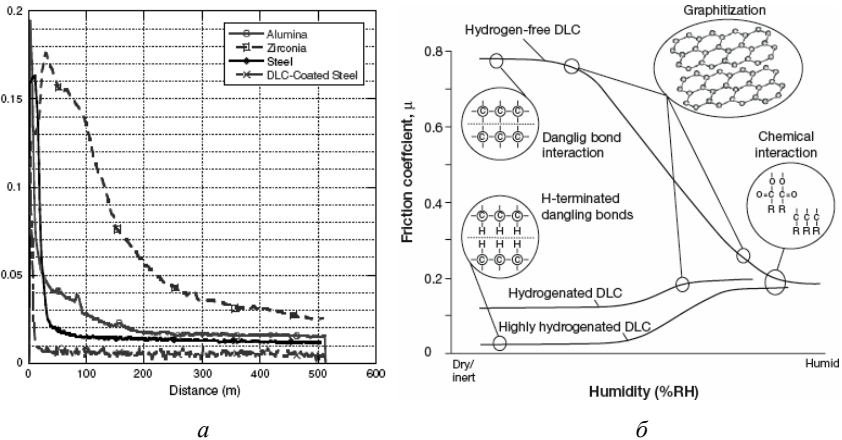


Рис. 6.10. Графики сравнения коэффициентов трения по стали некоторых специальных материалов, алмазоподобной углеродной пленки (а) и углеродных покрытий (б) с различным содержанием водорода в сухой и влажной среде [120]

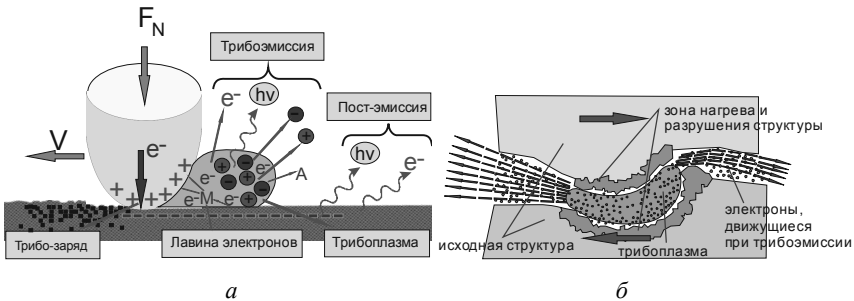


Рис. 6.11. Схема образования трибоплазмы (Кейджи Накаяма) [120]: а – открытый контакт; б – закрытый контакт

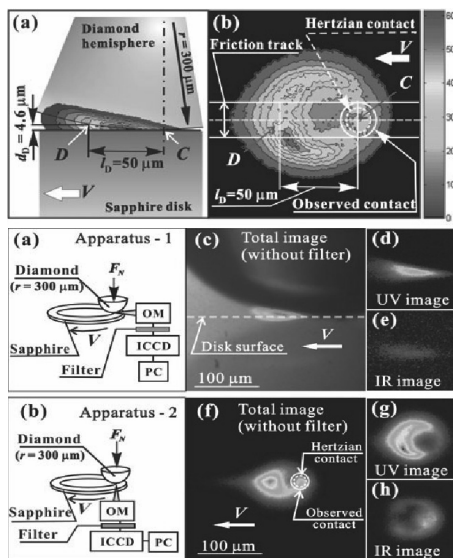


Рис. 6.12. Схемы образования трибоплазмы, генерируемой скользящим контактом между алмазной сферой и сапфировым диском (по Тиссену, Мейер и Хейнике)

Аналогичны представления немецкого физико-химика П. А. Тиссена об ударе зерен кварца друг о друга, когда происходит концентрация энергии в микроскопическом объеме. В результате на время (10^{-7} – 10^{-8} с) к контакту подводится большая энергия, площадь очагов разогрева составляет 10^{-2} – 10^{-4} см², их длительность – 10^{-5} – 10^{-3} с. Образуется тонкий слой расплава вещества в высокоэнергетическом состоянии аналогично плазме и магме (см. рис. 6.11, 6.12).

Экспериментально подтвердил наличие трибоплазмы в скользящем контакте алмазной сферы с вращаемым сапфировым диском в 2002 г. Кейджи Накаяма [120]. Им выявлены интенсивное инфракрасное излучение от нагрева поверхности трения и ультрафиолетовое излучение газового разряда вне контакта, локализованного между зазором сферы и диска в пределах от 1,3 до 7,8 мкм согласно рис. 6.12 [120].

Интенсивность излучения около скользящего контакта растет с увеличением удельного сопротивления материалов, что свидетельствует о том, что плазма генерируется электризацией трением. Предполагается, что эмиссия электронов с поверхности трения воздействует на смазочный материал, в который может быть введен катализатор DLC-пленок.

Образование DLC-пленок подтверждено многими исследованиями, в т. ч. Raman-спектроскопией [120]. Это не противоречит эффективности геомодификаторов с высокодисперсными и обычными частицами (5–40 мкм). По данным С. А. Сокола [120], образование DLC-пленок при высокодисперсных серпентинах в масле происходит менее чем за 15 мин, а перерыв в трибообработке, чтобы непрочный трибослой окреп благодаря адсорбции атомарного водорода, не обязателен.

Общие условия образования алмазоподобных углеродных пленок показаны на диаграмме Робертсона–Феррари (см. рис. 6.9, *a*), где изображены области различных соотношений содержания углерода и водорода в структуре среды начиная от исходных концентраций чистых элементов к их смесям. Показана также динамика изменения (с позиций sp^2 - и sp^3 -параметров гибридизации) структур материалов относительно содержания водорода вплоть до образования углеродных DLC-покрытий.

После определения механизма образования алмазоподобных покрытий при трении в ряде исследований такая пленка создавалась искусственно специальной аппаратурой.

6.1.5. Характеристика наноразмерных алмазных трибопрепаратов

Все алмазные трибопрепараты – это суспензии наноразмерных частиц алмазов в инертных маслах, совместимых со всеми моторными, трансмиссионными и другими маслами и пластичными смазками. У кристаллов наноалмазов (НА) химически пассивное ядро классического алмаза имеет почти круглую или овальную форму и химически достаточно активную поверхностную «бахрому» из неопасных для живого организма функциональных групп, которые придают поверхностям частиц наноалмазов гидрофильные свойства. Средний размер частиц НА – 4,2–7 нм.

Частицы НА имеют большую удельную поверхность, каждый кристалл НА имеет большое число неспаренных электронов и является своего рода множественным радикалом. Кроме того, поверхностные функциональные группы дополнительно существенно влияют на физические и химические свойства частиц НА. Многообразие химически связанных на наноалмазах поверхностных структур с их высокой активностью (наряду с химической активностью функциональных групп) обуславливает высокую реакционную способность детонационных НА. Пассивность основной массы алмазного ядра при этом сохраняется, поэтому поведение детонационных НА в различных системах разнообразно.

В Республике Беларусь, Украине, Южной Корее и Китае основной процесс взрывной технологии получения наночастиц алмазов, впервые реализованный в сентябре 1992 г. в НПО «Алтай» (Бийск), представляет собой подрыв в камерах высокого давления порошковой смеси взрывчатого вещества – гексогена с графитом в ледяной оболочке. В результате высокого давления (до 500 МПа) и температуры (до 3000 °С) взрыва образуется небольшое количество наноразмерных кристаллов алмазов, которые необходимо выделить из графитовой массы. Это осуществляется по разным технологиям. В России несколько производителей наноалмазных материалов – как правило, первичной, непереработанной алмазографитовой шихты, нежелательной в составе смазок.

Наноалмазные трибопрепараты, производство которых давно начато в Европе, освоено в Минске, Харькове, Бийске, Дзержинске, Красноярске, Брянске, Санкт-Петербурге и Южной Корее, по составу, свойствам, приемам и эффективности применения известны только в первом приближении, но являются достаточно перспективными.

6.2. Безразборный ремонт узлов трения

6.2.1. Особенности применения ГМТ-технологии

Рассмотренные в п. 6.1 особенности модифицирования поверхностей трения с помощью ГМТ позволяют использовать их для восстановления работоспособности техники с изношенными узлами трения – в ряде случаев вплоть до номинальных, паспортных показателей. Получаемые результаты соответствуют текущему, иногда капитальному ремонту машин, хотя отсутствует обязательная для этих видов ремонта разборка агрегатов, дефектация и замена изношенных деталей. Процесс восстановления работоспособности узлов и агрегатов выполняется 1–2-часовой триботехнической обработкой во время обслуживания машин, оборудования, а далее – в эксплуатации. Безразборный ремонт узлов трения по нетрадиционной триботехнике основан на введении в систему смазки узлов трения ГМТ в виде порошков (гелей), масляных суспензий или в составе пластичных смазок.

Технико-экономическая эффективность ГМТ лучших производителей подтверждена испытаниями во многих отраслях промышленности, транспорта, на различной гражданской и военной технике. Наиболее эффективен безразборный ремонт следующих видов агрегатов, машин и оборудования [32]:

- работающих в особо тяжелых условиях со значительным износом деталей;
- уникальных, не имеющих запасных частей или при их неоправданно высокой стоимости;
- используемых в энергоемких процессах, где экономия энергоресурсов приобретает важное значение;
- работающих в непрерывном режиме, когда остановка экономически нецелесообразна или может привести к тяжелым последствиям;
- используемых в отдаленных районах, куда поставка оборудования, запчастей и расходных материалов затруднительна и высокозатратна;
- используемого в условиях, когда полноценное смазывание затруднено, требует остановки и разборки узла, агрегата;
- работающих с недостаточно эффективными смазочными материалами;
- используемого в условиях невозможности качественного ТО и ремонта.

При выборе объекта для безразборного ремонта следует иметь в виду то, что ГМТ не позволяют:

- устранять глубокие риски, трещины, сколы, выбоины;
- залечивать или предотвращать глубокие усталостные трещины;
- наращивать слой на деталях из аустенитных сталей;
- восстанавливать износ, достигший критического уровня (уровень индивидуален, зависит от условий работы конкретного трибосоприжения);
- использовать трибосоставы для автоматических коробок передач и бортовых фрикционов, где назначение фрикционных дисков – передача ими крутящего момента трением при высоком коэффициенте трения поверхностей.

Введение серпентиновых трибосоставов в узлы, куда ранее вводили металлоплакирующие, графитовые, фторопластовые и иные составы, цинковые покрытия, создающие слой «третьего тела», а также вместе с металлоплакирующими или сразу после них категорически запрещено. В маслах с молибденосодержащими присадками длительность безразборного ремонта существенно возрастает. Не все виды ГМТ позволяют восстанавливать пары трения, где одна деталь из цветных сплавов. Как показывает практика, ГМТ и другие составы эффективны и для профилактики новых узлов и агрегатов.

После первичной апробации ГМТ-технологии в Санкт-Петербурге ее применение стало расширяться в самых разных отраслях промышленности и на транспорте. В 2000-е гг. работы проводились на машиностроительном, металлургическом, транспортном, энергетическом, подъемно-транспортном, горнодобывающем, полиграфическом, текстильном оборудовании сотен предприятий. Позже ГМТ-технология подтвердила свою эффективность на судах и авиатехнике [32]. В то же время с различной эффективностью применялись металлоплакирующие и некоторые другие трибосо­ставы, но наибольшее применение завоевали ГМТ.

Безразборный ремонт геомодификаторами проводили на Московской, Северо-Кавказской, Приволжской, Западно-Сибирской, Забайкальской, Одесской, Свердловской и Северной железных дорогах. Обработке подвергали агрегаты в целом и их отдельные узлы (подшипники качения и скольжения, зубчатые передачи, гидронасосы, гидрораспределители и др.). В 2004 г. НТС ДТЭХ Правитель­ства Москвы всем предприятиям департамента и автотранспорта Москвы рекомендовано широко использовать композицию АРВК и аналогичную смазку «Поли­терм многоцелевая». Они показали свою эффективность на различном машиностроительном оборудовании России, а также в АПК при испытаниях на Центральной и Северо-Кавказской МИС [32].

Самые распространенные объекты безразборного ремонта – бензиновые и дизельные ДВС, что объясняется наличием большого парка изношенной автотракторной техники, работоспособность которой определяется техническим состоянием их двигателей. ГМТ обеспечивают образование незначительного по толщине, но эффективного защитного антифрикционного покрытия поверхностей трения гильз цилиндров и поршневых колец, коренных и шатунных шеек коленвала, кулачков распределительного вала, рычагов и толкателей ГРМ, зубьев шестерен распределения и насосов, восстанавливая их технические характеристики до значений, близких к номинальным показателям.

Многими организациями и отдельными специалистами доказана высокая перспективность ГМТ-технологии, хотя задачи по управлению трением этой технологией пока решены не полностью. Минеральными модификаторами трения обрабатывалось и различное вооружение, проводилась защита реборд колес локомотивов,

мостовых кранов, подкрановых путей, прокатных и вальцовочных валков, направляющих различных конфигураций.

К настоящему времени в России, Республике Беларусь и странах ближнего зарубежья обработаны сотни тысяч единиц различных узлов, агрегатов во многих отраслях промышленности, на транспорте и в АПК.

6.2.2. Результаты испытаний трибосоставов

1. Первичные лабораторные испытания ГМТ в сертифицированной лаборатории ГИПХ (Санкт-Петербург). Результаты сравнительных испытаний ГМТ для отработки технологии приготовления порошков в ООО «РеалИнПроект» приведены в табл. 6.4. Коэффициент K характеризует соотношение геометрических параметров компонентов трибопары. При испытании трибосостава «ММПТ Fe-DO» от ООО «РеалИнПроект» получено приращение микротвердости поверхностей на 29 %.

Таблица 6.4

Результаты сравнительных испытаний трибосоставов на поверенной машине трения СМТ-1

Объект испытаний	K	Износ, $\Delta G \cdot 10^4, \text{Г}$	Приращение $\Delta G \cdot 10^4, \text{Г}$	Износ, %	Приращение, %
1. Чистое моторное масло	0,06	16,6	–	100	–
2. ММПТ, 0,2 % мас., 9 исп.	0,06	–0,37	+0,37	–102	+102
3. ER, 6 % объемн.	0,04	6,85	–	41	–
4. MicroX ₂ , 5 % объемн.	0,05	16,6	–	0	–
5. Fial, 5 % объемн.	0,06	7,8	–	47	–
Трибосоставы NewMen					
6. K1, 0,05 % мас.	0,06	5,2	–	31	–
7. K4, 0,05 % мас.	0,06	5,6	–	33	–
8. K, 0,01 % мас.	0,05	5,2	–	31	–
Трибосоставы ГИПХ (Санкт-Петербург)					
9. БК-2, 0,1 % мас.	0,07	8,3	–	50	–
10. «Кетазона-3», 0,05 % мас.	0,07	9,4	–	56	–
11. «Дикетазона-3», 0,05 % мас.	0,07	5,6	–	64	–

Положительные результаты испытаний (табл. 6.4), где показано приращение массы образцов ММПТ, позволили расширить их применение. Следующий этап испытаний ГМТ (трибосостав Forsan Nanoceramic) проведен на парах трения, характерных для подшипников коленвала транспортных дизелей (рис. 6.13–6.15), показана эффективность антифрикционных серпентиновых ГМТ.

