

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»**

А. Н. Карташевич, В. Г. Костенич

СМАЗОЧНАЯ СИСТЕМА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

ЛЕКЦИЯ

Для студентов специальностей 1-74 06 01 – техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства, 1-74 06 03 – ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве, 1-74 06 04 – техническое обеспечение мелиоративных и водохозяйственных работ, 1-74 06 06 – материально-техническое обеспечение АПК

Горки 2007

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

А. Н. Карташевич, В. Г. Костенич

СМАЗОЧНАЯ СИСТЕМА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

ЛЕКЦИЯ

Для студентов специальностей 1-74 06 01 – техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства, 1-74 06 03 – ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве, 1-74 06 04 – техническое обеспечение мелиоративных и водохозяйственных работ, 1-74 06 06 – материально-техническое обеспечение АПК

Горки 2007

УДК 621.43-72 (075.8)
ББК 31.365-08*3.2)я7
К27

Одобрено методической комиссией факультета механизации сельского хозяйства 30.01.2007 (протокол № 4) и научно-методическим советом академии 31.01.2007 (протокол № 5).

СОДЕРЖАНИЕ

1. Краткий обзор развития средств очистки масла в ДВС	3
2. Системы смазки современных ДВС	10
3. Классификация способов и средств очистки моторного масла	11
4. Очистка масла в центрифугах	14
5. Очистка масла в фильтрах	15
6. Очистка масла при использовании КСОМ	17
7. Современные тенденции совершенствования агрегатов очистки масла и систем смазки ДВС	19
8. Влияние способа очистки и охлаждения масла на работу сопряжений двигателя	20
9. Износ при пуске и прогреве ДВС	23
10. Основы расчета элементов смазочной системы	25
Литература	34

Карташевич А. Н., Костенич В. Г.

К 27 Смазочная система двигателей внутреннего сгорания: Лекция.
– Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2007. 36 с.

Приведен краткий обзор развития средств очистки масла в ДВС, систем смазки современных двигателей, классификация способов и средств очистки моторного масла и тенденции совершенствования агрегатов и систем смазки, описано влияние способа очистки и охлаждения масла на работу сопряжений двигателя, износ при пуске и прогреве ДВС, приведены основы расчета элементов смазочной системы.

Для студентов специальностей 1-74 06 01 – техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства, 1-74 06 03 – ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве, 1-74 06 04 – техническое обеспечение мелиоративных и водохозяйственных работ, 1-74 06 06 – материально-техническое обеспечение АПК.

Таблиц 2. Рис. 8. Библиогр. 46.

Рецензенты: Г. М. КУХАРЕНОК, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» УО «Белорусский национальный технический университет», доктор техн. наук, профессор; А. К. ТРУБИЛОВ, заведующий кафедрой «Техническое обслуживание и ремонт машин» УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», канд. техн. наук, доцент.

УДК 621.43-72 (075.8)
ББК 31.365-08*3.2)я7

© А. Н. Карташевич, В. Г. Костенич, 2007
© Учреждение образования
«Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия», 2007

1. КРАТКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ОЧИСТКИ МАСЛА В ДВС

Массовое применение двигателей внутреннего сгорания на автомобилях началось во второй половине XIX века в Европе и Америке, а в 1901 г. в США впервые стали использовать ДВС в качестве силовой установки и на тракторах. Однако в первых конструкциях двигателей мобильных машин очистка масла не предусматривалась, поэтому срок службы моторного масла до его замены составлял всего 30...60 часов работы трактора или 500...2000 миль пробега автомобиля [1]. Такие двигатели имели примитивные системы смазки, в которых смазка трущихся деталей осуществлялась как разбрызгиванием масла КВ, так и через специальные масленки, периодически заправляемые маслом.

На первых советских тракторах серийного производства «Фордзон-Путиловец», выпуск которых был начат в 1924 г. в Ленинграде на заводе «Красный путиловец», средства очистки масла также не использовались [2]. Однако уже в двигателях тракторов «Универсал», выпускаемых с 1934 г. на Кировском заводе, даже при отсутствии смазки под давлением предпринимались первые попытки очистки масла при помощи фильтров с войлочными фильтрующими элементами [3, 4]. Когда в двигателях начали применять смазку под давлением сначала подшипников коленчатого вала (тракторы Катерпиллар-60 [5], Сталинец-60 [6]), а затем осей коромысел (трактор Сталинец-65) распределительного вала (тракторы КД-35, КДП-35 [7]) и других деталей, появилась необходимость и в очистке масла для защиты деталей двигателя от повышенного износа. Поэтому в конструкцию двигателя была введена очистка моторного масла, сначала фильтрами грубой очистки (ФГО), а затем и фильтрами тонкой очистки (ФТО) масла.

Первые масляные фильтры были примитивны и изготовлялись из стальной стружки или проволочных сеток, установленных на входе в масляный насос. В дальнейшем ФГО начали выполнять в виде намотанной на каркас проволоки (проволочно-щелевые фильтры) или ленты специального профиля (ленточно-щелевые фильтры), или же в виде набора чередующихся пластин различной формы (пластинчато-щелевые фильтры). Такие фильтры были многократного использования и требовали периодической очистки и промывки, обычно в керосине.

Фильтрация масла в проволочно-щелевых и ленточно-щелевых фильтрах осуществлялась при прохождении его через зазоры между витками проволоки или ленты специального профиля, намотанной на каркас (рис. 1, 2).

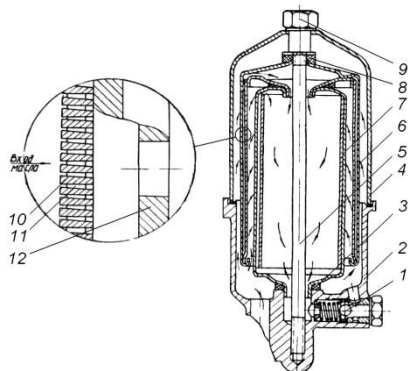


Рис. 1. Ленточно-щелевой фильтр: 1 – перепускной клапан; 2 – корпус; 3, 8 – уплотнительные прокладки; 4 – колпак; 5 – стяжной болт; 6 – наружная секция ФЭ; 7 – внутренняя секция ФЭ; 9 – гайка; 10 – фильтрующая лента; 11 – выступ ленты; 12 – каркас фильтрующего элемента.