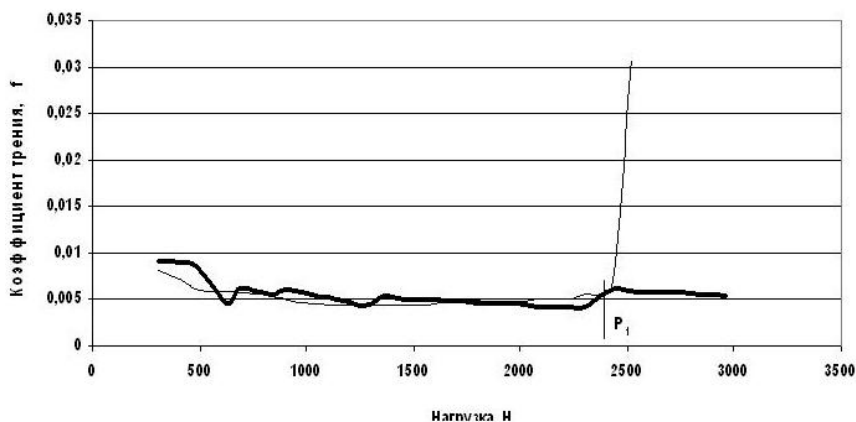


Рис. 6.13. График зависимости коэффициента трения в паре «чугун ВПЧ–сплав БК-2» (баббит) в масле М-14В₂ и в масле с составом Forsan Nanoceramic: при нагрузке 2400 Н без трибосостава наступил задир, а с трибосоставом до 3000 Н задир не было

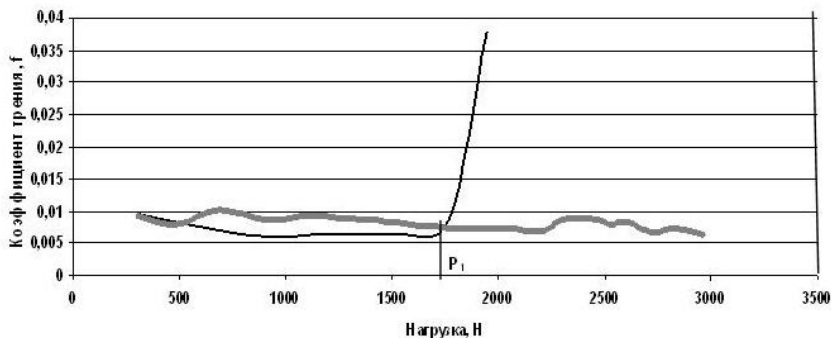


Рис. 6.14. График зависимости коэффициента трения в паре «чугун ВПЧ–подшипниковый сплав АО20-1» в масле М-14В₂ и в масле с трибосоставом Forsan Nanoceramic: при нагрузке 1700 Н без трибосостава наступил задир, а с трибосоставом до 3000 Н задир не было

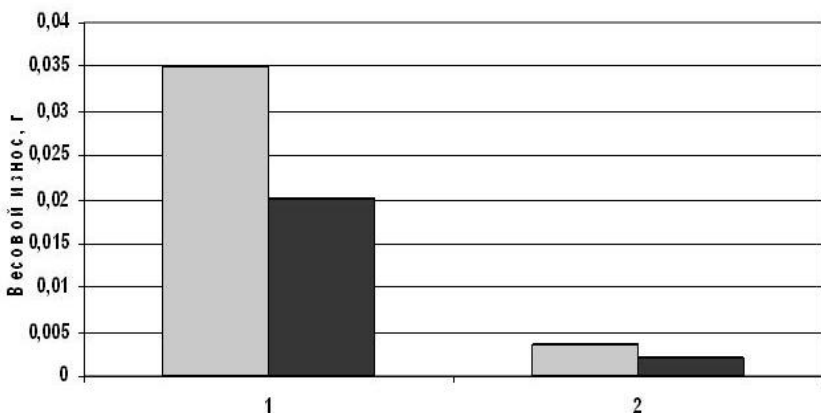


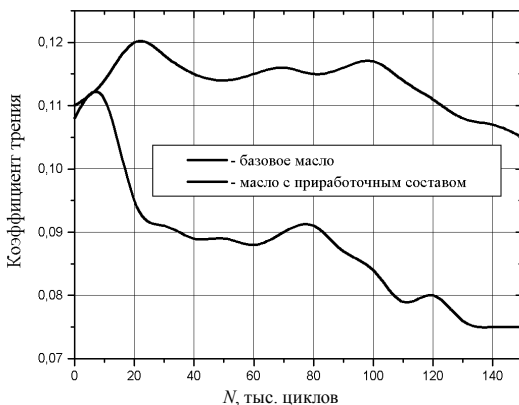
Рис. 6.15. График изменения износа в паре «ролик–колодка» (азотируванная сталь 38ХНЗМА – сплав БРОС-1-22): в испытании 2 с трибосоставом наблюдался привес ролика в чистом масле из-за переноса металла с колодок на ролик, а привес ролика и колодки при вводе трибосостава – из-за осаждения материала из масла; износ обоих образцов (ролика 1 и колодки 2) снижился в 1,75 раза

По данным исследований, в рассматриваемой паре с чистым маслом и с трибосоставом задиров не было, при 500–1200 Н (рабочий диапазон ДВС) коэффициент трения заметно уменьшился.

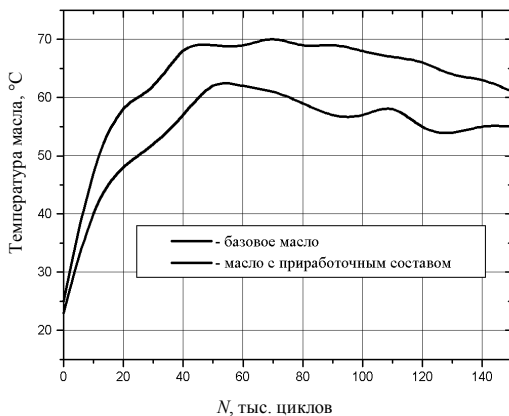
2. Испытания триботехнических составов в СПбГПУ.

В СПбГПУ А. Ю. Шабановым проведены масштабные стендовые испытания триботехнических составов и других инноваций для разработки приемов повышения ресурса, надежности и экономичности автотракторных ДВС [145]. Разработана технология обкатки ДВС суспензией высокодисперсного (до 10 мкм, не менее 95 % мас.) порошка серпентина в минеральном масле с олеиновой кислотой. Цель технологии – обеспечение притирки сопряжений ДВС без большого приработочного износа, снятие нагрузочных ограничений в эксплуатации, улучшение технико-экономических показателей ДВС.

На рис. 6.16, а, б приведены результаты притирки фрагментов чугунной гильзы цилиндра ДВС с приработочным составом, где притирка практически закончена, и обычной притирки, где еще наблюдается изменение коэффициента трения и температуры масла. Коэффициент трения масла с приработочным составом на 30 % меньше, существенно меньше и температура.



а



б

Рис. 6.16. Динамика изменения коэффициента трения (*а*) и температуры масла (*б*) в рабочей зоне в базовом варианте и в притирке с приработочным составом

На рис. 6.17, *а* (обычная приработка) виден рельеф поверхности с сохранившимися после механической обработки широкими и глубокими рисками, с местными вырывами металла, видна также и сетка рисок хонингования. Поверхность же, обкатанная с приработочным составом (рис. 6.17, *б*), в значительная части заполнена вторичными структурами (светлые фрагменты), а риски обработки закрыты новообразованиями.

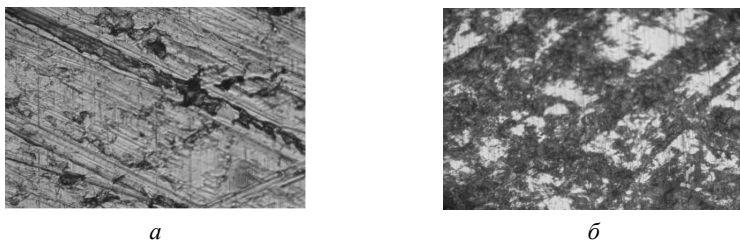


Рис. 6.17. Микрофотографии рабочих поверхностей образцов после притирки:
а – на базовом масле; *б* – на масле с приработочным составом

Таким образом, на базовом масле прошла грубая притирка с наклепом и незавершенным формированием рабочих поверхностей. С притирочным же составом приработка практически завершена, сформирована поверхность с развитыми вторичными структурами.

Новая технология проверена стендовыми испытаниями дизеля КамАЗ-740.10 и ДВС ЗМЗ-402 после обкатки по стандартной и новой технологиям [145]. Результаты стендовых моторных испытаний показали, что новая обкатка ускоряет формирование рабочих поверхностей, снижает интенсивность их трения и удельный расход топлива ДВС, на 2–4 % повышает механический КПД, улучшает динамику компрессии, заметно снижает дымность ОГ в сравнении с базовой обкаткой.

Выявлено снижение на 30–45 % содержания в работавшем масле Al и Fe по сравнению с обычным содержанием Si, что свидетельствует о формировании по новой технологии противоизносных слоев и о повышении износостойкости ЦПГ. Все это подтверждает эффективность применения ГМТ как для новых, так и для капитально отремонтированных ДВС.

3. Испытания в Наноцентре ГОСНИТИ.

В ГОСНИТИ проведены исследования 34 масляных композиций с трибосоставами. Для подготовки к эксплуатации лабораторно испытаны 10 композиций ФГБНУ ВНИИТиН со свежим и отработанным маслом М-10Г_{2К}, с вводом материала Nanofilms, химически растворенного карбамида, стандартной присадки ДФ-11 и эпокси-дированного масла [32].

Выявлены трибосоставы, которые в щадящем режиме нагружения обеспечивают коэффициент трения менее 0,03, а при полном нагружении – менее 0,04. Наиболее существенно снижали коэффициент трения составы ВНИИТиН (3 % добавки Nanofilms; масляная основа ВНИИТиН, 1 % карбамида) – до 0,0275–0,0400, а состав Evo[®]lution – до 0,0273 (табл. 6.5).

Таблица 6.5

Некоторые результаты испытаний трибосоставов [32]

Номер испытания	Испытуемый состав	P , Н	L , м	$\mu_{\text{кон}}$	Примечание
10-2	№ 10 ГНУ ВНИИТиН	30	1500	0,0385	–
12-1	№ 2 ГНУ ВНИИТиН	20	1500	0,0273	Наращивание покрытия
13-1	№ 3 ГНУ ВНИИТиН	20	1500	0,0398	–
834	Evo [®] lution	20	1000	0,0275	–
835		30	1000	0,0382	–
847	МКФ-18НТ	20	1000	0,0354	–
22-2	Б+С	30	1500	0,0352	Сбой осциллограммы по пальцу
23-2	Серпентин	30	1500	0,0265	
24-2	«Г»	30	1500	0,0243	
948	Абразив «Ш» от ООО «РИП»	20	500	0,0359	Ровное спокойное трение
977	«ЦНТ» от ООО «ЦНТ»	20	1000	0,0399	–
988	«ЦНТ» от ООО «ЦНТ», двойная концентрация	20	100	0,0368	–
1040	«КАРАТ-М»	40	13 520	0,0408	В основном плавное трение
1047	«КАРАТ-5»/ «КАРАТ-М»	40	1500	0,0396	«КАРАТ-5» после трения «КАРАТ-М»
1052	Масло «Мобил» SJ/SL 0W-40	40	500	0,0313	–
1053		45	500	0,0249	–
1054		50	500	0,0309	–
1055		55	500	0,0366	–
1055a		60	500	0,0395	Максимум нагрузки не выявлен, но есть признаки задира

В сравнении с чистым маслом М-10Г_{2К} основные испытанные трибосоставы уменьшали коэффициент трения следующим образом:

- состав Evo[®]lution (НПФ «ТрибоTECHNOLOGY») – в 2,2–2,4 раза, до уровня лучшей композиции ВНИИТиН;
- состав МС-2 (ООО «РеалИнПроект») – в 1,3–1,5 раза;
- составы «Сerpентин» (ВИЭСХ) – в 1,12–1,69 раза;
- состав «Б+С» (ООО «РеалИнПроект») – в 1,375, 1,46 и 1,93 раза;
- составы «Г» (ВИЭСХ) – в 1,36, 1,49 и 1,99 раза;
- модификация масла с наноалмазным составом «КАРАТ-5» работает грубее, чем с составом «КАРАТ-М», но нагрузочная способность в 1,22 раза выше (55 и 45 Н).

Таким образом, составы ВНИИТиН, Evo[®]lution, серпентиновые от ООО «РеалИнПроект» и состав «Г» в сравнении с чистым маслом М-10Г_{2К} уменьшали коэффициент трения примерно в 1,5 раза. Коэффициент трения снижался до 0,0243 у серпентиновых составов, до 0,0273 – у состава № 2 ВНИИТиН и до 0,0275 – у составов Evo[®]lution (испытание № 834, рис. 6.18).

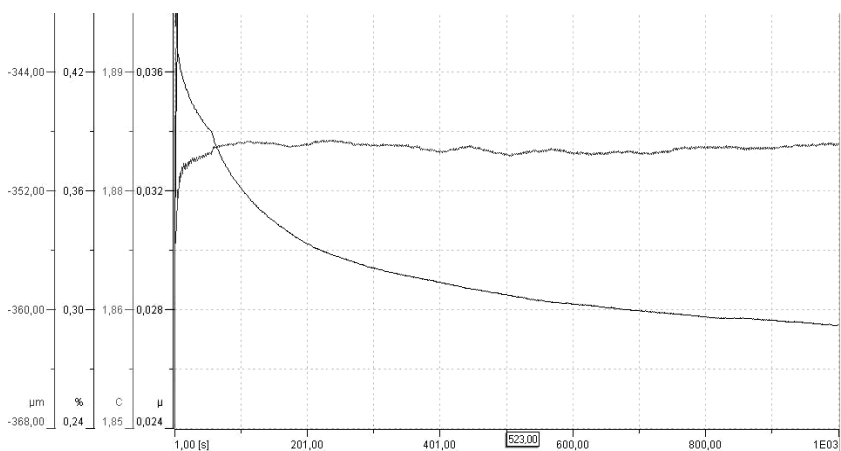


Рис. 6.18. Динамика коэффициента трения (0,037–0,024) и высоты (356–350 мкм) положения пальца над диском в трибопаре «палец–диск» при испытании 834 на трибометре (табл. 6.5) смазочной композиции из масла М-10Г_{2К} с трибосоставом Evo[®]lution (TriboTECHNOLOGY)

По результатам испытаний сделаны следующие выводы:

- разработанный в ФГБНУ ГОСНИТИ и ФГБНУ ВИЭСХ трибосостав «Сарановский» приблизил масло М-10Г_{2К} среднего класса

качества к высшему мировому уровню триботехнических свойств масла фирмы «Мобил»;

- литиевая соль сульфокислоты, разработанная в ГНЦ ГОСНИИОХТ (С. С. Хохлов, К. Н. Герасимов) наиболее предпочтительна; она обеспечивает стабильные значения коэффициента трения (на уровне 0,05) и может рекомендоваться к применению как профилактический трибосостав;

- составы солей цинка на 15–20 % уступают составам солей магния;

- цинковая соль, обеспечивающая в ненагруженных сопряжениях довольно низкий (около 0,01) коэффициент трения, может применяться в приборах точной механики;

- трибосоставы на основе солей лития и магния сульфокислот в сравнении с моторным маслом М-10Г_{2К} действительно снижают коэффициент трения до 1,25 раза при малых нагрузках, до 1,53 раза – при нормальных и повышенных, а в среднем – в 1,45 раза;

- значительного отличия в эффективности составов с концентрациями 0,5, 0,05 и 0,005 % мас. не выявлено; составы из солей сульфокислот достаточно вводить в масло по 0,05 % мас.;

- термообработка масляного раствора соли магния вместе с диском и пальцем не улучшила триботехнику профилактического состава;

- испытания солей сульфокислот индия и алюминия показали, что более дешевый растворитель солей индия триботехнически равноценен второму; второй вывод – перспективность алюминиевой соли сульфокислот;

- даже литиевые соли уступают ГМТ с коэффициентом трения на уровне 0,04.

4. Испытания ГМТ-трибосостава во ВНИИТиН. Трибосостав МС-2 испытан на четырехшариковой машине трения и проведен через 250-часовые эксплуатационные испытания на тракторах «Беларус-82», «Беларус-1221» и ДТ-75М Тамбовской области.

Эксплуатационными испытаниями состава МС-2 было отмечено общее снижение расхода топлива тракторов на 5–8 %, угара их моторного масла в сравнении с нормативами – на 10–12 %, а дымности ОГ дизелей – на 8–15 %. Содержание железа в моторных маслах уменьшилось по сравнению с содержанием в предыдущий период работы на 20–25 %. Это свидетельствует о противоизносном свойстве состава МС-2 и об увеличении срока службы испытанных дизелей [32, 46, 83], подтверждая эффективность ГМТ-технологии.

Лабораторные испытания серии трибосоставов на машине трения СМЦ-2 проведены А. А. Гвоздевым в Ивановской ГСХА. Они также подтвердили антифрикционные свойства некоторых минеральных, металлоплакирующих и смешанных трибосоставов.

5. Испытания профилактических составов во ВНИИТиН.