На отечественных автотракторных двигателях применялись ФГО с ФЭ двух типов – ленточно-щелевые (двигатели тракторов КД-35 и КДП-35, ДТ-54, С-60, С-65, «Беларусь», автомобилей МАЗ-200, МАЗ-205 [8]) и пластинчато-щелевые (двигатели автомобилей ГАЗ-51, ЗИС-110, ЗИС-150, ЗИС-151), общее устройство которых представлено на рис. 2.

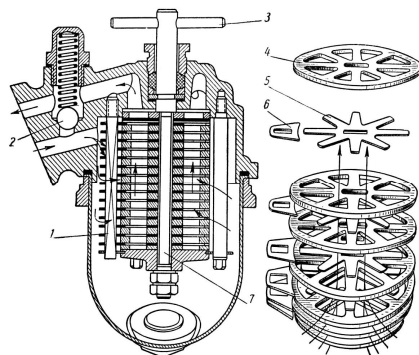


Рис. 2. Пластинчато-щелевой фильтр: 1 – квадратный стержень; 2 – перепускной клапан; 3 – рукоятка; 4 – фильтрующая пластина; 5 – промежуточная пластина; 6 – скребок; 7 – центральный стержень.

Основным преимуществом пластинчато-щелевых ФЭ являлась простота очистки их от загрязнений, которая осуществлялась поворотом рукоятки фильтра. На некоторых автомобилях применялась система автоматической очистки ФЭ при помощи храпового механизма, установленного на центральном стержне и соединенного с педалью стартера или сцепления [9]. При каждом запуске двигателя или нажатии на педаль сцепления ФЭ проворачивался на некоторый угол и очищался от загрязнений. Существенным недостатком таких элемен-

тов являлось попадание части загрязнений в масляную магистраль при очистке ФЭ на работающем двигателе.

Кроме того, общим недостатком всех ФГО являлись их низкие фильтрующие качества, определяемые большой величиной фильтрующих щелей, действительная ширина которых составляла около 100 мкм для ленточно-щелевых и проволочно-щелевых и 120...300 мкм для пластинчато-щелевых ФЭ [10].

Поэтому в дальнейшем в системы смазки автотракторных двигателей вводят ФТО с картонными фильтрующими элементами АСФО (автотракторный суперфильтр-отстойник), ДАСФО, ДАСФО-ЭФА, ЭФ-КП, которые включаются в систему смазки на ответвлении (тракторы ХТЗ-7, «Беларусь» МТЗ-1 и МТЗ-2, АСХТЗ-НАТИ, КД-35, КДП-35 [11–13]).

ФЭ АСФО имели тонкость отсева 5...10 мкм [10, 13] и очищали от 3...6 (ХТЗ-7, АСХТЗ-НАТИ) до 10...15 % («Беларусь» МТЗ-1 и МТЗ-2, КД-35, КДП-35) масла, подаваемого масляным насосом, которое затем сливалось в поддон картера. Устройство фильтра тонкой очистки масла с ФЭ АСФО представлено на рис. 3.

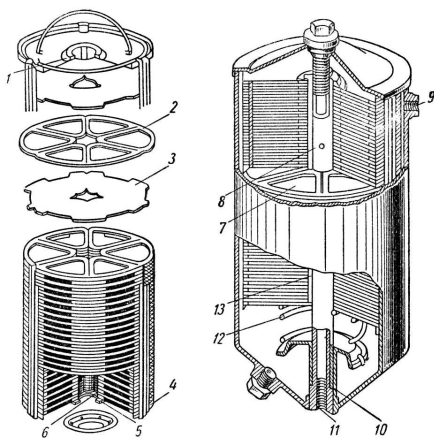


Рис. 3. Фильтр тонкой очистки с ФЭ АСФО: 1 – уплотняющая накладка; 2, 3 – фильтрующие прокладки; 4 – днище фильтра, 5 – кольцо; 6 – перепускное отверстие; 7 – грязевой отсек; 8 – дроссельное отверстие; 9 – штуцер подвода масла; 10 – центральная труба; 11 – штуцер отвода масла; 12 – пружина; 13 – полость для очищенного масла.

Исследованиями [10] установлено, что ФТО задерживают в 4...5 раз больше загрязнений, чем ФГО, поэтому применение в системе смазки ФТО позволило увеличить сроки замены масла в двигателе с 30...60 до 80...100 часов работы.

Серьезной проблемой для советского двигателестроения стал повышенный износ шатунных шеек коленчатого вала (КВ), которые в эксплуатации изнашивались вдвое быстрее, чем коренные [10, 14]. Высокая интенсивность изнашивания шатунных шеек объяснялась

тем, что они смазывались маслом, прошедшим через коренные подшипники КВ и, следовательно, более загрязненным продуктами износа. Для снижения износа шатунных шеек была введена дополнительная центробежная очистка масла в специально выполненных сверлениях (полостях) в шатунных шейках.

Способ центробежной очистки масла в полостях шатунных шеек КВ был известен давно и широко применялся в авиационных двигателях [10]. Однако вследствие малого срока службы авиационных двигателей, низкой запыленности воздуха и использования для их смазки высокосортных масел эффективность центробежной очистки была незначительной. Поэтому выполнение сверлений в шатунных шейках КВ авиационных двигателей вызывалось лишь необходимостью облегчения их конструкции.

Совершенно другая картина наблюдалась в тракторных двигателях. При введении в 1954 г. Харьковским тракторным заводом (ХТЗ) дополнительной центробежной очистки масла в полостях шатунных шеек КВ двигателя Д-54 трактора ДТ-54, износ шатунных шеек, снизился в 2,75 раза [14], шатунных вкладышей – в 3 раза, что позволило вдвое увеличить срок службы КВ до его перешлифовки. В дальнейшем центробежная очистка ММ в полостях шатунных шеек была внедрена практически на всех автомобильных и тракторных заводах СССР.