Перед эксплуатационными испытаниями профилактических составов, созданных в ГОСНИТИ совместно с ГНЦ ГосНИИОХТ, составы были исследованы во ВНИИТиН по химмотологическим и триботехническим показателям, а составы «КАРТ-5» Красноярского института химии и химической технологии СО РАН, условно названные наноалмазными (в них работает только углеродная оболочка), – только по триботехническим показателям (табл. 6.6, рис. 6.19).

Таблица 6.6

Химмотологические и триботехнические показатели трибосоставов на основе солей сульфокислот в моторном масле М10Г_{2К}

Показатель	М-10Г _{2К}	Значения для элементов (при концентрации 0,1/0,002 %)						
		Li	K	Mg	Zn	Al	Jn ²⁺	Jn ³⁺
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	11,03	10,5/–	–/10,1	10,4/–	10,5/–	9,7/–	10,5/11,0	10,3/–
ЩЧ, мгКОН/г	5,7	5,68/–	–/5,68	5,65/–	5,69/–	5,6/–	5,69/5,7	5,65/–
КЧ, мгКОН/г	1,56	1,7/–	–/1,3	1,8/–	1,82/–	1,69/–	1,64/1,56	1,7/–
Д _г , мм:								
– при 20 °С	0,41	0,28/–	–/0,37	0,36/–	0,38/–	0,34/–	0,35/0,39	0,32
– при 100 °С	0,37	0,33/–	–/0,35	0,37/–	0,36/–	0,36/–	0,36/0,39	0,37/–
– при 200 °С	0,37	0,34/–	–/0,36	0,39/–	0,36/–	0,33/–	0,37/0,40	0,38/–
Снижение износа, %	–	31/–	–/10	14/–	8/–	18/–	15/5	21/–
Объем трибосостава на 50 мл масла, мг	–	0,57/–	–/0,56	0,76/–	0,65/0,13	3,4/–	0,63/0,013	0,87/–

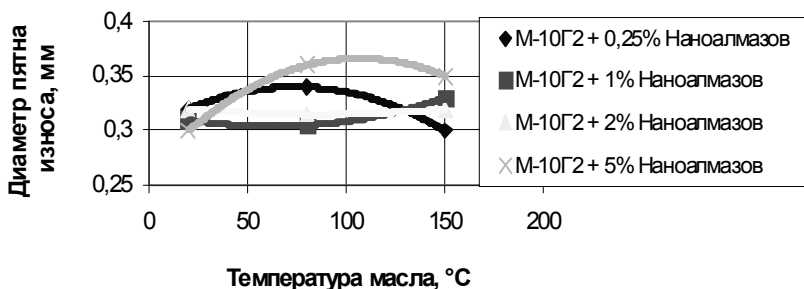


Рис. 6.19. График изменения диаметра пятна износа шариков на ЧШМТ при испытании трибосоставов с содержанием нанодiamondов в различных концентрациях

На основании комплекса лабораторных исследований во ВНИИТиН сделан вывод: наилучшими химмотологическими показателями и хорошими триботехническими свойствами обладают литиевая соль перфторсульфокислоты и углеродные кластеры «КАРАТ-5» Красноярского ИХХТ, что подтверждает результаты исследований Наноцентра ГОСНИТИ.

6. Испытания наноуглеродных трибосоставов.

Испытаны углеродные нанокластеры от ЗАО «ИЛИП» (Санкт-Петербург) – разработчика фуллеренов и фуллереновой продукции с высокими показателями чистоты [32]:

- фуллереновой сажи с содержанием фуллеренов не менее 10 %;
- смеси фуллеренов;
- фуллерена C₆₀ чистотой от 99 до 99,9 % мас.

Фуллереновую сажу вводили дважды до избытка, а фуллерен C₆₀ достаточно было ввести один раз.

Растворимость фуллеренов зависит от типа растворителя и его температуры. Типичная растворимость (а скорее, концентрация по седиментационной устойчивости масляной суспензии) составляет 20–40 мг на литр масла, поэтому можно вводить в масла от 0,005 до 0,1 % мас. фуллеренов и дать им некоторое время поработать. В испытаниях каждый этап занимал 500–1500 с (т. е. до 25 мин), при турбулизации масла этого было достаточно. Если ввести в масло избыточные фуллерены, то на трибоиспытаниях это отрицательно не скажется, т. е. в трибопаре может находиться незначительное количество фуллеренов, а большая их часть будет балластом в масле. Результаты испытаний приведены на рис. 6.20.

При испытаниях фуллереновая сажа почти полностью растворялась, поэтому вводилась в масло дважды, но не дала значительных результатов. Фуллерен С60 с концентрацией 0,1 % мас. значительно уменьшил коэффициент трения, однако при испытании обнаружено, что, т. к. фуллерен нерастворим в масле М-10Г_{2к} и имеет большую плотность, то он центрифугируется на стенку вращающейся со скоростью 300–330 мин⁻¹ чаши трибометра, а после его остановки заметно осаждается на дно.

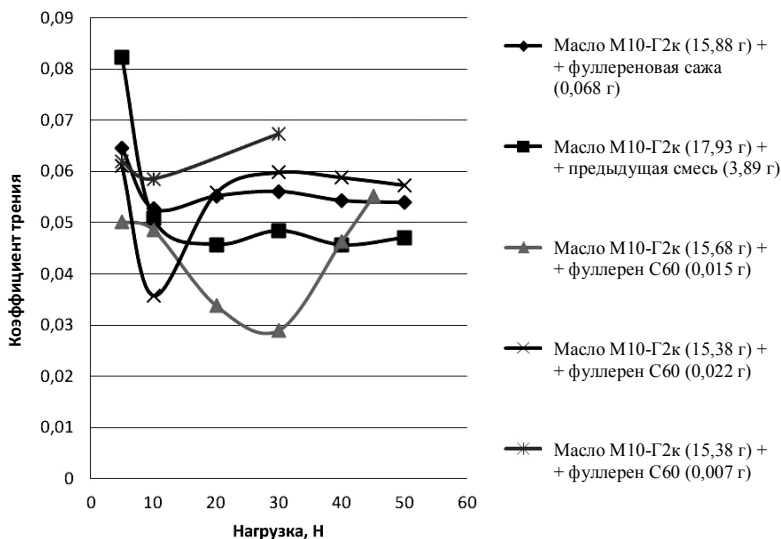


Рис. 6.20. Коэффициенты трения пары «палец–диск» с фуллеренсодержащими нанопорошками

Фуллерены целесообразнее испытывать в паре трения с возвратно-поступательным перемещением контакта в горизонтальной плоскости, например в паре «палец–подвижная пластина» или же в парах трения на сухую, а наиболее предпочтительно – в пластичных смазках. Разработчику фуллерена было предложено решить задачу растворения и седиментационной устойчивости фуллерена С60 в маслах или же использовать их по варианту пластичной смазки. Предложено провести трибоиспытания гидратированного фуллерена (фуллеренола) С60(ОН)_n, n ≈ 18–22.

ЗАО «ИЛИП» подготовило композиции фуллеренсодержащей сажи, фуллерена С60, смеси фуллеренов и фуллеренола в масле М-10Г_{2к}.

Однако повторные испытания (рис. 6.21) не выявили заметных триботехнических свойств [32]. Так, коэффициент трения при небольших нагрузках (до 88 МПа) снизили на значения 0,02–0,04 только высококонцентрированные смазочные композиции фуллера С60 и смесей фуллеренов. Но они не повысили нагрузочную способность масла М-10Г_{2К}, тогда как соли сульфокислот лития, магния, алюминия и индия позволили создать в трибопаре нагрузку до 212 МПа.

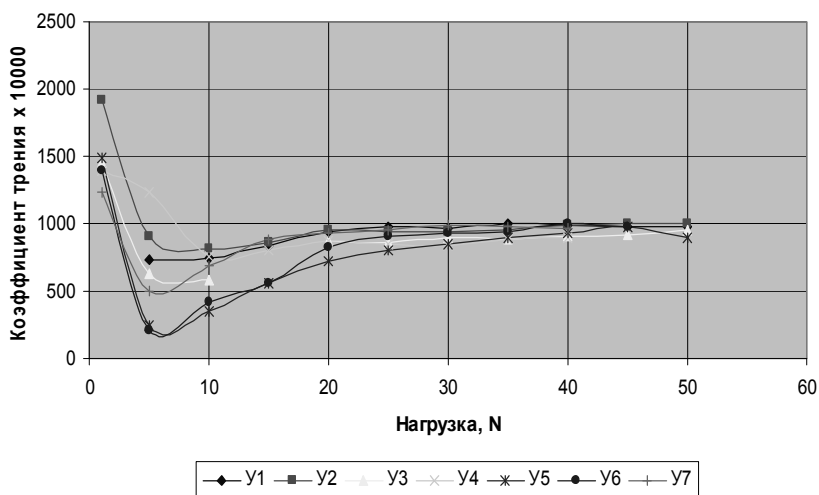


Рис. 6.21. Коэффициенты трения пары «палец–диск» в масле М-10Г_{2К} от ООО «Новокуйбышевский завод масел и присадок» с углеродсодержащими нанодобавками от ЗАО «ИЛИП»: У1 – чистое масло М-10Г_{2К}; У2–У7 – масло с содержанием в его 45 мл углеродсодержащих нанодобавок: У2 – 30 мг смеси фуллеренов, У3 – 60 мг, У4 – 90 мг; У5 – 90 мг фуллера С₆₀; У6 – 30 мг смеси фуллеренолов; У7 – 90 мг фуллеренсодержащей сажи

Таким образом, дважды проведенные испытания нанотрибосоставов от ЗАО «ИЛИП» не дали оснований считать фуллеренсодержащую сажу, фуллерен С60 или смеси фуллеренов перспективными трибоматериалами [32], поскольку они инертны, тверды, гидрофобны и седиментационно неустойчивы в моторных маслах. Эти данные согласуются с данными о невысоких триботехнических свойствах фуллеренов других НИИ.

7. Комплекс испытаний трибосоставов в ЧГАУ.

Исследования ремонтно-восстановительной технологии и некоторых трибосоставов проведены В. И. Балабановым (РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева) [5, 9], разработавшим металлоплакирующий трибосостав и принявшим участие в разработке различных трибосоставов в зеленоградской лаборатории триботехники [32].

Профессором А. К. Ольховацким проведена серия лабораторных и стендовых испытаний серпентиновых составов НПО «Руспромремонт» и трибосоставов фирмы Wagner на дизеле Д-243, на ТНВД дизеля, на агрегатах силовой передачи тракторов, а также эксплуатационные испытания на дизелях тракторов и автомобилей, агрегатах силовой передачи тракторов в хозяйствах Челябинской области.

Изучено более 30 трибоматериалов, из них 15 испытаны на противозадирные свойства на триботехническом устройстве с перекрещенными роликами, более простой аналог которого известен у РВС-технологов с 2000-х гг. Трибосоставы на основе наноразмерного гексагонального нитрида бора, производившегося шестью российскими предприятиями давно, были выделены для испытания в ЧГАУ Вальтером Вагнером и показали наивысшую трибоспособность – в 1,5 раза большую, чем у отечественных серпентиновых. В силу инертности «белой сажи», отсутствия ее взаимодействия с поверхностями трения она работает как промежуточное тело только при нахождении в масле. Со сменой масла и удалением «белой сажи» каких-либо последствий наблюдаться не будет.

На основании лабораторных испытаний А. К. Ольховацкий предлагает эксплуатационную обкатку отремонтированных агрегатов сельскохозяйственной техники проводить только с обязательным применением 5–7%-й концентрации трибосостава Eco Universal Oil Package фирмы Wagner, хотя допустим и трибосостав Universal-Micro Ceramic Oil. Однако гексагональный нитрид бора в трибосоставах фирмы Wagner тот же, что и производимый в России по более низкой цене, а технико-экономическая эффективность «белой сажи» должна быть проверена не только в лабораторных, но и в эксплуатационных условиях.

Сравнительные лабораторные испытания трибосостава фирмы Wagner проведены на машине трения СМТ-2 при имитации сопряжений «поршневое кольцо–гильза цилиндра» и «шейка коленчатого вала–сталеалюминиевый вкладыш подшипника». Получены высокие значения коэффициента трения в чистом масле 0,24 в первом испы-

тании и 0,19–0,21 – во втором (по справочным данным, коэффициент трения стали по стали в масле – 0,05–0,06, а по испытаниям в Наноцентре ГОСНИТИ – 0,08–0,09). Получен коэффициент трения с трибосоставом РВС от НПО «Руспромремонт» – 0,08 (по испытаниям в Наноцентре ГОСНИТИ – около 0,04), для «белой сажи» это значение правдоподобно, но при концентрации 5–6 %, в то время как концентрация ГМТ, по рекомендациям их поставщиков, составляет 0,01, 0,05, в крайнем случае – 2 %.

В испытаниях пары «шейка–вкладыш» коэффициент трения с «белой сажой» (при ее высокой концентрации 7–10 %), равный 0,13–0,15, несколько завышен, его снижение (с 0,19–0,21 в чистом масле) составило лишь 23–25 %, что можно объяснить повышением трения частиц «белой сажи» с мягким алюминием вкладышей.

При стендовом испытании трибосостава «Вагнер» на дизеле Д-243 получено уменьшение мощности его механических потерь на 5,2 %, а расхода топлива – на 15,2 %. Предположено, что в условиях эксплуатации это снижение будет составлять не менее 5–7 %, однако это требует эксплуатационного подтверждения, т. к. не весь порошок «белой сажи» (0,85–1,20 кг или 7–10 % к 14 л картерного масла) будет стабильно удерживаться в масле в период межсменных стоянок трактора.

В лабораторных испытаниях подтверждено образование серпентиновыми трибосоставами антифрикционной пленки через приращение до 1 мг массы испытанного в течение 15–20 ч образца, а также повышение электросопротивления на поверхности образца до 300 Ом на расстоянии 30 мм (в наших испытаниях это 10–12 Ом/см, а по И. Ф. Пустовому – до 300 Ом/см).

Проведены также испытания КП трактора Т-170 при ее обкатке в трансмиссионном масле с 5–6 % трибосостава «Вагнер» на ОАО «Челябинский завод тракторных трансмиссий». Получено уменьшение мощности на привод КП в среднем на 31,5 %. Аналогично проведены испытания трансмиссии трактора РТМ-160 на нижнетагильском ОАО «НПК Уралвагонзавод». Трибосостав фирмы Wagner снижает температуру в зоне подшипников заднего моста, вибрацию и мощность на привод КП примерно на 10 %.

Проведен также эксплуатационный мониторинг эффективности трибосоставов «Вагнер» и РВС на семи предприятиях Челябинской области по тракторам и автомобилям.

Перед испытаниями все ДВС тракторов, автомобилей и автобусов, по данным диагностирования, подлежали капитальному ремонту.

Но после двух лет подконтрольной эксплуатации выявлено, что компрессия в цилиндрах их ДВС увеличилась примерно на 3 кгс/см², в два раза уменьшилась вибрация, повысилось давление моторных масел. Таким образом, срок службы машин был увеличен более чем на два года. При заключительном контроле все ДВС и агрегаты трансмиссий находились в нормальном техническом состоянии и были рекомендованы к дальнейшей эксплуатации.

8. Испытания трибосоставов АРВК на МИС Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

Составы АРВК (ТУ 0254-001-29439337–2003), предложенные В. И. Новиковым совместно с ИМАШ РАН (И. А. Буяновский и др.), были первыми трибосоставами, подвергнутыми государственным испытаниям (четыре раза) в АПК России.

В 2004 г. Центральной МИС проведены в г. Солнечногорске приемочные испытания антифрикционной ресурсовосстанавливающей композиции АРВК в двигателе трактора МТЗ-82. Испытаниями антифрикционной ресурсовосстанавливающей композиции АРВК в двигателе трактора МТЗ-82 отмечено улучшение мощностных и топливно-экономических показателей: максимальная мощность повысилась на 3,7 кВт, а удельный расход снизился на 39 г/кВт·ч.

В 2005 г. в ФГУ «Северо-Кавказская ГЗМИС» г. Зернограда путем испытаний установлено, что введение в двигатель антифрикционной ресурсовосстанавливающей композиции АРВК с последующей работой дизеля в режиме переменного нагружения в течение 10 ч приводит к уменьшению расхода картерных газов на 7 л/мин (9,7 %), увеличению мощности двигателя на 2,8 %, уменьшению удельного расхода топлива на 3,2 % и снижению общего уровня виброускорений пространственных колебаний двигателя на 6,7 дБ [32].