Важной задачей также являлось и снижение эксплуатационных затрат, поскольку расход сменных ФЭ АСФО-1 на трактор составлял 18...20 штук в год [15]. Поэтому на ХТЗ была разработана реактивная масляная центрифуга (РМЦ), не имеющая сменных элементов.

Ранее предпринимались попытки применения для очистки масла в ДВС центрифуги с механическим приводом, существенным недостатком которой является зависимость частоты вращения ротора от частоты вращения КВ двигателя. Этому недостатку практически лишены центрифуги с реактивным приводом, в которых частота вращения ротора зависит только от давления и вязкости масла в роторе центрифуги. Существенным преимуществом центрифуг перед фильтрами является их избирательная способность по отношению к удаляемым загрязнениям. Наиболее эффективно центрифугами задерживаются загрязнения, имеющие высокую плотность (продукты износа, атмосферная пыль) и наиболее опасные с точки зрения износа деталей ДВС.

Впервые РМЦ для очистки масла в автотракторных двигателях была выпущена английской фирмой «Glacier». В СССР первые РМЦ были испытаны в 1954 г. на ХТЗ и внедрены в производство на тракторах ДТ-54 в 1955 г. Первые центрифуги ХТЗ, представленные на рис. 4, включались на ответвлении масляной магистрали перед дросселем 3, применение которого позволяло повысить давление масла в роторе центрифуги и, как следствие, эффективность его очистки.

Применение РМЦ вместо ФЭ АСФО в сочетании с центробежной

очисткой масла в полостях шатунных шеек снизило износы шатунных шеек в 4,4 раза, шатунных вкладышей – в 6,5 раза и коренных шеек и вкладышей – в 1,8 раза [15]. Кроме значительного снижения износов деталей ДВС включение в систему смазки РМЦ вместо ФЭ АСФО также позволило в 2...3 раза увеличить срок службы масла и довести его до 240...250 часов (тракторы ДТ-14, ДТ-20, ДТ-54А, ДТ-55А [16-18]).

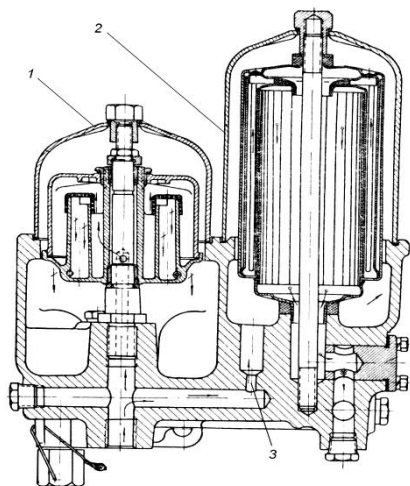


Рис. 4. Агрегаты очистки масла двигателя Д-54: 1 – реактивная масляная центрифуга; 2 – ленточно-щелевой фильтр грубой очистки масла; 3 – дроссель.

Несмотря на значительный эффект от применения центрифуг на тракторных двигателях они, как и ФТО с ФЭ АСФО, на всех отечественных и большинстве зарубежных тракторов включались на отвлечении. При такой схеме включения наиболее ценное с точки зрения уменьшения износов масло поступало не к трущимся деталям двигателя, а сливалось в поддон картера. Поэтому на некоторых зарубежных тракторах («Fordson-Major», «Bristol» [10]) была применена схема включения маслоочистителя в полном потоке («full flow filter»), при которой очищенное в ФТО масло (3...5 % от всего масла, подаваемого насосом) поступает в масляную магистраль, где смешивается с основным потоком масла, прошедшего через ФГО. Такая схема включения ФТО снижает износ двигателя на 10...15 % [19], однако она еще не может быть названа полнопоточной, поскольку тонкой очистке подвергается лишь незначительная часть масла.

Поэтому следующим этапом развития систем смазки ДВС является полнопоточная тонкая очистка всего масла, поступающего в ГММ двигателя, которая в отечественном двигателестроении, по-видимому,

впервые была реализована на тракторе ДТ-14 [17], а в дальнейшем нашла широкое применение в двигателях тракторов («Беларусь» МТЗ-50 и МТЗ-80, Т-25, Т-28, Т-38, Т-40, ДТ-75(М), Т-150(К), ЮМЗ-6Л/М, Т-4А, К-701 «Кировец» и др.) и автомобилях (ЗИЛ, КамАЗ, БелАЗ-540А, -548А, ГАЗ-24, ВАЗ, УАЗ и др.).

Кроме РМЦ в двигателях тракторов и автомобилей находят широкое применение также и ФТО неразборной конструкции (двигатели автомобилями ВАЗ, УАЗ, тракторов «Беларусь» 310/320) или со сменными ФЭ, выполненными из бумаги (двигатели автомобилей «Москвич», КамАЗ-5320, -5410, тракторов «Беларусь»-1221, -1522, К-701), картона или древесной муки (ранее выпускавшиеся двигатели автомобилей БелАЗ-540А, -548А [9]).

Прототип современного масляного фильтра создан в 1923 г. американцем Эрнестом Свитлэндом, который назвал свое изобретение «Purolator», используя сокращенную комбинацию слов «Pure Oil Later» [1]. Первый фильтр «Purolator» состоял из перфорированных пластин, покрытых тканью и помещенных в герметичный литой корпус. Корпус фильтра имел смотровое окно, позволявшее водителю визуально контролировать подачу масла и судить о необходимости замены фильтра. Вскоре в Нью-Йорке была создана компания «Motor Improvements Inc.», предназначенная для производства фильтров «Purolator».

В 1924 г. компания «Maxwell Chalmers Company» установила фильтр «Purolator» на свой автомобиль «Maxwell» и провела его испытания в пробеге по маршруту от Детройта до Западного Побережья и обратно. Увеличенный срок службы масла и значительное снижение износа двигателя обеспечили фильтрам «Purolator» признание и поддержку со стороны производителей автомобилей и вскоре они стали широко применяться на многих американских автомобилях, включая такие известные марки, как «Studebaker», «Cadillac», «Buick», «Dodge» и др. [1].