Образец АРВК, испытанный в 2008 г. на этой же МИС в эксплуатационных условиях в двигателе и трансмиссии трактора ДТ-75ДЕС4, соответствует требованиям ТУ по показателям назначения и безопасности. ФГУ «Северо-Кавказская ГЗМИС» рекомендует АРВК к применению в качестве добавки к моторным и трансмиссионным маслам при эксплуатации тракторов с механической трансмиссией.

Испытания АРВК проведены и на дизеле А-41СИ трактора ДТ-75 с хорошим техническим состоянием и наработкой 875 ч. Испытаниями выявлено, что давление картерных газов при номинальной нагрузке снизилось с 10 до 5 мм вод. ст., максимальная мощность

повысилась с 68,8 кВт до 71,3, а удельный расход топлива снизился с 248 до 245 г/кВт·ч (1,2 %), значит годовая экономия топлива может составить 210 кг. Общий уровень виброускорений дизеля при 1000 мин⁻¹ холостого хода снизился в вертикальном направлении с 437 до 292 м/с², в горизонтальном поперечном – с 290 до 278 м/с², суммарный уровень виброускорений в диапазоне 8–12 500 Гц – с 524 м/с² до 403 м/с² (в 1,3 раза) [32].

Проведены испытания АРВК в трансмиссии трактора ДТ-75 с приработанными деталями. Они показали различное снижение виброактивности по передачам, т. к. работали с разными нагрузками и в разное время. Снижение уровня колебаний на зубцовой частоте постоянно работавшей главной передачи составило: на 2-й передаче – в 1,26 раза, на 3-й – в 1,31, на 4-й, наиболее часто включаемой, – в 1,38, на 5-й – в 1,03, на 6-й – в 1,14 раза. Повысились интенсивность и качество приработки зубьев новых шестерен и шлицевых соединений [32].

6.2.3. Результаты разработки ремонтно-восстановительного состава

Для разработки ремонтно-восстановительного состава использовано первичное сырье – отходы от флотации руды Сарановского месторождения, состоящие на 95 % из хромшпинелида $\{(Mg, Fe)(Cr, Al, Fe, Ti)_2O_4\}$ – промышленного источника получения хрома и силикатов. Минерал в исходной руде содержит серпентин, развитый по пироксену и, редко, по оливину. А отходы комбината в основном состоят из минерала лизардитового бастита по ортопироксену и апооливинового лизардита $\{Mg_3[Si_2O_5](OH)_4\}$. В состав порошка хвостов обогащения кроме незначительного содержания хромшпинелида входят небольшие количества хлоритов, кальцит и гранат (уваровит). Плотность порошка хвостов обогащения – 2550 кг/м³, твердость по минералогической шкале – от 2,5 до 3.

Порошок отходов на сите 1 мм был очищен, высушен при 105 °С в течение часа в электрошкафу «ГермИКС», фракционирован на крупном (100 мкм) сите виброгрохота Analizette (рис. 6.22), подвергнут измельчению на шаровой планетарной мельнице «Активатор 2SL». Выявлено, что режимы измельчения каждого материала требуют индивидуального подбора по соотношению крупных и средних шаров, частоте вращения вала мельницы, а особенно – по времени измельчения.



а



б

Рис. 6.22. Средства, использованные при приготовлении ремонтно-восстановительных составов:

а – виброгрохот Analizette-3; *б* – порошки слева и в центре – исходный промпродукт, справа – механоактивированный порошок (стал светлее)

Для большинства обработанных на мельнице «Активатор 2SL» порошков установлено, что минимальный размер частиц (0,4–3,0 мкм) достигается за несколько минут, а дальнейшее измельчение приводит к агрегированию мелких частиц. Высокотвердые же частицы (корунд, карбиды легирующих металлов) измельчению на «Активаторе 2SL» практически не поддаются [32].

Использованы шарики из стали ШХ15: $d = 15$ мм, 13,97 г, 10–15 шт.; $d = 10$ мм, 4,57 г, 15–20 шт.; $d = 6$ мм, 0,83 г – остальные; общий вес шаров – 350 г. Условия измельчения порошков: масса порошка в барабанах – 70 г; частота вращения ведущего вала – 20, 30, 35 и 42 Гц; время измельчения – 5, 10, 30 и 60 мин, но выявлена целесообразность измельчения за 5–10 мин и преимущественного использования крупных шариков.

Повторное фракционирование после измельчения проводилось через сито с ячейками размером 40 мкм, а визуальный осмотр порошков и анализ их фракционного состава – на инвертированном металлографическом микроскопе OLIMPUS GX-51.

Свойства порошка ремонтно-восстановительного состава

Микроскоп OLIMPUS GX51 позволяет определить, что большая часть частиц имеет размеры 1–5 мкм с редкими агломератами до 56 мкм, а средний размер, автоматически определенный по программе микроскопа, – 2,3 мкм. Учитывая, что согласно 25-летней практике ГМТ-специалистов и данным ТУ на их порошки оптимальным считается размер частиц ГМТ 1–40 мкм, то по фракционному составу можно считать полученный порошок подходящим.

До и после измельчения фазовый состав порошков был исследован в Наноцентре ГОСНИТИ на дифрактометре XRD 6000 японской фирмы Shimadzu (рис. 6.23) на предмет наличия хрома в минералах.



Рис. 6.23. Рентгеновский дифрактометр XRD 6000 фирмы Shimadzu для определения фазового и химического состава порошков

По данным рентгенофазового анализа с использованием библиотеки спектров ICDD, порошок представляет собой частицы минерала лизардита – основной триботехнической составляющей серпентина. Кристаллы его формируются в моноклинной системе. Цвет полученного порошка – светло-желтый с серым оттенком (после измельчения стал несколько светлее).

Явных соединений хрома в минералах порошка дифрактометрия не выявила. Из 60 карточек веществ при максимальном поиске соединения хрома ни в одном томе библиотеки ICDD не выявлены. Минералами в разработанном ГМТ по ICDD предположительно выявлены:

- 1) основные минералы группы серпентина:
 - $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ (Magnesium Silicate Hydroxide (Clinochrysotil));
 - $(Mg, Al)_3(Si, Fe)_2O_5$ (Aluminum Iron Magnesium Si Lisardite-1T);
- 2) $Ni_3Si_2O_5(OH)_4$ (Nickel Silicate Hydroxide Pecoratite-2Mc1) – вторичный минерал группы серпентина;
- 3) $Ni_5Al_4O_{11} \cdot 18H_2O$ (Nickel Aluminum Oxide Hydroxide) – смесь из минералов группы серпентина.

ГМТ, разработанный в ООО «РУСНОИНКОМ» по WI-технологии, проверенный одновременно с разрабатываемым, представляет собой смесь более двенадцати минералов, из которых два не относятся к минералам группы серпентина, шесть представлены

алюминиевыми гидросиликатами, два – гидросиликатом железа и гидросиликатом смешанного состава (железа, магния и алюминия) и лишь один является гидросиликатом магния $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ – Magnesium Silicate Hydroxide (Clinochrysotil).

Результаты испытаний ГМТ из промышленного продукта

Испытания нового состава проводились на трибометре TRB-S-DE, их результаты приведены на рис. 6.24.

Испытания показали высокую нагрузочную и антифрикционную эффективность масла «Мобил», совпадение антифрикционных свойств составов от ООО «ЦНТ» и МС-2 от ООО «РеалИнПроект», ГОСНИТИ и ВНИИТиН, разработанных предположительно из аналогичного сырья.

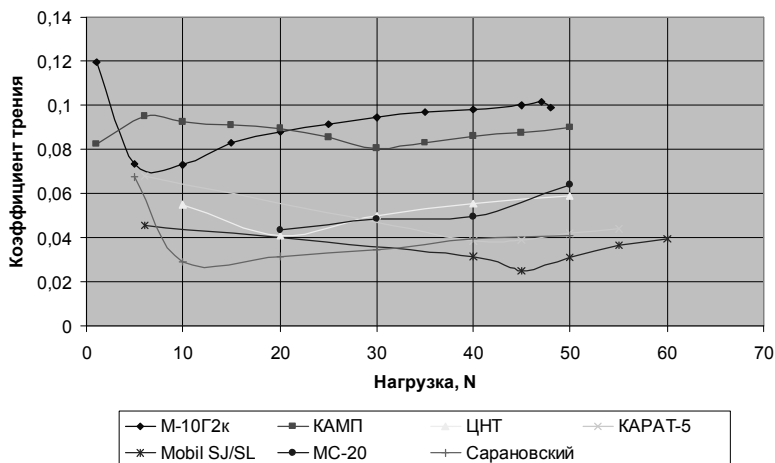


Рис. 6.24. График зависимости от нагрузки коэффициента трения пары «палец–диск» в масле «Мобил» API SJ/SL SAE 05W-30, М-10Г_{2к} (ЗАО Роснефть), а также М-10Г_{2к} с введенными в него трибосоставами: профилактический «КАМП» (ООО «Авгостанкопром»), ГМТ от ООО «ЦНТ», МС-2 (ГОСНИТИ и ООО «РИП»), «Сарановский» (ГОСНИТИ и ВИЭСХ), наноалмазный «КАРАТ-5» (ООО «Реал-Дзержинск» и Красноярский ИХХТ)

Хорошие антифрикционные свойства подтвердили наноалмазные составы «КАРАТ-5» и «КАРАТ-М», а состав «Сарановский» (названный по источнику сырья) оказался лучшим из серпентиновых и приблизил триботехнические свойства моторного масла

М-10Г_{2К} среднего класса качества (СС по API) к высшему мировому уровню триботехнических свойств масла «Мобил» класса SJ/SL.

Результаты испытаний и дифрактометрии дают основания полагать, что ГМТ, разработанный из промышленных материалов и содержащий в качестве основных минералов клинохризотил и «Лизардит-1Т», является удовлетворительным, а задача Наноцентра ГОСНИТИ по созданию ремонтно-восстановительного состава из дешевого, легкодоступного сырья с неограниченными ресурсами выполнена [32].

ГМТ «Сарановский» [32] предназначен для безразборного ремонта узлов и агрегатов ДВС и силовых передач. Для гидроприводов машин порошок требует выделения мелкой фракции путем седиментации крупных частиц и выделения из верхней части суспензии мелкой фракции. Возможно, по комплексу свойств «Сарановский» является одним из лучших ГМТ.

Для сравнения проведены испытания (рис. 6.25) новых составов ООО «РИП» и покрытия низкотемпературной плазмой системы Si-O-C-N от П. А. Тополянского (НПФ «Плазмацентр» при СПбГПУ).

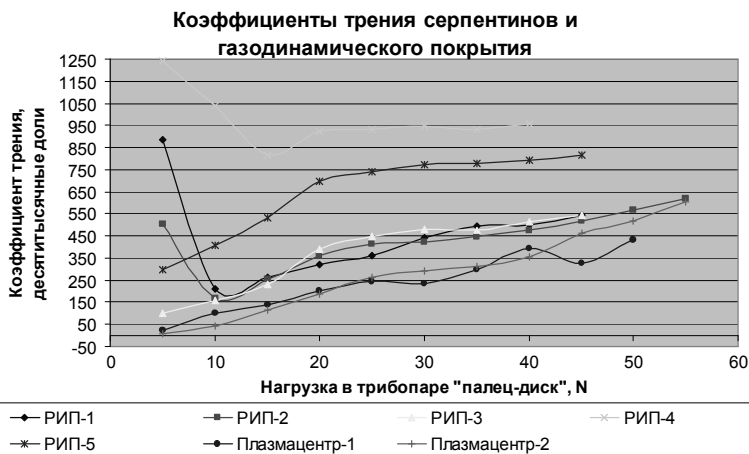


Рис. 6.25. Результаты испытаний серпентиновых трибосоставов от ООО «РИП» и НПФ «Плазмацентр»: при малых нагрузках покрытия НПФ «Плазмацентр» и покрытия РИП-1, РИП-2 и РИП-3 обеспечили минимальные значения коэффициентов трения

Определено, что серпентиновые составы ООО «РИП» обладают все же лучшими, чем у состава «Сарановский» свойствами, сопоставимыми с покрытиями НПФ «Плазмацентр».

6.2.4. Примеры безразборного ремонта

Этапы трибообработки ДВС любого типа, предложенные ведущим инженером ООО «VICCO» В. В. Ладиковым [8]:

1. *Подготовка ДВС.* Если по данным диагностирования в ЦПГ отсутствуют поломки, а износ деталей не является катастрофическим, ДВС можно обработать. Перед этим необходимо выяснить показатели состояния моторного масла: уровень в картере, степень загрязнения, уровень работоспособности (например, по «капельной пробе»), дата планируемой смены.

2. *Подготовительные работы:*

- 1) прогреть ДВС до температуры 80–85 °С и утеплить его, чтобы не охлаждать при последующей длительной работе на холостом ходу;
- 2) выкрутить свечи (снять форсунки) всех цилиндров;
- 3) отключить катушку зажигания (коммутатор). На дизельных двигателях – зафиксировать рейку ТНВД в положении выключенной подачи;
- 4) прокрутить ДВС пусковым устройством в течение 3–5 с.

3. *Обработка ДВС геомодификатором.*

Первая обработка (с учетом состояния моторного масла):

– если смена масла проведена недавно или не позднее половины срока между сменами масла, ГМТ добавляют в масло. Для всех типов ДВС рекомендуется размешать необходимое количество ГМТ в 150–200 мл масла, взятого из ДВС, и залить в него смесь через заливную горловину (на некоторых отечественных двигателях можно ввести состав через отверстие для масломерного щупа);

– если уровень масла ниже допустимого, а качество вызывает сомнения, рекомендуется перед обработкой заменить масло и масляный фильтр с промывкой двигателя.

После ввода ГМТ в систему смазки (примерно 0,5 % массы порошка от массы картерного масла) необходимо немного прокрутить ДВС стартером без запуска, сделать перерыв, запустить двигатель и 20–25 мин держать его на минимально устойчивой частоте вращения холостого хода для распределения ГМТ на все поверхности трения, затем сделать несколько перегазовок. Если состав введен правильно и установлен верный режим работы ДВС, то из выпускной трубы должно выходить большое количество пара ОГ (у грязных бензиновых двигателей часто отмечается темный цвет) с наличием в нем частиц сажи, что объясняется раскоксовыванием ЦПГ и очисткой камер сгорания от нагара.

Начальные режимы прокрутки стартером, холостого хода ДВС с минимальной частотой вращения коленчатого вала необходимы для исключения гидродинамической смазки, т. е. для создания режима граничной смазки (полусухого трения) и механо-термохимического преобразования ГМТ. При нормальной смазке безразборный ремонт затруднен, т. к. отсутствует абразивное воздействие ГМТ на поверхности трения. В стендовых условиях для этого целесообразна «холодная» обкатка ДВС.

После обработки двигатель эксплуатируется в обычном режиме. Необходимый пробег для завершения одного этапа ГМТ-обработки составляет 10–20 ч работы дизеля или 300–500 км пробега автомобиля в зависимости от состояния и качества масла. Для свежего минерального или для синтетического масла результат обработки проявляется вдвое позже, например через 700–1000 км.

Во время обработки и после нее необходимо контролировать давление масла ДВС, т. к. ГМТ очищает ЦПГ, отмывает другие загрязнения, которые могут засорить маслофильтры и тем самым снизить давление в главной масляной магистрали.

Вторая обработка производится после вышеуказанной наработки или пробега. Для этого процедуру повторяют еще раз. Если масло до или после первой обработки не менялось, то после второй обработки необходимо заменить и его, и масляный фильтр. Если после первой обработки замена масла была, то после второй, если нет показаний аварийного состояния, его можно не менять. Если в ЦПГ отсутствует нагар, моторное масло при восстановлении изношенных поверхностей трения может в небольшом количестве расходоваться как строительный материал, поэтому возможно некоторое уменьшение его уровня. За давлением и уровнем масла при трибообработке необходимо следить.

Если после второго этапа обработки удовлетворительные значения параметров пневмоплотности в некоторых цилиндрах не достигнуты, следует провести их отдельную обработку путем ввода уменьшенного количества ГМТ через свечные (форсуночные) отверстия.