Первые масляные фильтры были недостаточно эффективны, поэтому технологии их производства постоянно совершенствовались. В конце 1930-х годов для изготовления фильтров начали использовать отходы хлопка и появились первые фильтры со сменными ФЭ. В 1946 г. для снижения издержек производства хлопок заменили гофрированной бумагой и целлюлозой – материалами, применяющимися и в современных масляных фильтрах.

До 1943 г. большинство масляных фильтров были частичнопоточными и очищали только около 10 % масла, подаваемого масляным насосом. Первый полнопоточный фильтр, очищающий все масло, поступающее от масляного насоса, был применен в 1943 г., а к 1946 г. он уже стал стандартным на транспортных средствах массового производства в Европе и США.

В СССР полнопоточные масляные фильтры в ДВС начали приме-

няться несколько позже, однако их применение в 1,5...5 раз снизило износ основных деталей двигателей и в 5...10 раз износ коренных шеек КВ [20].

В 1955 г. на смену фильтрам «патронного типа» (cartridge-type filters) со сменными ФЭ пришли более удобные быстросменные одноразовые фильтры (spin-on filters), которые к концу 1960-х стали использоваться практически на всех американских и на большинстве европейских и японских марок автомобилей. Такие фильтры нашли применение и на отечественных автомобилях и тракторах. На рис. 5 представлен общий вид быстросменного комбинированного масляного фильтра автомобилей ВАЗ.

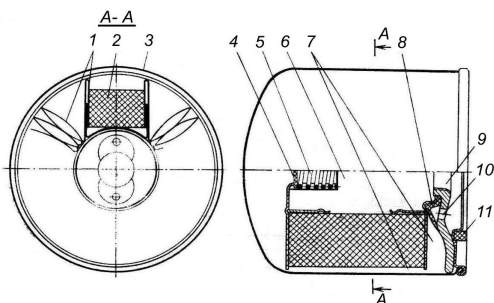


Рис. 5. Комбинированный масляный фильтр автомобиля ВАЗ: 1, 2 – основной и дополнительный фильтрующие элементы; 3 – корпус фильтра; 4 – перепускной клапан; 5 – пружина; 6, 7 – центральная и наружная кольцевые полости; 8 – противодренажный клапан; 9 – резьбовое отверстие; 10 – впускные отверстия; 11 – уплотнительное кольцо.

Однако, несмотря на известные преимущества быстросменных фильтров, их производители столкнулись также и с рядом проблем. Так в последние годы законодательством ряда штатов США и других стран использованные масляные фильтры отнесены к опасным отходам, требующим специальной переработки и утилизации. В США ежегодно продается около 420 миллионов масляных фильтров [21], утилизация которых позволила бы получить дополнительно около 160 тыс. тонн стали и 17,8 млн. галлонов (67,3 млн. литров) масла. Однако переработке подвергаются не более 25 % использованных фильтров, остальные просто выбрасываются и становятся источниками загрязнения окружающей среды.

Поэтому в последнее время наблюдается тенденция перехода от неразборных быстросменных фильтров обратно к фильтрам «патронного типа» со сменными ФЭ [2]. Устройство простейшего сменного фильтрующего элемента представлено на рис. 6.

На перфорированной стальной трубке 1 закреплены верхняя 2 и нижняя 5 крышки, между которыми в виде многолучевой звезды уложена лента 3 из фильтровальной бумаги, края которой приклеены к крышкам. Наружный перфорированный картонный цилиндр-обечайка

предохраняет фильтрующую ленту от повреждений при хранении, транспортировке и установке ФЭ.

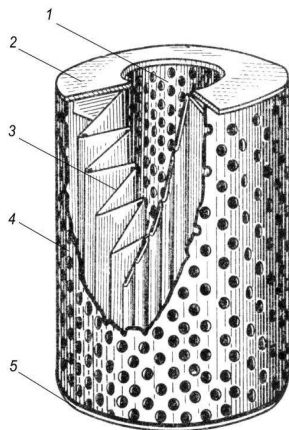


Рис. 6. Сменный фильтрующий элемент масляного фильтра: 1 – перфорированная трубка; 2, 5 – верхняя и нижняя крышки; 3 – фильтрующая лента; 4 – перфорированный картонный цилиндр-обечайка.

2. СИСТЕМЫ СМАЗКИ СОВРЕМЕННЫХ ДВС

В современных автотракторных двигателях применяются комбинированные системы смазки, в которых смазка большинства наиболее нагруженных и ответственных узлов, таких как подшипники коленчатого и распределительного валов, детали клапанного механизма, подшипники турбокомпрессора, осуществляется под давлением. Остальные детали (шестерни привода распределительного вала, топливного насоса, гильзы цилиндров, поршни и др.) смазываются разбрызгиванием за счет образующегося в картере двигателя масляного тумана. В высокофорсированных двигателях предусматривается также подача масла под давлением к поршневому пальцу, а для снижения температуры верхней части поршня применяют его струйное (дизели Д-260.1, -260.2 [22], BF6M 1013E Deutz (Германия) [23]) или полостное (дизели ЯМЗ-8401, -8423 [24]) охлаждение маслом.

Практически все автотракторные ДВС, выпускаемые в Республике Беларусь и странах СНГ, имеют систему смазки с мокрым картером, в которой масло, используемое для смазки деталей двигателя, находится в поддоне картера. Кроме того, система смазки включает одно- или многосекционный масляный насос и различные вспомогательные устройства, предназначенные для поддержания давления (перепускные, предохранительные, обратные клапаны, клапаны-термостаты) и ТО ДВС (сливная пробка, масломерный щуп, маслозаливная горловина и др.), а также различные измерительные приборы и датчики.