4. Особенности обработки дизельного двигателя [8]:

1) диагностирование ЦПГ при помощи анализатора герметичности цилиндров АГЦ-2. По итогам диагностирования принимается решение об обработке или указываются дефекты ДВС, не позволяющие применять ГМТ-технологии;

2) обработка двигателя введением ГМТ в картерное масло. Трибосостав размешивают в 0,5 л масла и заливают в маслозаливную горловину. У некоторых дизелей горловина в нижней части изгибается, образуя застойную зону; в этом случае рекомендуется вводить трибосостав с помощью трубки;

3) диагностирование ЦПГ. Для тракторного дизеля оно производится после недельной наработки (30–40 ч), а для автомобиля – после пробега 800–1000 км. При улучшении значений параметров ЦПГ, что подтверждает работу ГМТ в зонах трения, приступают к следующему этапу. Если же параметры ЦПГ не изменились, анализируют причину отсутствия эффекта и при необходимости повторяют обработку 2-го этапа с дозировкой ГМТ, вдвое меньшей;

4) диагностирование ЦПГ, ТНВД и форсунок. Если значения их диагностических параметров не достигли номинальных, следует повторить 2-й этап обработки с дозировкой ГМТ, вдвое меньшей, чем при первой обработке;

5) после успешной обработки необходимы диагностирование и подрегулировка топливной аппаратуры, что обусловлено улучшением сгорания топлива.

5. Обработка силовой передачи автотракторной техники [8].

Перед обработкой необходимо выяснить состояние объекта, как минимум по наличию ненормальных стуков, гула, чрезмерной вибрации, перегрева, угловых, радиальных и осевых люфтов, по смещению внешних деталей под нагрузкой, по уровню и состоянию масла или смазки, по их протечкам. Если состояние объекта обработки и смазки безаварийное, удовлетворительное, то можно принимать решение об обработке.

Необходимое количество ГМТ вводят через заливные или контрольные отверстия, лючки и т. п., а при их отсутствии – шприцом сквозь резиновые манжеты и пыльники. После введения состава необходимо привести машину в движение для принудительного распределения состава по поверхностям трения. Трактору необходимо не менее часа поработать, автомобилю – проехать 25–30 км. Для завершения обработки тракторам и дорожно-строительным машинам необходима недельная наработка без длительных простоев, а автомобиль должен проехать 300–500 км.

После первой обработки агрегата со значительным износом (сильный гул, биение колес на высокой скорости) отмеченные дефекты могут быть устранены не полностью. В этом случае рекомендуется повторная обработка.

6.3. Триботехнические приемы повышения топливной экономичности автотракторных двигателей

Улучшение топливной экономичности и экологичности автотракторных ДВС решается высокотехнологичной модернизацией их топливных систем. В то же время эта проблема может решаться модификацией топлив, изменяющей их свойства и повышающей теплотворную способность, например известной с 1952 г. магнитной активацией. Однако магнитные и электромагнитные поля действуют только в их зоне, а за их пределами изменения топлив обратимы, что ограничивает использование полей [15, 16, 32, 139].

В 1887 г. была выявлена механохимия как особый класс химических и физико-химических изменений веществ, обусловленных приложением механических сил, а к 60-м гг. XX в. была обобщена механохимия полимеров и моторных масел [4, 32]. Установлено, что даже на участках, где связи требуют высоких затрат энергии, возможны разрывы молекулярных цепей не только электромагнитными полями, но и механическими напряжениями свыше предела прочности атомных связей. Следствие трибохимии в гептане – нарушение ковалентных связей в его цепях с выходом энергии порядка 419 кДж/моль [4, 75], появление свободных валентностей углерода и свободных радикалов, например $R\cdot CH_2$, с высокой реакционной способностью, хотя изменения могут быть обратимы.

В настоящее время трибохимия характеризуется простотой процесса и оборудования, низкой энергоемкостью. Получение топлив и масел из нефти требует громоздкой аппаратуры и высоких затрат энергии, а механохимия повышает эффективность и резко упрощает аппаратуру [4, 15, 16, 75, 139].

Механохимия разрушает как отдельные фракции нефти, так и смеси с образованием низкомолекулярных гомологов, а также водорода и углерода с осаждением серы. Деструкция насыщенных углеводородов происходит через разрыв цепей, а непредельные разрушаются через образование насыщенных продуктов; возможно гидрирование непредельных углеводородов продуктами деструкции исходного вещества. В результате остаются лишь химически устойчивые продукты (например, из исходных газов – метан, водород и углерод). Отличительная особенность механохимии углеводородов: деструкция продолжается и после окончания воздействия механохимии.

Механохимия углеводородов развита и в смеси с твердыми веществами (уголь, кварц), генерирующими в размоле свободные

радикалы и парамагнитные центры [27]. Это увеличивает глубину и виды превращений компонентов нефти.

Степень деструкции более тяжелых компонентов нефти может увеличиваться. Существуют предположения, что с ростом числа атомов углерода в цепи относительная степень деструкции может снижаться, поэтому углеводородные газы деструктируются относительно больше, чем углеводородные жидкости.

Механохимия углеводородов используется для их деструкции, изменения состава, свойств, что сопровождается неясными продолжительными химическими реакциями. Трибоактивация углеводородов дробит тяжелые компоненты, увеличивает долю легких, разрушает смолы и сернистые соединения, создает новые вещества и короткие радикалы, тем самым радикализируя свойства нефтепродуктов, в т. ч. моторных топлив.

6.3.1. Улучшение топливной экономичности применением комбинированного статического смесителя-активатора

Применение явления механохимии для повышения теплотворной способности топлива начато сравнительно недавно. Для этого процесса могут использоваться распространенные портативные активаторы, а также комбинированный статический смеситель-активатор Ю. В. Воробьева [15, 16, 32, 139].

Активатор (рис. 6.26) представляет собой цилиндр длиной 150 мм и диаметром 30–50 мм. Он используется для модификации моторных топлив, имеет три последовательные камеры, встраивается в любую топливную систему ДВС, не требует привода, не содержит химических веществ (в отличие от активаторов НАТИ и т. п.), не ухудшает рабочие показатели бензина, дизтоплива, авиационного керосина, мазута, улучшает сжигание рапсового масла, не уменьшает ресурс ДВС.

Эффективность активатора проверена хроматографией различных активированных топлив, уменьшением их расхода и выброса вредных веществ с ОГ автотракторных ДВС [15, 16, 139]. Хроматограммы активированного дизельного топлива показали уменьшение доли тяжелых углеводородов и увеличение легких – гексана, гептана, 3-метил-пентана – до 37 %. В бензине содержание октаноопределяющего толуола повышалось до 16 %, в авиакеросине нонана и декана – до 21 %. Активатор апробирован на мазуте, рапсовом масле, в дизельных топливах разных поставщиков; выявлено снижение содержания серы с 0,032 до 0,015 %, смол – с 7,4 до 0,8 мг/100 мл.

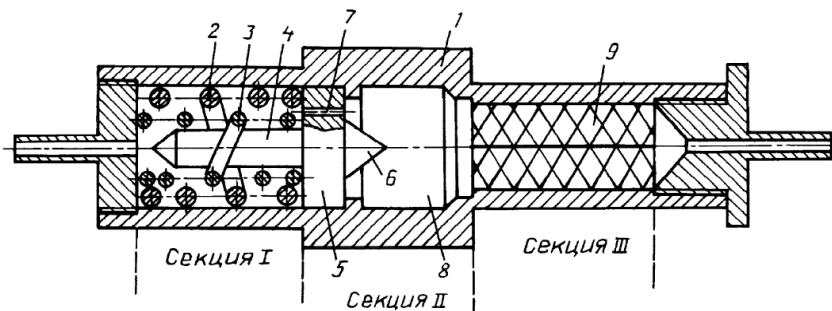


Рис. 6.26. Схема активатора:

- 1 – корпус; 2, 3 – винтовые элементы; 4 – цилиндрический стержень;
 5 – диск; 6 – конус; 7 – каналы; 8 – промежуточная камера;
 9 – смесительный элемент из перекрещивающихся решеток

Активатор испытан и в центре промышленных исследований США (Rochester Institute of Technology), где показано: уменьшение расхода любых моторных топлив на 15–27 %, содержания серы в них – до 50 %, смол – в 7–9 раз, выбросов NO – до 17 %, NO₂ – до 14 %, CO – до 49 %, увеличение на 2,49 % массы дизтоплива после активации, что сомнительно.

После активации преобразование топлив вне активатора продолжается. При этом 10–25 % активированного топлива, введенного в неактивированное, повышает долю первого в 1,3 раза [139]. В мазуте, вышедшем из активатора, процессы преобразования продолжают аналогично.

Достоинство механоактивации – ее необратимость, что может использоваться в нефтепереработке и производстве топлив, соответствующих нормам ЕВРО-4 и ЕВРО-5. Причем разные по качеству исходные нефтепродукты доводятся до одинаковых физико-химических показателей с удалением серы.

В дополнение к стендовым и дорожным испытаниям активатора, где уменьшение расхода активированного бензина достигало 31,9 %, в лаборатории ВУНЦ ВВС ВВА (Воронеж) на стенде КИ-568-ГОСНИТИ с дизелем ЯМЗ-236 испытан усовершенствованный активатор [32, 139]. Испытания проведены на трех разных дизельных топливах при установках активатора как в магистрали подачи топлива в ТНВД, так и в магистрали слива из него и подачи в ТНВД из мерного цилиндра со сливаемым в него топливом. На холостом

ходу дизеля при частоте вращения коленчатого вала 900–1300 мин⁻¹ в одиннадцати испытаниях выявлено уменьшение расхода активированного топлива в среднем на 26,3 % (табл. 6.7).

Таблица 6.7

Результаты испытаний усовершенствованного активатора

Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Наличие активатора	Расход топлива, г, за 5 мин испытаний	Экономия, мл/%
1100	+	267	71/21,0
1100	+	253	85/25,2
1100	–	338	–
1100	+	267	71/21,0
1280–1300	+	244*	128,3/38,0
Среднее значение		249,18	88,83/26,3

*При 1100 мин⁻¹ – 209,7 г.

Моторное топливо, вышедшее из смесителя-активатора, может повышать ресурс ДВС за счет меньшей жесткости его работы, более легкого пуска при низких температурах и уменьшения нагарообразования. Активатор апробирован на разных предприятиях, может устанавливаться на любые автотракторные ДВС.

В БГАТУ проводятся работы по совершенствованию конструкции рассмотренного активатора с целью достижения максимальной топливной экономичности автотракторных ДВС [75].

Физические причины повышения активатором теплоты сгорания углеводородных моторных топлив

Для сжигания топливо должно быть подогрето, избавлено от негорючих примесей и диспергировано (испарено) до молекул. Эти процессы, по-видимому, значительно облегчены в рассматриваемом активаторе.

При прогреве должно произойти дробление углеродной цепи молекул, отделение атомов водорода, полное разделение между атомами углерода. Параллельно должна идти диссоциация молекул кислорода. Лишь после этого происходит соединение атомов топлива с атомами кислорода.

Если диссоциацию молекул топлива и кислорода проводить заранее, то теплота горения не будет затрачиваться на подготовку топлива, и его теплотворная способность будет больше, чем определяемая

в калориметрической бомбе. Это может быть одной из причин повышения активатором теплоты сгорания топлива, что частично подтверждается повышенной в сравнении с жидкими нефтепродуктами теплотворностью нефтяных газов (своего рода диспергированных углеводородов), где нет необходимости дробления кластеров.

Там, где связи требуют больших затрат энергии, возможны разрывы молекулярных цепей магнитными полями и механическими напряжениями свыше предела прочности атомных связей [32]. По классическому механизму термического разложения углеводородов на начальных его стадиях рвутся связи с наименьшей энергией разрыва – 295–431 кДж/моль, а прочные связи требуют до 502,4 кДж/моль. На разложение углеводородов влияют катализаторы, например медь, цинк.

Следствия механохимии – радикализация моторных топлив, неясные продолжительные химические реакции, не текущие в обычных условиях, дробление тяжелых компонентов, создание новых легких веществ, разрушение смол и сернистых соединений, что проходит с выделением тепла. Так, разрушение ковалентных связей в цепях гептана высвобождает около 419 кДж/моль [32, 75].

А. С. Ахматовым показано, что при разрыве цепей углеводородов кроме свободных валентностей атомов углерода образуются и свободные радикалы, например $R-CH_2$, с высокой реакционной способностью.

Если механохимии подвергают смеси, то могут возникать новые химические соединения, гетерогенные цепи, построенные из продуктов разрыва. Например, образующиеся на метиленовой группе свободные радикалы могут присоединять кислород (из жидкости) и создавать взрывные перекиси: $R-CH_2-O-O-$ [32].

Короткоживущие (до 0,1 с) алкильные (CH_3^-) и арильные ($CH_3CH_2^-$) радикалы и перекиси действуют на среду с высокими скоростями рекомбинаций, присоединения и диспропорционирования [32]. Но в механохимии углеводородов образуется и значительное количество долгоживущих (от нескольких минут до нескольких месяцев и даже лет) свободных радикалов. При механохимии топлива возможно образование в качестве бирадикалов молекул кислорода, которые в малом количестве всегда имеются в моторных топливах. Возможно образование и полирадикалов с более чем двумя неспаренными электронами.

Особенности механохимии в активаторе подтверждены тем, что под влиянием долгоживущих радикалов модификация топлива продолжается и за пределами активатора. Ввод небольшой доли активированного топлива в неактивированное за 15 мин заметно повышает в смеси долю первого:

- в товарное топливо вводили 20 % активированного с 23 % легких фракций (т. е. 4,6 %), и в смеси образовывалось 12 % легких фракций;

- после ввода 30 % активированного топлива (т. е. 6,9 % легких фракций) создавалось 39 % легких фракций;

- после ввода 40 % активированного топлива (т. е. 9,2 % легких фракций) выявлено лишь 27 % легких фракций;

- после ввода 50 % активированного топлива смеси выявлено легких фракций еще меньше.

Таким образом, разрыв высокоэнергетических связей в молекулах углеводородов с образованием коротко- и долгоживущих радикалов уменьшает затраты тепла сгорания на расщепление молекул на атомы. Чем длиннее углеводородная цепь, тем ошутимее может быть диспергирование с высвобождением энергии связей в цепях (табл. 6.8). По словам Ф. М. Канарева [49, 50], чем больше актов воздействия механохимии на вещество, тем глубже его модификация. По этой причине разработан активатор и с четырьмя камерами.

Таблица 6.8

Показатели энергии связей между атомами углерода в молекулах углеводородов

Вещество	Теплота сгорания		Энергия связи между атомами углерода, кДж/моль
	кДж/моль	кДж/г	
Графит	393,680	394,1	–
Водород	286,020	123,01	–
Метан	890,930	55,73	–
Этан	1560,88	51,92	220,98
Пропан	2220,30	50,37	441,96
Бутан	2880,26	49,61	662,94
Пентан	3511,50	48,73	883,72
Гексан	4165,82	48,40	1104,9
Гептан	4820,39	48,19	1325,88
Октан	5474,41	47,97	1546,86
Декан	6783,16	47,72	1988,82

Данные табл. 6.8 показывают, что с удлинением цепи углеводородов затраты энергии на образование связей между атомами углерода значительно растут, а механохимией она может быть выделена.

Согласно Ф. М. Канареву, для разрушения связей между валентными электронами атомов в цепи достаточно затратить 2,56 eV механической энергии, а для термического разрыва ее требуется в два раза больше – 5,13 eV, т. к. каждый обособившийся электрон должен получить для своей стабильности по тепловому фотону энергией 2,56 eV. Поэтому после механического разделения валентные электроны вместо тепловых фотонов поглощают по одному эфирному из физического вакуума общей энергией в 5,13 eV и становятся полноценными, активными, могут восстановить разорванную связь и соединить части разорванных молекул. Но, соединяясь, электроны излучают поглощенные из эфира фотоны и энергонасыщают вещество той же энергией – 5,13 eV [49, 50].

Таким образом, затратив в механохимии 2,56 eV механической энергии, их связи при восстановлении электронами насыщают вещество энергией двух тепловых фотонов – 5,13 eV, или 248 кДж/моль. При разрыве же электронных связей между несколькими атомами углеводородной цепи в вещество может выделяться больше дополнительной энергии. Для подтверждения наличия в эфире его частиц – носителей энергии Ф. М. Канаревым определена его характеристика [49, 50].