Неотъемлемой частью современных ДВС являются устройства для принудительного охлаждения масла, включенные непосредственно в ГММ, в качестве которых применяются воздушно-масляные или все более широко используемые (дизели Д-260 [22], ЯМЗ-840 [24], ЯМЗ-534, -536 [25]) жидкостно-масляные теплообменники. Преимущество жидкостно-масляных теплообменников заключается в быстром прогреве масла после запуска двигателя и поддержании его оптимальной температуры без применения каких-либо специальных регулирующих устройств. Для уменьшения трудоемкости ТО, а также для предупреждения загрязнения ММ при доливе на некоторых дизелях (например, фирм Detroit Diesel, Cummins, Caterpillar [20]) применяют системы автоматического поддержания уровня масла в картере, позволяющие снизить необходимое количество масла в системе смазки и его загрязненность, в результате увеличивается срок службы масла до замены и уменьшается интенсивность износа деталей.

Для снижения износа деталей и увеличения срока службы двигателя и масла подавляющее большинство современных ДВС имеет полнопоточную или комбинированную систему очистки масла, в качестве агрегатов очистки масла в которой используются полно- и частично-поточные фильтры и центрифуги.

Кроме фильтров и центрифуг для очистки ММ в ДВС находят применение и другие устройства. Так, например, для очистки ММ от продуктов износа деталей из ферромагнитных материалов в некоторых двигателях используют различной конструкции магнитные фильтры и улавливатели, позволяющие практически полностью удалять из масла частицы железа [26, 27]. При установке магнита в системе смазки двигателя и в сливной пробке поддона картера износ деталей снижается на 15...20 % по сравнению со стандартной схемой очистки. Применяются магнитные пробки и в системах смазки тракторов Т-40М/АМ, автобусов «Икарус», автомобилей «Шкода» [9] и др.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ОЧИСТКИ МОТОРНОГО МАСЛА

Существующие способы очистки масла подразделяются на две основные группы. К первой группе относят способы, основанные на прохождении очищаемой жидкости через пористые среды, ко второй – способы, использующие для очистки действие различных силовых полей. В зависимости от способа очистки средства (агрегаты) очистки также подразделяются на две группы: различные фильтры (сетчатые, шелковые, бумажные, картонные, тканевые, войлочные, металлокерамические, волокнистые и др.) и силовые очистители, очистка жидкости в которых происходит под действием гравитационного, центробежного, магнитного, электрического и ультразвукового полей.

По организации отверстий (пор) различают фильтры, имеющие примерно одинаковые размеры пор (сетчатые, щелевые), и фильтры с порами различных размеров (бумажные, картонные, тканевые, войлочные и др.).

По преобладающему способу задержания механических примесей фильтры подразделяют на поверхностные, имеющие небольшую толщину (чаще всего не более 1 мм) и развитую поверхность входа жидкости, задерживающие загрязнения преимущественно на поверхности ФЭ, и объемные толщиной до 25...30 мм, обладающие небольшой поверхностью входа и удерживающие загрязнения в основном в толще фильтровального материала. Поверхностные фильтры изготавливаются из бумаги, тонкого картона, сеток, тканей, разновидностью поверхностных фильтров являются также щелевые фильтры. В качестве фильтрующего материала для объемных фильтров используются толстый картон, войлок, древесная мука и опилки, хлопчатобумажная пряжа, целлюлозная масса, минеральная вата, металлокерамика, пористые порошковые материалы [20, 28] и др. По сравнению с поверхностными объемные фильтры имеют значительно более высокое гидравлическое сопротивление и поэтому применяются преимущественно в качестве дополнительных частичнопоточных.

В зависимости от необходимости замены при эксплуатации ФЭ фильтры подразделяются на сменяемые и несменяемые. К сменяемым фильтрам относятся бумажные, картонные и большинство объемных, т.е. те фильтры, восстановление фильтрующих характеристик которых после их загрязнения невозможно или экономически нецелесообразно. Несменяемыми в эксплуатации являются сетчатые, проволочно-щелевые, ленточно-щелевые, пластинчато-щелевые фильтры, а также центрифуги и другие силовые очистители, работоспособность которых полностью восстанавливается после их очистки и промывки.

В зависимости от природы действующего поля выделяет следующие типы силовых очистителей [20]:

1. Отстойники, в которых очистка жидкости от твердых частиц загрязнений осуществляется под действием сил гравитационного поля, т.е. отстаиванием. Несмотря на крайне низкую эффективность данного способа, очистка ММ отстаиванием от крупных неорганических частиц загрязнений и шламов все-таки в какой-то степени осуществляется в картере ДВС, о чем свидетельствует образующийся в поддоне картера осадок.

2. Гидроциклоны, очистка жидкости в которых происходит под действием центробежных сил, возникающих при закручивании ее потока. Для очистки масла в автотракторных ДВС гидроциклоны применяются крайне редко (например, в дизелях Skania Vabis DS-14 [20]) вследствие их низкой эффективности, однако находят применение в некоторых типах судовых дизелей.

3. Центробежные очистители (центрифуги), в которых очистка жидкости от твердых частиц загрязнений и воды осуществляется под действием центробежного поля. Известны различные конструкции центрифуг, имеющие гидравлический, механический, электрический, пневматический или газовый (от отработавших газов) приводы. Однако наиболее широкое распространение получили центрифуги с гидравлическим приводом, который может быть как внешним реактивным, так и внутренним активно-реактивным.

4. Магнитные очистители, используются в основном для очистки ММ от ферромагнитных загрязнений (металлическая стружка, продукты износа деталей) и применяются как в качестве основных, так и дополнительных очистителей в КСОМ.

5. Электростатические очистители, в которых очистка жидкости происходит под действием электростатического поля. При движении твердых частиц загрязнений в ММ, которое является диэлектриком, на их поверхности возникает двойной электрический слой Квинке-Гельмгольца-Гуи [29], обуславливающий появление на частицах электрического заряда. Заряженные частицы притягиваются к противоположно заряженным электродам электростатического фильтра, к одному из которых подводится постоянный потенциал, а другой заземлен, и оседают на них.

6. Ультразвуковые очистители, очистка ММ в которых происходит за счет коагуляции частиц загрязнений в ультразвуковом поле в крупные агломераты и последующего выпадения их в осадок. Применение ультразвуковых очистителей в ДВС ограничено их эффективностью только при малых скоростях движения очищаемой жидкости, меньших скорости осаждения частиц.

7. Комбинированные очистители, в которых очистка ММ осуществляется совместным применением фильтров и силовых очистителей. Известны конструкции пористых фильтров с установленными в них постоянными магнитами, совместное использование фильтров и центрифуг (фильтрующие центрифуги), применение в центрифугах дополнительных сетчатых фильтров и др.

Эффективность применяемых для очистки ММ очистителей характеризуют следующие основные параметры [20]:

- пропускная способность определяется расходом масла через очиститель при заданном перепаде давления;
- гидравлическое сопротивление характеризуется перепадом давления при определенном расходе масла;
- полнота (коэффициент) отсева – доля загрязняющих примесей, задерживаемых очистителем из проходящего через него масла;
- коэффициент пропуска – доля загрязняющих примесей, остающихся в очищаемом масле после прохождения его через очиститель;
- тонкость отсева определяется размером частиц загрязнений, за-

держиваемых очистителем из проходящего через него масла;

– грязеемкость определяется достижением предельно допустимого гидравлического сопротивления или предельным снижением работоспособности.

Основным параметром очистителя, характеризующим надежность защиты пар трения ДВС от абразивного износа, является его тонкость отсева. Тонкостью отсева δ определяются размеры и количество частиц загрязнений, пропущенных очистителем к парам трения ДВС, а также гидравлическое сопротивление полнопоточного фильтра и срок службы до замены ФЭ и масла.

Различают тонкость отсева абсолютную δ_1 , определяемую минимальным размером частиц загрязнений, которые полностью задерживаются очистителем, номинальную $\delta_{0,95}$, определяемую минимальным размером частиц, для которых коэффициент отсева равен 95 %, и среднюю δ_0 , характеризуемую размером частиц с коэффициентом отсева 50 %.

4. ОЧИСТКА МАСЛА В ЦЕНТРИФУГАХ

Центробежные маслоочистители или центрифуги находят широкое применение для очистки ММ как в отечественных автотракторных ДВС, так и в двигателях, выпускаемых в странах СНГ и дальнего зарубежья. Широкое распространение центрифуг обусловлено рядом качеств, существенно отличающих их от фильтров. Для тракторных и комбайновых дизелей разработан типоразмерный ряд центрифуг с объемом ротора от 560 до 3060 см³ и расходом масла от 10 до 120 л/мин [30]. Центрифуги, применяемые для очистки масла в ДВС, по характеру реализуемого в них процесса очистки масла относятся к осветляющим центрифугам непрерывного действия, для которых характерна высокая степень дисперсности частиц загрязнений и низкая их концентрация в суспензии. Как было отмечено выше, основная масса загрязняющих примесей, находящихся в ММ, имеет размеры частиц порядка 1...2 мкм, а их концентрация в масле не превышает 2...3 %.

Существенное снижение износов при использовании полнопоточных центрифуг обусловлено рядом их преимуществ перед их предшественниками – полнопоточными щелевыми и сетчатыми фильтрами. Основным достоинством центрифуг является их избирательная способность по отношению к загрязняющим примесям, позволяющая им в первую очередь задерживать наиболее опасные с точки зрения износа деталей ДВС крупные абразивные частицы, а также эффективно удалять из масла частицы размером до 1 мкм и менее, практически не удаляемые полнопоточными фильтрами. Следует также отметить их высокую работоспособность при снижении диспергирующих свойств ММ и его обводнении, способность эффективно удалять из него воду,

отсутствие сменных ФЭ, надежность и долговечность в эксплуатации, простоту в обслуживании и др. Однако, несмотря на вышеприведенные достоинства центрифуг, они имеют также и ряд существенных недостатков, к которым относятся сложность конструкции (особенно полнопоточных), значительная масса и требуемая высокая точность изготовления, более высокая трудоемкость ТО. При использовании центрифуг по сравнению с полнопоточными фильтрами требуются повышенные затраты мощности на гидравлический привод ротора, поскольку для их эффективной работы давление на входе в центрифугу должно составлять не менее 0,5...0,8 МПа. Применение полнопоточных центрифуг с внешним гидравлическим приводом требует также увеличения производительности масляного насоса, так как расход масла на гидравлический привод ротора достигает 30...40 % от всего количества масла, подаваемого масляным насосом. Недостатком реактивных центрифуг является также повышенное пенообразование и аэрация масла, оказывающие негативное влияние как на условия смазки трущихся деталей ДВС, так и на состояние самого масла. В некоторой степени вопрос снижения затрат мощности на привод центрифуги, уменьшения необходимой подачи ММ и снижения его аэрации был решен с разработкой и внедрением на ММЗ центрифуг с внутренним активно-реактивным гидравлическим приводом ротора, успешно применяющихся на двигателях тракторов МТЗ.

Основным недостатком, обуславливающим максимальный износ деталей ДВС, является практически нулевая эффективность центрифуг на режиме пуска и прогрева холодного двигателя, что подтверждается результатами исследований [30, 31]. При температуре 0°С ротор центрифуги начинает вращаться только через 1 мин после пуска двигателя, при температуре -9°С время запаздывания составляет 2 мин, а при температуре -17°С, соответственно, 3 мин. За это время в ГММ поступает до 20 % неочищенного масла из поддона картера двигателя. Но это только время до начала вращения ротора центрифуги. Далее только через 6 мин ротор достигает частоты вращения 1000 мин⁻¹, через 10 мин – 3000 мин⁻¹, а номинальная частота вращения 5000 мин⁻¹ достигается ротором только через 20 мин. Очевидно, что за это время весь объем ММ, находящийся в поддоне картера ДВС, многократно прокачивается через ГММ неочищенным и при этом не может быть и речи о 100 %-ной защите пар трения ДВС от опасных абразивных частиц. Даже при температуре пуска +17°С ротор достигает номинальной частоты вращения только через 13 мин.

5. ОЧИСТКА МАСЛА В ФИЛЬТРАХ

Очистка ММ в автотракторных ДВС при помощи фильтров получила широкое распространение как в зарубежных автотракторных дви-

гателях, так и в выпускаемых в странах СНГ.