Дробление механохимией углеводородов на обрывки молекул с обратимым действием валентных электронов может быть главной причиной повышения теплотворной способности и уменьшения расхода топлива в ДВС [49, 50].

Вероятно, описанные процессы могут происходить и при разрыве кластеров молекул, связей между атомами водорода и углерода. Если же разрушать связи резонансным магнитодинамическим способом [49, 50], то будет возможно углубить модификацию топлив, еще более повысив их теплотворную способность. Подтверждением этому может служить достигнутый в водо-электролитических ячейках Ф. М. Канарева коэффициент теплоотдачи величиной 29 000 [49, 50].

Можно предположить, что повышение теплотворной способности топлива обусловлено и тем, что активные радикалы в топливе, находясь в возбужденном состоянии, также могут поглощать фотоны эфира и становиться более энергонасыщенными. А значит, эффективность активатора может зависеть от материала корпуса активатора, который должен быть прозрачен для инфракрасных

фотонов, которые могут резонансно поглощаться компонентами углеводов.

Теплоту сгорания стандартно определяют в калориметрической бомбе, где отсутствуют какие-либо воздействия на топливо, а активаторы обуславливают воздействие на топливо окружающей среды. Это объясняет, как механохимические процессы в воде, газах позволяют получать дополнительную энергию из окружающего пространства. Так, на основе трубки Ранка–Хильша только в России выпускается более 30 аппаратов водяного отопления, в которых тепловая энергия в 1,1–10 раз превышает энергию на привод водяного насоса этих отопителей.

По словам Ф. М. Канарева, все эффекты, связанные с повышением давления сгорания топлива в закрытых полостях формируются не газами, а фотонами. Объемы световых фотонов, излучаемых электронами в реакциях предварительно диссоциированных молекул, в 100 000 раз больше объемов их источников – электронов, а попутно излучаемые невидимые инфракрасные фотоны в 10, 20–100 раз больше объема световых фотонов [49, 50]. Предположим, что уменьшение расхода моторных топлив обусловлено как их преобразованиями в активаторе, так и процессами в камерах сгорания ДВС.

Как показали испытания, активатор, механохимически воздействуя на углеводороды топлив, уменьшает их расход в ДВС без уменьшения их эффективной мощности. Подобное стабильное и высокоэффективное воздействие реализовано впервые – в рассмотренном активаторе [75].

Активированное дизельное топливо уменьшает и дымность дизелей. Так, дымность ОГ дизеля КамАЗ-740.65-240 в режиме свободного ускорения по прибору МЭТА-01 МП 0.1 составила $3,5 \text{ м}^{-1}$ (77,8 % по вспомогательной шкале), а с установленным активатором – $2,7 \text{ м}^{-1}$ (68,7 %).

При проверке низкотемпературных свойств активированного топлива в климатической камере КХТВ-0,08 выявлено, что товарное неактивированное топливо при температуре минус 30 °С полностью теряет текучесть, а активированное сохраняет ее и при минус 45 °С без признаков образования кластеров.

Активация топлива снижает температуру и период задержки его воспламенения, повышает полноту сгорания. Это подтверждается более мягкой работой ДВС и обеспечением их работы с увеличенным углом опережения зажигания/впрыска, т. к. новые компоненты

топлива воспламеняются при меньшей температуре рассредоточенно во времени.

Применение комбинированного статического смесителя-активатора для модификации моторных топлив позволяет значительно улучшить топливную экономичность ДВС. Его можно встраивать в любую топливную систему автотракторных ДВС без какой-либо доработки привода, полностью исключены химические вещества, не ухудшаются рабочие показатели дизельного топлива, мазута, улучшается сжигание рапсового масла, не уменьшается ресурс ДВС. Активатор может найти применение в производстве моторных топлив по нормам ЕВРО-3 и ЕВРО-4 малозатратными приемами механохимии. Разные по качеству исходные нефтепродукты доводятся до близких физико-химических показателей с выделением из дизельного топлива и осаждением в активаторе серы, а также с разрушением смолистых соединений.

6.3.2. Улучшение топливной экономичности применением магнитных и электромагнитных средств обработки

Известны магнитные приемы обработки топлив. Венгерская фирма «Бионет» выпускает устройство «Мастер бернер» для ДВС и газовых котлов, в Германии производят магнетизеры топлива MagnoFuel, FuelFree и др. Аналогичные приборы известны и в Японии. Магнитную обработку топлива в Украине ведут фирмы НПФ «ЭКОВОД», ЦНИЛ АО «Укрнефть», в России – фирмы «ДС Технология», НПО «ММТ», ООО «Фирма Флеттер», «Экомаг» и др. Срок окупаемости устройств – 1–2 месяца [32].

Стендовые испытания магнитного активатора «ЭКОМАГ-7Г» (рис. 6.27) в НАМИ показали увеличение мощности бензинового ДВС на 15 % при уменьшении расхода топлива на 10–40 %, выбросов CO и CH – на 70–80 %, NO_x – на 15–20 %, осмоления – на 14 %. Соппротивление топливного тракта повысилось при этом не более чем на 10 % [32]. Высокая эффективность устройств подтверждена соответствующими протоколами НАМИ-ИЦАИ, а также испытаниями МНПЗ. В НАМИ, рекомендуя «ЭКОМАГ» в массовое внедрение, заявили, тем не менее, о возможных побочных явлениях, но на практике выявлена только положительная эффективность, в т. ч. уменьшение закоксованности ЦПГ ДВС, повышение срока службы нейтрализаторов ОГ, свечей зажигания.

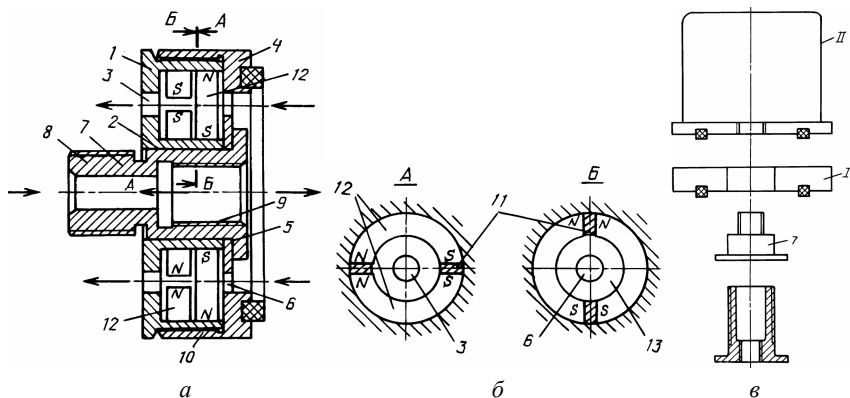


Рис. 6.27. Фильтр «ЭКОМАГ-200Г» [89]:

a – вид в разрезе; *б* – схема расположения магнитов; *в* – схема сборки

До 1996 г. в ГОСНИТИ производился очиститель-катализатор топлива. Особенность этого средства: до и после кольцевого магнита установлены улитки со спиралью Архимеда, создающие спиральное движение топлива у передней и задней плоскости магнита. Средство было испытано в АТП СП «Эрдэнэт» на автомобиле УАЗ-452 и обеспечило существенную экономию бензина.

Известны и другие магнитные, электромагнитные серийные средства обработки топлив: прибор ММТ-БД от ООО «НПО ММТ» (Санкт-Петербург) по ТУ 3116-001-64233488–2010, сертифицированный в России и ЕС; катализатор топливный физический «ТОНУС» по ТУ У 343 14115698-003–2001; электронный каталитический преобразователь топлива (ЭКТ) инженера ВИЭСХ И. В. Евграфова для резонансной обработки бензина, дизтоплива. Принцип работы ЭКТ базируется на резонансном воздействии электромагнитных полей на углеводороды, разрыве их молекул, образовании свободных радикалов. В ЭКТ, как и в активаторе, осаждается сера.

Сложным является устройство для обработки топлива, где снаружи имеется электромагнитная обмотка, а внутри – металлические шарики: совмещены электромагнитное поле и трибоэлектризация [71, 75, 90]. Специфика устройства – материалы с одинаковой поляризационной ориентацией, имеющие большую диэлектрическую постоянную, чем углеводороды.

Известно устройство для комбинированной магнитной обработки жидкости по патенту ВИЭСХ (патент № 2554195). Оно состоит

из блока трех постоянных магнитов, а на входе и выходе установлены электромагниты с катушками Гельмгольца и компенсаторами реактивной мощности.

В углеводородах, обработанных трибохимически, а также электрическими, магнитными и электромагнитными воздействиями, изменяются физико-химические свойства и межмолекулярные взаимодействия – поверхностное натяжение, вязкость, плотность, температура вспышки – и повышается теплотворная способность (см. табл. 6.8).

Определить низшую теплотворную способность топлива Q_n можно по эмпирической формуле Д. И. Менделеева. Практика расчетов показала ее приемлемую достоверность, однако стандартно теплоту сгорания определяют в калориметрической бомбе, где отсутствуют все воздействия на топливо и ослаблено влияние окружающей среды, а активаторы, осуществляя различное воздействие на топливо, могут обуславливать и влияние на его компоненты окружающей среды.

Таблица 6.9

Пример преобразования углеводородов под влиянием электромагнитного и трибохимического воздействий [32, 75]

Исходная фракция, теплота сгорания, кДж/моль	Состав фракций по этапам преобразования		Конечные фракции	Теплота сгорания преобразованного топлива, кДж/моль	Положительный эффект, %
	1-я фаза	2-я фаза			
C_8H_{18} $Q = 5470$ кДж/моль	2 C_2H_2	2 C_2H_2	2 C_2H_2	$Q = 7001 - 8367$ кДж/моль	Не менее 28
	0,5 C_2H_4	0,5 C_2H_3	0,5 C_2H_3		
		0,5 Н	0,5 Н		
	3 CH_4	3 CH_3	3 CH_3		

Таким влиянием можно объяснить то, что результат дробления нормального октана экзотермичен. Увеличение объема топлива после активации на 2,5 %, что показано при исследованиях «Рочестер-Центра» (США), сомнительно, но также может быть принято во внимание.

Существует и следующее объяснение: активные радикалы в обработанных топливах поглощают фотоны окружающего пространства, насыщаются дополнительной энергией, участвуют в реакциях образования новых соединений, а поглощенная из пространства энергия проявляется при сгорании через повышение теплотворной способности топлива с выделением инфракрасных фотонов.

Подтверждением использования энергии окружающего пространства служат искровые приемы получения энергии из эфира, а также серия самовращающихся генераторов тока [50] и некоторые другие энергетические явления.

При достаточном прогреве протекает диссоциация молекул: отделение атомов водорода, дробление углеродной цепи на атомы углерода. Параллельно может идти диссоциация молекул кислорода. Лишь после таких дроблений происходит сгорание, т. е. соединение атомов топлива с атомами кислорода.

Если диссоциацию молекул топлива и кислорода производить малозатратно заранее, вне камеры сгорания ДВС, то теплота сгорания не затрачивается на подготовку топлива, а его теплотворность проявляется больше, чем определяемая в калориметрической бомбе. Это может быть причиной повышения активаторами теплоты сгорания цепочечных углеводородов, что частично подтверждается повышенной по сравнению с жидким топливом теплотворностью газов, где необходимость дробления на молекулы отсутствует. Возможно, не требуется и диссоциация углей, в которых слаба химическая связь их компонентов.

Таким образом, обработка моторных топлив различными активаторами позволяет заметно уменьшить их эксплуатационный расход в различных ДВС.

Трибохимические и электромагнитные воздействия на топливо, известные, но малораспространенные, подлежат широкому применению в автотракторной технике, но для этого желательны их испытания в соответствии с ГОСТ 18509–88 и ГОСТ 20306–90.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Отечественный и зарубежный опыт свидетельствуют о том, что диагностирование – важнейшее средство управления техническим состоянием машин и улучшения их использования в процессе эксплуатации, позволяющее обеспечить наиболее полное использование ресурса составных частей машин при оптимальной их производительности, безотказности, безопасности движения, топливной экономичности, экологичности и наименьших затратах на устранение отказов и неисправностей.

2. Диагностирование требует методического и инструментального оснащения, особенно для контроля топливно-энергетических показателей и ресурсных параметров. Это обусловило необходимость разработки и внедрения на практике широкой гаммы методов и средств технической диагностики.

3. Предложенные ГОСНИТИ метод и математический аппарат оптимизации режимов испытаний и конструктивов стендов для обеспечения условий совмещения и безопасности контроля мощностных, тормозных показателей и топливной экономичности колесных тракторов позволил создать одноприводные комплексные силовые реверсивные барабанные диагностические стенды. Стенды введены в технологии диагностирования колесных тракторов.

4. Реализация бестормозного экспресс-контроля мощности и топливной экономичности дизелей по эффективному расходу топлива обеспечена переносными расходомерами КИ-8940М-ГОСНИТИ, а повышенная точность – расходомерами КИ-8982-ГОСНИТИ.

5. Установлена корреляционная зависимость значений расхода картерных газов автотракторных дизелей от значения их эффективной мощности, что позволило на основании теории управления надежностью техники оптимизировать нормативы расхода картерных газов как ресурсного параметра ЦПГ основных марок автотракторных дизелей с помощью расходомеров КИ-17999-ГОСНИТИ, КИ-13671-ГОСНИТИ для ресурсного диагностирования ЦПГ автотракторных ДВС.

6. Разработанные ГОСНИТИ методика экспресс-оценки остаточного ресурса ЦПГ ДВС по зависимости остаточного вакуума от компрессии в цилиндрах позволяют без длительного сбора обширных данных о динамике диагностических параметров и технико-

экономических показателях эксплуатации и диагностирования ДВС экспрессно оценивать остаточный ресурс отдельных цилиндров бензиновых и дизельных ДВС.

7. Исследования позволили реализовать автоматизированный контроль следующих параметров автотракторной техники:

- амплитуды, спада, динамики давления и времени переходных процессов в системах смазки, топливоподачи низкого и высокого давления, гидроприводах РУ, НМ, КП, пневмоприводах, давления ОГ перед ТКР;

- амплитуды вибросигналов ТНВД, форсунок, ГРМ, КШМ, агрегатов трансмиссии, рабочих органов комбайнов, амплитуды колебаний агрегатов;

- фазовых параметров нагнетания и впрыскивания топлива, открытия и закрытия впускных/выпускных клапанов ГРМ;

- углового ускорения коленчатого вала в свободном разгоне дизеля по предложенному нами приему усреднения пиковых значений ускорения, а также ускорения в рабочем ходе и замедления при выпуске в отдельных цилиндрах;

- расхода топлива в стационарном режиме, при свободном ускорении коленчатого вала;

- расхода картерных газов;

- напряжения постоянного, пульсирующего и переменного тока;

- коэффициента вариации амплитуды вибросигналов ГРМ, ТНВД, форсунок, агрегатов силовой передачи.

8. Прием искусственного интеллекта, реализованный в диагностировании впервые, дал стабильный опорный сигнал к развертке параметров давления, разрежения и вибросигналов по углу поворота коленчатого вала.

9. Системный экспресс-контроль масел на моюще-диспергирующие свойства, загрязненность, обводненность и окисленность по «капельной пробе», выявленный как мощный прием углубленного диагностирования ДВС, позволяет повсеместно и достоверно выявлять рабочие свойства, ресурс масла, причины ускоренного изнашивания агрегатов и назначать меры по их устранению.

10. Для предприятий АПК адаптированы приемы химмотологического контроля моторных и трансмиссионных масел с нормативами загрязненности, обводненности, моюще-диспергирующих свойств, температуры вспышки, а также вязкости и щелочного числа, которые предложено определять экспрессно, но по возможности.

Вместе с этим необходима разработка экспресс-приемов контроля антиизносных, адгезионных свойств масел и стойкости их против высокотемпературного шламообразования.

11. Установлено, что углубленное диагностирование самоходной сельскохозяйственной техники с помощью спектрального анализа масел принципиально отличается от других методов диагностирования машин и оборудования, так как:

- выявляет тенденцию к ускоренному изнашиванию агрегатов и ее причины, позволяет назначить профилактические меры, что существенно увеличивает ресурс агрегатов и их масел;

- вместе с химмотологическим контролем обеспечивает точное определение срока смены масел, что предотвращает как аварийную эксплуатацию машин, так и недоиспользование ресурса масел.

12. Многочисленными теоретическими и эксплуатационными исследованиями установлено, что выявленная ведущими исследователями спектрального анализа тенденция к стабилизации количества продуктов изнашивания и загрязнений в маслах в основном не проявляется для машин, работающих в полевых условиях. Это обусловлено неизбежным внешним загрязнением, а также обводнением масел при неисправностях агрегатов. В агрегатах без фильтрации масел (КП, ведущие мосты) стабилизация количества продуктов изнашивания и загрязнений невозможна принципиально.

13. Анализом физико-химических и конструктивно-технологических показателей масел дизелей доказаны основные факторы, которые необходимо учитывать при дифференцированном обосновании норм количества продуктов изнашивания в маслах ДВС:

- эффективность очистки масла, обусловленная конструкцией ДВС;
- наличие мокрого или сухого картера;
- наличие/отсутствие системы предпусковой прокачки и подогрева масла;
- вязкость масла с градациями 6–8, 10–12, 13–15,5 и 18–22 сСт;
- ЩЧ масла с двумя его градациями: 5–7 и более 8 мг КОН/г.

14. Диагностическими параметрами масел, обуславливающими повышенное содержание в них металлов, являются:

- содержание кремния (в свежих – до 5, в работавших – до 45 ppm);
- содержание воды (в свежих – до 0,08 %, в работавших – до 1,5 %);
- коррозионность масла к цветным металлам подшипников КШМ;
- снижение вязкости до 6–8 сСт, а температуры вспышки – ниже 170 °С.

15. Технология диагностирования агрегатов МТП с помощью спектрального анализа масел с обоснованными нормативами позволяет двум операторам планомерно диагностировать значительно большее количество техники. Подтверждена эффективность снижения изнашивания и повышения срока службы агрегатов тракторов постановкой дополнительных ограждений от внешнего загрязнения (экранов перед воздухозабором ДВС, у блоков цилиндров, у масляных картеров).

16. Эффективным способом повышения ресурса и работоспособности изношенной техники является применение триботехнических составов (профилактических, ремонтно-восстановительных, приработочных), а также малозатратная поляризация компонентов масел несложными электроприборами. Нетрадиционная триботехника решает три проблемы: уменьшение окислительного, предотвращение водородного изнашивания и механическое упрочнение поверхностей трения, что приближает реализацию «эффекта безызносности». ГМТ-технология – эффективный и более дешевый метод формирования антифрикционных DLC-сопряжений в эксплуатации машин и при изготовлении деталей.

17. Нетрадиционные триботехнологии особенно эффективны при ограниченных возможностях сервиса машин, недостатке и низком качестве запасных частей, смазочных материалов. Но для выбора ГМТ следует исходить из надежности поставщика, испытанности и стабильности его продуктов, из документов, подтверждающих многолетнюю эффективность обработки им узлов, агрегатов.

18. Реализация инновационной триботехнологии, расширенных приемов диагностирования и ТО машин в АПК повышает характеристики изношенных агрегатов машин и оборудования порой до номинальных значений, позволяет в 1,5–3 раза увеличить межремонтный ресурс ДВС, силовых агрегатов, срок службы их масел, в 1,5 раза уменьшить затраты на техническую эксплуатацию МТП с большим экономическим эффектом.

19. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники по предлагаемым технологиям, выявляя фактическое техническое состояние и неисправности машин, назначая работы по их обслуживанию и ремонту по фактической потребности, в народно-хозяйственном значении позволяет:

– значительно уменьшить затраты запасных частей, материалов и труда, затраты на устранение отказов и неисправностей машин в эксплуатации, на ремонты и ТО;

- уменьшить изнашивание и максимально использовать эксплуатационный ресурс машин;
- сэкономить топливо-смазочные материалы;
- максимально возможно исключить аварии и ДТП машин в эксплуатации;
- уменьшить недобор и потери сельскохозяйственной продукции.

20. Техническая и экономическая эффективность диагностирования будет возрастать для все более сложных энергонасыщенных машин и более оперативных и углубленных методов контроля, основанных на современных достижениях науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллилуев, В. А. Техническая эксплуатация машинно-тракторного парка : учеб. пособие / В. А. Аллилуев, А. Д. Ананьин, В. М. Михлин. – М. : Агропромиздат, 1991. – 308 с.
2. Арабян, С. Г. Масла и присадки для тракторных и комбайновых двигателей : справочник / С. Г. Арабян, А. Б. Виппер, И. А. Холомонов. – М. : Машиностроение, 1984. – 208 с.
3. Аринин, И. Н. Диагностирование технического состояния автомобилей / И. Н. Аринин. – М. : Транспорт, 1978. – 232 с.
4. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
5. Балабанов, В. И. Автомобильные присадки и добавки / В. И. Балабанов. – М. : РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2011. – 225 с.
6. Банник, А. П. Развитие отечественных и зарубежных методов тяговых испытаний тракторов / А. П. Банник, В. С. Латыш. – М. : ЦНИИТЭИтракторсельхозмаш, 1974. – 56 с.
7. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика машин по вибрации : учеб. пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – СПб. : СПбГМТУ, 2000. – 158 с.
8. Безразборные технологии увеличения эксплуатационного ресурса автотранспортной техники / В. В. Ладиков [и др.]. – М. : VISSO, 2004. – 52 с.
9. Безразборный сервис автомобиля. Обкатка, профилактика, очистка, тюнинг, восстановление / В. И. Балабанов [и др.]. – М. : Известия, 2007. – 272 с.
10. Безызнасная эксплуатация двигателей внутреннего сгорания : науч. издание / Р. Ю. Соловьев [и др.]. – М. : ГОСНИТИ, 2015. – 196 с.
11. Бельских, В. И. Справочник по техническому обслуживанию и диагностированию тракторов / В. И. Бельских. – М. : Россельхозиздат, 1986. – 399 с.
12. Большаков, Г. Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов / Г. Ф. Большаков. – 2-е изд., перераб. – Л. : Недра, 1982. – 350 с.
13. Васильков, Д. В. Анализ поверхностного слоя, формируемого минеральными модификаторами поверхности трения / Д. В. Васильков, И. Ф. Пустовой, Н. И. Пустовой // Труды ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 107, ч. 2. – С. 11–13.
14. Венцель, С. В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С. В. Венцель. – М. : Химия, 1979. – 240 с.

15. Воробьев, Ю. В. Анализ содержания основных компонентов в дизельном топливе после механоактивации / Ю. В. Воробьев, И. В. Фарахшина, Д. А. Свиридов // Вестник ТГТУ. – 2016. – № 2. – С. 280–285.

16. Воробьев, Ю. В. Повышение теплотворной способности моторных топлив / Ю. В. Воробьев, А. В. Дунаев // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 8. – С. 48–51.

17. Говорущенко, Н. Я. Диагностика технического состояния автомобилей / Н. Я. Говорущенко. – М. : Транспорт, 1970. – 255 с.

18. Голещихин, Ю. И. Техническая диагностика судовых дизелей по комплексному анализу масла / Ю. И. Голещихин, В. Б. Ломухин. – М. : ЦБНТИ, 1990. – Вып. 1. – 30 с.

19. Григорьев, М. А. Качество моторного масла и надежность двигателей / М. А. Григорьев, Б. М. Бунаков, В. А. Далецкий. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 232.

20. Григорьев, М. А. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания / М. А. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1983. – 246 с.

21. Гуреев, А. А. Химмотология / А. А. Гуреев, И. Г. Фукс, В. Л. Лашхи. – М. : Химия, 1986. – 368 с.

22. Гурьянов, Ю. А. Экспресс-методы и средства диагностирования агрегатов машин по параметрам масла : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Гурьянов Юрий Анатольевич. – Челябинск, 2007. – 39 с.

23. Денисов, В. Г. Методы и средства технического диагностирования судовых энергетических установок / В. Г. Денисов. – М. : Феникс, 2008. – 304 с.

24. Диагностика и техническое обслуживание машин : учебник / А. Д. Ананьин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Академия, 2015. – 416 с.

25. Диагностирование гидростатических трансмиссий / В. Я. Тимошенко [и др.] // Агропанорама. – 2009. – № 1. – С. 44–48.

26. Динамический метод диагностики автотракторных двигателей // Труды ВАСХНИЛ: Сиб. отделение. – Новосибирск : Сиб-ИМЭ, 1981. – 86 с.

27. Днепроvский, К. С. Механохимические превращения углеводородов нефти : автореф. дис. ... канд. хим. наук : 02.00.13 / Днепроvский Константин Сергеевич. – Томск, 2003. – 24 с.

28. Додонова, Д. А. Влияние алюминийсодержащей смазочной композиции на процессы трения и изнашивания металлических пар / Д. А. Додонова, В. Ф. Пичугин, Д. В. Лаптев // Труды ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 108. – С. 245–249.

29. Долматов, В. Ю. Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства и применение / В. Ю. Долматов // Успехи химии. – 2007. – № 76 (4). – С. 375–389.

30. Дунаев, А. В. Исследование диагностических параметров, разработка методов и средств их контроля для совершенствования диагностирования и технического обслуживания МТП АПК / А. В. Дунаев, С. А. Соловьев. – М. : ГОСНИТИ, 2015. – 360 с.

31. Дунаев, А. В. Модернизация изношенной техники с применением трибопрепаратов / А. В. Дунаев, С. Н. Шарифуллин. – Казань, КФУ, 2013. – 272 с.

32. Дунаев, А. В. Нетрадиционная триботехника для повышения ресурса автотракторной техники. Итоги 25-летнего развития / А. В. Дунаев, Е. М. Филиппова ; под ред. С. Н. Шарифуллина. – М. : ФНАЦ ВИМ, 2017. – 252 с.

33. Дунаев, А. В. Нетрадиционная триботехника. Модификация поверхностей трения / А. В. Дунаев. – Саар-Брюккен : Lambert Academic Publishing, 2013. – 270 с.

34. Дунаев А. В. Нормативные материалы для диагностирования колесных тракторов на стенде КИ-8948-ГОСНИТИ : отчет о НИР / А. В. Дунаев. – М. : ГОСНИТИ, 1978. – 44 с.

35. Дунаев, А. В. Развитие диагностирования машин. Тракторы и автомобили / А. В. Дунаев. – Саар-Брюккен : Lambert Academic Publishing, 2013. – 308 с.

36. Дунаев, А. В. Разработка и совершенствование комплекса методов и средств диагностирования агрегатов машинно-тракторного парка агропромышленного комплекса : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Дунаев Анатолий Васильевич. – М., 2014. – 471 с.

37. Дунаев, А. В. Технологические рекомендации по повышению ресурса агрегатов тракторов ремонтно-восстановительными добавками к смазочным маслам / А. В. Дунаев, В. П. Лялякин, Р. Ю. Соловьев. – М. : ФГБНУ Росинформагротех, 2013. – 96 с.

38. Дунаев, А. В. Технологическое руководство по контролю и регулировке дымности отработавших газов дизелей тракторов, комбайнов, дорожно-строительной и автотранспортной техники в условиях эксплуатации / А. В. Дунаев. – М. : ГОСНИТИ, 1998. – 100 с.

39. Дунаев, А. В. Технология диагностирования колесных тракторов / А. В. Дунаев, К. Ю. Скибневский, Ю. Ю. Титов ; под. ред. М. М. Михлина. – М. : ГОСНИТИ, 1981. – 140 с.

40. Дунаев, А. В. Технология контроля и восстановления экологических показателей дизелей в эксплуатации / А. В. Дунаев. – М. : ГОСНИТИ, 1994. – 88 с.

41. Дунаев, А. В. Улучшение топливной экономичности ДВС методами механохимии / А. В. Дунаев, В. П. Миклуш, В. Е. Тарасенко // Изобретатель. – Минск, 2017. – № 5–6 (209–210). – С. 27–29.

42. Жданко, Д. А. Торможение автотракторных дизелей при послеремонтной стендовой обкатке дросселированием потока рабочей жидкости : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Жданко Дмитрий Анатольевич. – Минск, 2011. – 185 с.

43. Ждановский, Н. С. Диагностика дизелей автотракторного типа / Н. С. Ждановский, Б. А. Улитовский, В. А. Аллилуев. – Л. : Колос, 1970. – 192 с.

44. Заславский Ю. С. Трибология смазочных материалов / Ю. С. Заславский. – М. : Химия, 1991. – 276 с.

45. Зуев, В. В. Конституция, свойства минералов и строение земли (энергетические аспекты) / В. В. Зуев. – СПб. : Наука, 2005. – 400 с.

46. Изучить создание наноструктурных пленок с использованием порошковых и других материалов в сопряжениях трения дизельных двигателей : отчет о НИР : 09.04.05.01. – М. : ГОСНИТИ, 2013. – 155 с.

47. Инжиниринговая компания НПП «МИКС Инжиниринг» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mix-eng.ru>. – Дата обращения: 22.02.2019.

48. Инновационные методы повышения послеремонтной надежности сельскохозяйственной техники и инвестиционной привлекательности ремонтно-обслуживающих предприятий АПК / В. И. Черноиванов [и др.]. – М. : ГОСНИТИ, 2012. – 399 с.

49. Канарев, Ф. М. Начала физхимии микромира / Ф. М. Канарев. – 8-е изд. – Краснодар, КубГАУ, 2007. – 753 с.

50. Канарев, Ф. М. Теоретические основы физхимии нанотехнологий / Ф. М. Канарев. – 2-е изд. – Краснодар : КубГАУ, 2008. – 675 с.

51. Канарчук, В. Е. Бесконтактная диагностика машин / В. Е. Канарчук. – М. : Машиностроение, 1987. – 158 с.

52. Канарчук, В. Е. Термометрическая диагностика машин / В. Е. Канарчук, О. Б. Дергачев, А. Д. Чигринец. – Киев : Вища школа, 1985. – 168 с.

53. Карасев, В. А. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей / В. А. Карасев, В. П. Максимов, М. К. Сидоренко. – М. : Машиностроение, 1978. – 132 с.

54. Коваленко, В. П. Загрязнения и очистка нефтяных масел / В. П. Коваленко. – М. : Химия, 1978. – 304 с.
55. Колчин, А. В. Датчики диагностирования машин / А. В. Колчин. – М. : Машиностроение, 1984. – 117 с.
56. Колчин, А. В. Технологическое руководство по контролю и регулировке тракторных и комбайновых дизелей при эксплуатации / А. В. Колчин, Б. Ш. Каргиев, Д. В. Доронин. – М. : Росинформагротех, 2005. – 134 с.
57. Комплексная система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве. – М. : ГОСНИТИ, 1985. – 144 с.
58. Костецкий, Б. И. Надежность и долговечность машин / Б. И. Костецкий. – Киев : Техника, 1975. – 226 с.
59. Краусп, В. Р. Научные методы и опыт компьютеризации управления инновационными проектами до 2020 года / В. Р. Краусп. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 336 с.
60. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества / П. П. Кремлевский. – Л. : Машиностроение, 1989. – 686 с.
61. Кузнецов, А. В. Практикум по топливу и смазочным материалам / А. В. Кузнецов, М. А. Кульчев. – М. : Агропромиздат, 1990. – 224 с.
62. Кузнецов, Е. С. Техническая эксплуатация автомобилей : учебник для вузов / Е. С. Кузнецов, А. П. Болдин, В. М. Власов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 2001. – 535 с.
63. Кюрегян, С. К. Атомный спектральный анализ нефтепродуктов / С. К. Кюрегян. – М. : Химия, 1985. – 319 с.
64. Лазарев, С. Ю. О концептуальных вопросах исследований в области трибологии природных минеральных материалов / С. Ю. Лазарев // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 124, ч. 2. – С. 47–52.
65. Ленский, А. В. Специализированное техническое обслуживание машинно-тракторного парка / А. В. Ленский. – М. : Росагропромиздат, 1989. – 236 с.
66. Лиханов, В. А. Снижение токсичности автотракторных дизелей / В. А. Лиханов, Д. М. Сайкин. – М. : Агропромиздат, 1991. – 242 с.
67. Лышко, Г. П. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости : учеб. пособие / Г. П. Лышко. – М. : Колос, 1989. – 256 с.
68. Любимов, Д. Н. Формирование смазочных слоев под воздействием минеральных модификаторов трения / Д. Н. Любимов, К. Н. Долгополов // Трибология. Международная энциклопедия. – СПб. : ПГУПС, 2013. – Том V : Масла, смазки, присадки для подвижных трибосопряжений, герметизации и уплотнения. – С. 352–357.