Введение во второй половине XX века в отечественных автомобильных ДВС ППФТОМ, также как и центрифуг в тракторных двигателях, позволило значительно снизить их износ. Например, применение бумажного ППФТОМ в двигателях ЗМЗ-24-01 вместо полнопоточного пластинчато-щелевого фильтра грубой очистки и частичнопоточного фильтра ДАСФО, используемых в предыдущей модели ЗМЗ-21А, позволило уменьшить износ основных деталей двигателя в 1,5...5 раз, в том числе износ коренных шеек КВ двигателя снизился в 5...10 раз [20]. Однако, несмотря на полученный значительный эффект от их применения, фильтры также обладают и рядом недостатков, существенно снижающих надежность и долговечность ДВС в эксплуатации.

Известны противоречивые требования, предъявляемые к полнопоточным масляным фильтрам, в соответствии с которыми фильтры должны обеспечивать высокую эффективность очистки масла и одновременно иметь малое гидравлическое сопротивление и максимально большой срок службы до замены ФЭ при ограниченных размерах фильтров. В настоящее время существует большое количество фильтровальных материалов, способных удалять из ММ частицы загрязнений размерами до 1 мкм и менее. Однако при повышении тонкости отсева ППФТОМ увеличивается их гидравлическое сопротивление и снижается срок службы до замены ФЭ. Увеличение гидравлического сопротивления вызывает открытие перепускного клапана фильтра, особенно на режимах пуска и прогрева ДВС, или разрыв фильтрующей перегородки и поступление к деталям двигателя неочищенного масла, что в 10 раз и более увеличивает абразивный износ деталей двигателя.

Поэтому конструкторы вынуждены находить компромиссные решения между тонкостью отсева, сроком службы ФЭ и его размерами, чаще всего в ущерб качеству очистки ММ. Характеристики некоторых марок фильтровальных бумаг и картонов, применяемых для очистки ММ в ДВС, приведены в табл. 1.

В настоящее время для полнопоточных фильтров оптимальной считается номинальная тонкость отсева 30...50 мкм, которой обладают приведенные в табл. 1 марки картонов ДРКБ и МФ-16.

Фильтры с номинальной тонкостью отсева 30...50 мкм не обеспечивают 100 %-ной защиты пар трения двигателя от наиболее опасных частиц загрязнений. Применение же в масляных фильтрах фильтровальных материалов с более высокой тонкостью отсева, например, бумаги БФМ (табл. 1) с целью повышения качества очистки масла приводит к быстрому загрязнению ФЭ и поступлению неочищенного масла к парам трения двигателя через перепускной клапан фильтра, т.е. дает отрицательный эффект.

Также известно, что полнопоточный фильтр с бумажным ФЭ в начальный период работы обладает низкой эффективностью очистки

ММ и задерживает только около 1 % загрязняющих примесей [20], причем их концентрация в масле в этот период значительно повышается. Затем, по мере загрязнения ФЭ сравнительно крупными частицами и образования на его поверхности первичного слоя отложений коэффициент отсева повышается, и фильтр начинает задерживать и более мелкие частицы загрязнений. Такое явление называют эффектом автофильтрации, при котором качество очистки ММ определяется уже не размерами пор фильтрующего материала, а свойствами образующегося на поверхности ФЭ слоя отложений, обеспечивающего как повышение тонкости отсева, так и возрастание гидравлического сопротивления ФЭ.

Т а б л и ц а 1. Характеристики фильтровальных бумаг и картонов (применяемых для очистки ММ)

Марка материала	Масса 1 м ² , г	Толщина, мм	Разрывной груз, кгс, в направлении		Герметичность, мм вод. ст.	Тонкость фильтрации, мкм		Удельная пропускная способность, мл/см ² ·мин v = 30 сСт, P = 0,1 кгс/см ²
			продольном	поперечном		АТФ	НТФ	
ДРКБ	131	0,68	8,13	6,25	80	42,2	35,1	166,7
БФМ-К	115	0,35	2,7	2,57	130	23,2	18,4	35,2
БФМ-П	200	0,75	3,4	—	—	25	—	—
КФМ	196	0,87	4,88	3,33	120	25,5	20,5	36,7
МФ-16	197	1,08	6,94	4,70	80	42,2	35,1	120,6
БМ-120	—	—	—	—	—	40...55		—

6. ОЧИСТКА МАСЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КСОМ

Вышеперечисленные недостатки маслоочистителей в значительной степени компенсируются применением КСОМ, которая в последнее время все более широко применяется в отечественных и зарубежных автотракторных двигателях. В КСОМ могут использоваться маслоочистители разных типов (фильтры и центрифуги) или однотипные, один из которых включен в систему смазки последовательно, а другой – параллельно.

Одна из схем КСОМ, состоящая из полнопоточного фильтра с бумажными ФЭ и частичнопоточной центрифуги, применена в двигателях ЯМЗ-840Б тракторов К-701 [2], Д-260.1, Д-260.2 тракторов «Беларус», ЯМЗ-240Н автомобилями БелАЗ-548 [32], в двигателях автомобилей КамАЗ-5320, -5410. В такой системе реализованы основные достоинства очистки ММ фильтрованием и центрифугированием. Анало-

гичные схемы используются и на зарубежных дизелях фирмами Isudzu (Япония), MAN, Henschel (ФРГ), Leyland (Англия), Cummins, Mack (США) и др.

Комбинированные системы тонкой очистки масла, состоящие из полнопоточного и частичнопоточного фильтров тонкой очистки, используются на зарубежных дизелях Detroit Diesel 8V-71TS, Cummins NTS 350 S, Mack (США), Hino H-300, Mitsubishi 8DC8, Isudzu 8DC4 (Япония), MT6 331TC40 (ФРГ) и др. В последнее время, например в США, наблюдается тенденция оборудования дизелей кроме штатных ППФТОМ дополнительными частичнопоточными фильтрами, т.е. переход от полнопоточной схемы очистки ММ к КСОМ.