69. Матвеев, А. С. Влияние загрязнения масел на работу гидроагрегатов / А. С. Матвеев. – М. : Россельхозиздат, 1976. – 48 с.

70. Методы и средства диагностирования сельскохозяйственной техники. Обзорная информация. – М. : АгроНИИТЭИИТО, 1989. – 36 с.

71. Микипорис, Ю. А. Улучшение экологических показателей автомобильных двигателей электромагнитной обработкой топлива / Ю. А. Микипорис. – Ковров : КГТА, 2008. – 168 с.

72. Миклуш, В. П. Обоснование применения минеральных трибосоставов для проведения безразборного ремонта / В. П. Миклуш, В. Е. Тарасенко, А. В. Дунаев // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2017. – № 7. – С. 43–51.

73. Миклуш, В. П. Организация технического сервиса в агропромышленном комплексе : учеб. пособие / В. П. Миклуш, А. С. Сайганов. – Минск : ИВЦ Минфина, 2014. – 607 с.

74. Миклуш, В. П. Организация технического сервиса в АПК / В. П. Миклуш. – Минск : БГАТУ, 2004. – 290 с.

75. Миклуш, В. П. Повышение топливной экономичности автотракторных двигателей приемами трибоактивации / В. П. Миклуш, В. Е. Тарасенко, А. В. Дунаев // Науковий вісник НУБіП України. – 2017. – № 262. – С. 277–286.

76. Михлин, В. М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники / В. М. Михлин. – М. : Колос, 1984. – 336 с.

77. Модернизация инженерно-технической системы сельского хозяйства / В. И. Черноиванов [и др.]. – М. : Росинформагротех, 2010. – 412 с.

78. Научные основы технической эксплуатации сельскохозяйственных машин / В. И. Черноиванов [и др.]. – М. : ГОСНИТИ, 1996. – 360 с.

79. Николаенко, А. В. Повышение эффективности использования тракторных дизелей в сельском хозяйстве / А. В. Николаенко, В. Н. Хватов. – Л. : Агропромиздат, 1986. – 190 с.

80. Обельницкий, А. М. Топливо и смазочные материалы : учебник для вузов / А. М. Обельницкий. – М. : Высшая школа, 1982. – 208 с.

81. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник для технических вузов / Э. Д. Браун [и др.] / под ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Наука и техника, 1995. – 778 с.

82. Остриков, В. В. Смазочные материалы и контроль их качества в АПК / В. В. Остриков, О. А. Клейменов, В. М. Баутин. – М. : Росинформагротех, 2003. – 175 с.

83. Остриков, В. В. Увеличение ресурса работающего моторного масла и повышение его противоизносных свойств / В. В. Остриков, И. В. Бусин, С. В. Попов // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 109, ч. 1. – С. 81–84.

84. Оценка технического состояния агрегатов объемного гидравлического привода в эксплуатационных условиях / Д. А. Жданко [и др.] // Агропанорама. – 2018. – № 1. – С. 37–40.

85. Павлов, Б. В. Акустическая диагностика механизмов / Б. В. Павлов. – М. : Машиностроение, 1971. – 223 с.

86. Павлов, О. Г. Инновационная технология безразборного ремонта узлов трения промышленного оборудования и автотехники / О. Г. Павлов // Инженерный клуб Санкт-Петербурга. – 2013. – № 3. – С. 42–45.

87. Папок, К. К. Химмотология топлив и смазочных масел / К. К. Папок ; науч. ред. А. Б. Виппер. – М. : Воениздат, 1980. – 192 с.

88. Пасечников, Н. С. Научные основы технического обслуживания машин в сельском хозяйстве / Н. С. Пасечников. – М. : Колос, 1983. – 304 с.

89. Пат. № 2268388 Российская Федерация, МПК F02M 27/00. Фильтр магнитной очистки и обработки автомобильного и авиационного топлива «ЭКОМАГ-10Г» / Ю. А. Голиков. – № 2004112248/15 ; заявл. 23.04.2004 ; опубл. 20.01.2006.

90. Пат. № 2296238 Российская Федерация, МПК F02M 27/04. Устройство для обработки топлива / А. А. Заплаткин, В. И. Медведев, Ю. А. Микипорис [и др.]. – № 2005126687/06 ; заявл. 23.08.2005 ; опубл. 27.03.2007.

91. Пат. № 2411074 Российская Федерация, МПК B01F 13/10. Комбинированный статический смеситель-активатор / Ю. В. Воробьев, В. Б. Тетерюков // № 2009124923/05 ; заявл. 01.07.2009 ; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 3 с.

92. Петросян, П. Ш. Исследование износа и возможности оценки технического состояния двигателей тракторов с применением метода спектрального анализа : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Петросян Павел Шмавонович. – Саратов, 1973. – 18 с.

93. Пичугин, В. Ф. Элементный состав, строение и толщина защитных пленок на поверхностях трения пары антифрикционный сплав–сталь в глицерине / В. Ф. Пичугин, В. М. Щербинин // Труды ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 108. – С. 250–253.

94. ПО «Стендовое оборудование» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dta-stend.ru>. – Дата обращения: 20.02.2019.

95. Повышение долговечности машин и ремонтно-технологического оборудования применением методов безразборного ремонта и технологий : учеб. пособие / В. И. Черноиванов [и др.]. – М. : ГОСНИТИ, 2015. – 236 с.

96. Повышение эффективности технического обслуживания тракторов / В. Я. Тимошенко [и др.] // Агропанорама. – 2018. – № 4. – С. 35–39.

97. Погодаев, Л. И. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин. – СПб. : АТРФ, 2006. – 607 с.

98. Погорелый, И. П. Обкатка и испытание тракторных и автомобильных двигателей / И. П. Погорелый. – М. : Колос, 1973. – 208 с.

99. Пустовой, И. Ф. 14-летний опыт питерской РВС-технологии / И. Ф. Пустовой // Труды ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 107, ч. 2. – С. 38–40.

100. Резников, В. Д. Критерии работоспособности моторных масел / В. Д. Резников, Э. Н. Шипулина // Химия и технология топлив и масел. – 1989. – № 9. – С. 29–34.

101. Рекомендации по организации и технологии диагностирования тракторов с помощью установки КИ-13940-ГОСНИТИ / А. В. Колчин [и др.]. – 2-е изд., доп. – М. : ОТЭИ ГОСНИТИ, 1985. – 246 с.

102. Рекомендации по рациональному использованию смазочных материалов в сельском хозяйстве. – Тамбов : ВНИИТиН, 1993. – 99 с.

103. Ремонт и регулирование топливной аппаратуры автотракторных и комбайновых дизелей. – М. : Росинформагротех, 2005. – 211 с.

104. Ресурсосбережение при технической эксплуатации сельскохозяйственной техники / В. И. Черноиванов [и др.]. – М. : Росинформагротех, 2001. – 420 с.

105. Ролич, О. Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей / О. Ч. Ролич, В. Е. Тарасенко // Агропанорама. – Минск, 2019. – № 5 (135). – С. 42–45.

106. Ролич, О. Ч. Тепловой контроль работы двигателя на основе статистического анализа сигналов болометра / О. Ч. Ролич, В. Е. Тарасенко, В. С. Ивашко // Изобретатель. – 2019. – № 2–3. – С. 40–44.

107. Руководство по диагностированию самоходных комбайнов с помощью автоматизированного машинотестера КИ-13950-ГОСНИТИ / В. М. Михлин [и др.]. – М. : ГОСНИТИ, 1990. – 81 с.

108. Руководство по диагностированию тракторов с помощью автоматизированного машинотестера КИ-13950-ГОСНИТИ / А. В. Колчин [и др.]. – М. : ГОСНИТИ, 1990. – 137 с.

109. Руководство по техническому диагностированию при техническом обслуживании и ремонте тракторов и сельскохозяйственных машин / А. Э. Северный [и др.]. – М. : Росинформагротех, 2001. – 252 с.

110. Руцкий, О. В. Акустико-эмиссионный метод диагностирования судовых энергетических установок / О. В. Руцкий, С. Ф. Юрас. – Л. : 1985. – 48 с.

111. Сафонов, А. С. Моторные масла для автотракторных двигателей. Свойства. Классификация. Ассортиментные группы / А. С. Сафонов, А. И. Ушаков, В. А. Золотов. – СПб. : НПКИЦ, 2004. – 194 с.

112. Сергеев, А. Г. Точность и достоверность диагностики автомобиля / А. Г. Сергеев. – М. : Транспорт, 1980. – 192 с.

113. Серов, А. В. Техническая эксплуатация лесозаготовительного оборудования : учебник для вузов / А. В. Серов, В. В. Миляков, А. С. Назаренко. – М. : Лесная промышленность, 1987. – 272 с.

114. Сидоров, В. И. Техническая диагностика / В. И. Сидоров. – М. : МАДИ, 1993. – 124 с.

115. Синельников, А. Ф. Автомобильные масла. Краткий справочник / А. Ф. Синельников, В. И. Балабанов. – М. : За рулем, 2003. – 176 с.

116. Система технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин по результатам диагностирования / В. М. Михлин [и др.]. – М. : Информагротех, 1995. – 64 с.

117. Скибневский, К. Ю. Технология диагностирования колесных тракторов / К. Ю. Скибневский, А. В. Дунаев, Ю. Ю. Титов. – М. : ГОСНИТИ, 1976. – 196 с.

118. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний : справочник / Р. М. Матвеевский. – М. : Машиностроение, 1989. – 217 с.

119. Современная трибология. Итоги и перспективы / под ред. К. В. Фролова. – М. : ЛКИ, 2007. – 480 с.

120. Сокол, С. А. Формирование катализатором «Evo[®]lution» в зонах трения алмазоподобных углеродных пленок : матер. Междунар. конф. «Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектронике, материаловедении и мехатронике», г. Новочеркасск, 2011 / С. А. Сокол, А. В. Дунаев. – Новочеркасск : 2011. – С. 133–137.

121. Соловьев, Р. Ю. Экспресс-метод выбора рационального триботехнического состава для безыносной эксплуатации двигателей внутреннего сгорания : технологические рекомендации / Р. Ю. Соловьев, Д. А. Гительман, А. К. Ольховацкий . – М. : ГОСНИТИ, 2015. – 40 с.

122. Телух, Д. М. Введение в проблему использования природных слоистых гидросиликатов в трибосопряжениях / Д. М. Телух, В. П. Кузьмин, В. В. Усачев // Трение, износ, смазка. – 2009. – № 3. – С. 13–17.

123. Тененбаум, М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании / М. М. Тененбаум. – М. : Машиностроение, 1966. – 178 с.

124. Терских, И. П. Диагностика технического состояния тракторов : учеб. пособие / И. П. Терских. – Иркутск : ИСХИ, 1976. – 158 с.

125. Терских, И. П. Обзор методов и средств диагностирования цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания / И. П. Терских, В. А. Раков. – Иркутск : ИСХИ, 1986. – 96 с.

126. Техническая эксплуатация сельскохозяйственных машин / А. С. Гальперин [и др.]. – М. : ГОСНИТИ, 1993. – 327 с.

127. Технические средства диагностирования. Справочник / под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1989. – 636 с.

128. Технологическое руководство по диагностированию тракторов и самоходных сельскохозяйственных комбайнов / А. В. Колчин [и др.]. – М. : Росинформагротех, 2006. – 241 с.

129. Технологическое руководство по контролю и регулировке зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов с применением комплекта средств КИ-28120М-ГОСНИТИ / Российская академия сельскохозяйственных наук. – М. : Росинформагротех, 2005. – 170 с.

130. Технологическое руководство по проверке и регулировке агрегатов гидравлической и масляной системы автотракторной техники / [В. И. Черноиванов и др.]. – М. : Росинформагротех, 2009. – 94 с.

131. Технология диагностирования тракторов. Руководство по текущему ремонту / В. А. Четет [и др.]. – М. : ГОСНИТИ, 1973. – 413 с.

132. Технология и организация диагностирования тракторов с применением спектрального анализа масел. – М. : ГОСНИТИ, 1979. – 96 с.

133. Технология проверки и регулировки гидроприводов самоходных сельскохозяйственных машин с использованием мобильного комплекта средств КИ-28084М. – М. : Росинформагротех, 2009. – 170 с.

134. Тракторы сельскохозяйственные. Руководство по ресурсному диагностированию на СТОН и ремпредприятиях. – М. : ГОСНИТИ, 1985. – 88 с.

135. Тракторы сельскохозяйственные. Руководство по техническому обслуживанию. – М. : ГОСНИТИ, 1986. – 232 с.

136. Трение, износ, смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе [и др.] ; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.

137. Триботехнические характеристики газодинамических покрытий / А.В. Дунаев [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 8. – С. 17–19.

138. Улитовский, Б. А. Диагностирование сельскохозяйственной техники / Б. А. Улитовский. – М. : Агропромиздат, 1985. – 65 с.

139. Устройство для механо-химической обработки и снижения расхода углеводородного топлива / Ю. В. Воробьев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 1. – С. 21–22.

140. Федоренко, В. Ф. Повышение ресурсоэнергоэффективности АПК / В. Ф. Федоренко, В. И. Черноиванов, А. А. Ежевский. – М. : Росинформагротех, 2014. – 283 с.

141. Чанкин, В. В. Методы оценки состояния тепловозных двигателей без их разборки с применением экспрессного спектрального анализа масла : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.08.05 / Чанкин Владимир Васильевич. – М. : 1972. – 299 с.

142. Черноиванов, В. И. Мировые тенденции машинно-технологического обеспечения интеллектуального сельского хозяйства / В. И. Черноиванов, А. А. Ежевский, В. Ф. Федоренко. – М. : Росинформагротех, 2012. – 284 с.

143. Черноиванов, В. И. Система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве / В. И. Черноиванов, А. Э. Северный, Л. М. Пильщиков. – М. : ГОСНИТИ, 2001. – 168 с.

144. Четет, В. А. Безразборные технологии увеличения эксплуатационного ресурса автотранспортной техники / В. А. Четет, В. В. Ладиков, А. В. Дунаев. – М. : ВИССО, 2004. – 52 с.

145. Шабанов, А. Ю. Очерки современной автохимии. Мифы или реальность? / А. Ю. Шабанов. – СПб. : Иван Федоров, 2004. – 216 с.

146. Электроизмерительные устройства для диагностики машин и механизмов / Р. С. Ермолов [и др.]. – Л. : Энергия, 1979. – 128 с.

147. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК / А. В. Дунаев [и др.]. – М. : Росинформагротех, 2014. – 161 с.

148. Хмелевой, Н. М. Справочник мастера-наладчика / Н. М. Хмелевой. – М. : Россельхозиздат, 1980. – 271 с.

149. Шепельский, Ю. Л. Старение и вязкость моторного масла / Ю. Л. Шепельский // Двигателестроение. – 1985. – № 2. – С. 36–39.

150. Horiba [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.horiba.com>. – Дата обращения: 23.12.2019.

151. Mezservis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pentainvestments.com/en/investments/project/mezservis-5eLWa1.aspx>. – Дата доступа: 26.12.2019.

152. Tribology of Diamond-Like Carbon Films. Fundamentals and Applications / ed.: C. Donnet, A. Erdemir. – Springer, 2008. – 664 p.

153. Yuansheng, J. Superlubricity of in Situ Generated Protective Layer on Worn Metal Surfaces in Presence of Mg₆Si₄O₁₀(OH)₈ / J. Yuansheng, L. Shenghua ; ed.: A. Erdemir // Superlubricity. – Elsevier, 2007. – P. 445–469.

ДЛЯ ЗАПИСЕЙ

ДЛЯ ЗАПИСЕЙ

Научное издание

Миклуш Владимир Петрович,
Дунаев Анатолий Васильевич,
Тарасенко Виктор Евгеньевич и др.

УПРАВЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТЬЮ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
МЕТОДАМИ ДИАГНОСТИКИ И ТРИБОТЕХНИКИ

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*
Редактор *Д. А. Значёнок*
Компьютерная верстка *Д. А. Значёнок*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 27.12.2019. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 22,78. Уч.-изд. л. 17,81. Тираж 100 экз. Заказ 843.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.