Высокая эффективность применения КСОМ вместо только полнопоточной очистки подтверждается многими экспериментальными данными. Так, например, по данным авторов работы [32], применение КСОМ в дизелях ЯМЗ-240Н снизило износ деталей КШМ в 1,5...4,4 раза. Исследованиями авторов [33] также установлено, что КСОМ существенно снижает интенсивность загрязнения и старения ММ и срабатывания находящихся в нем присадок, что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в табл.2.

Т а б л и ц а 2. **Изменение свойств ММ при работе ДВС с различными системами очистки**

Параметры	Продолжительность работы двигателя, ч, с системами очистки масла	
	Полнопоточной	Комбинированной
Увеличение вязкости масла на 30 %	100	200
Концентрация загрязняющих примесей в масле, %	32	80
Снижение на 50 % диспергирующе-стабилизирующих свойств масла	120	Более 200

Анализ данных табл. 2 показывает, что при использовании КСОМ вместо полнопоточной основные физико-химические свойства ММ сохраняются значительно дольше (в 2 и более раз). Применение КСОМ вместо только полнопоточных фильтров в автомобильных двигателях позволяет увеличить срок службы масла с 10 до 20...60 тыс. км [20].

КСОМ позволяют в 3...4 раза повысить коэффициент очистки масла от суммарных механических примесей (с 7 до 26 %), а использование частичнопоточной центрифуги в 2...3 раза увеличивает срок службы бумажного ФЭ [2].

Кроме того, применение КСОМ в 2...3 раза снижает содержание загрязняющих примесей в ММ и в 2 раза увеличивает его срок службы до замены, а также примерно в 2 раза снижает износ основных деталей ДВС и в 1,5 раза – образование нагаров и лаков на деталях ЦПГ [34].

Использование вместо штатной полнопоточной очистки ММ КСОМ, по сведениям Б. Н. Перминова [35], дает аналогичные высокие результаты и на форсированных судовых дизелях.

Учитывая высокую эффективность современных КСОМ, конструкторы двигателей КамАЗ нового поколения (КамАЗ-740.11-240, КамАЗ-740.13-260) для повышения прочности КВ сочли возможным даже отказаться от центробежных грязеуловителей в шатунных шейках КВ [36].

Приведенные выше факты говорят о том, что КСОМ значительно снижают абразивный износ деталей ДВС вследствие более интенсивного удаления из ММ абразивных частиц, существенно снижают уровень загрязнения и продлевают срок службы до замены ММ и ФЭ.

7. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АГРЕГАТОВ ОЧИСТКИ МАСЛА И СИСТЕМ СМАЗКИ ДВС

В настоящее время совершенствование масляных фильтров для очистки масла в ДВС происходит в следующих основных направлениях [37]:

1. Модернизация существующих и применение дополнительных клапанов и устройств в масляных фильтрах:

а) совершенствование перепускного клапана фильтра;

б) применение каналов или клапанов для слива масла из фильтра при замене ФЭ;

в) применение устройств, сигнализирующих о необходимости замены ФЭ.

2. Модернизация конструкции фильтров и фильтрующих элементов:

а) применение фильтров с несменяемыми ФЭ, которые подлежат периодической разборке и очистке (пат. 6488848 США) или регенерации без разборки (пат. 4783 РБ);

б) применение фильтров со сменными ФЭ, например, масляные фильтры фирмы Hengst (ФРГ), которые для упрощения утилизации могут изготавливаться без металлических частей из термопластического полимерного материала;

в) улучшение фильтрующих свойств и повышение срока службы фильтрующих элементов;

г) применение магнитных фильтров и уловителей как основных;

д) применение электростатических фильтров;

е) применение фильтров, улучшающих эксплуатационные свойства моторного масла введением щелочного реагента, магнитной обработкой, диспергированием и др.;

ж) применение для изготовления ФЭ новых материалов, например, углеродных тканей, микростеклянных и др. синтетических волокон.

3. Применение нетрадиционных мест установки фильтров:

а) перед входом в масляный насос;

б) в поддоне картера двигателя;

в) в картере двигателя;

г) в моторном отсеке вне двигателя, что позволяет увеличить их размеры, а, следовательно, и срок службы.

д) перед каждой форсункой в двигателях со струйным охлаждением поршней;

е) применение фильтра с отдельным электронасосом для автономной очистки масла в поддоне картера двигателя.

4. Применение модульных конструкций, объединяющих в одном корпусе несколько агрегатов системы смазки:

а) полнопоточный и частичнопоточный фильтры;

б) полнопоточный фильтр и частичнопоточную центрифугу;

в) полнопоточный и частичнопоточный фильтры и пароотделитель с электроподогревателем;

г) фильтр и охладитель масла.

Довольно актуальным в настоящее время является переход от неразборных навинчиваемых («Spin-on») фильтров к разборным конструкциям, в которых в разборном навинчиваемом на корпус колпаке заменяется только отработавший ФЭ, а металлические детали колпака используются многократно. При этом значительно снижается объем металлических деталей фильтра, требующих утилизации и связанных с этим потерь ММ. Имеются сведения [2] о разработке в НАТИ ряда из трех типоразмеров фильтров такой конструкции. Все более широко используются они и на двигателях отечественных тракторов «Беларус» производства МТЗ, а также некоторыми зарубежными фирмами.

Одним из новых направлений повышения качества ММ, продления его срока службы и снижения износов ДВС является обработка масла ультразвуком. Производственные испытания двигателей Д-50 и Д-144 показали [26, 27], что после ультразвуковой обработки ММ ультразвуковыми волнами с частотой около 20 кГц в течение одного часа износ деталей ДВС снизился на 30...35 %, загрязненность поршней – на 20 %, а срок службы масел был увеличен с 240 до 600 м.-ч.

8. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОЧИСТКИ И ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛА НА РАБОТУ СОПРЯЖЕНИЙ ДВИГАТЕЛЯ

Повышение эксплуатационной надежности и долговечности ДВС является одной из важнейших проблем современного двигателестроения. Первые работы по изучению взаимодействия поверхностей металла и различных смазок были выполнены Дж. Лэнгмюром (1917 г.). Большое значение имело открытие в 1928 г. П. А. Ребиндером эффекта

адсорбционного снижения прочности поверхностей трения, названного «эффектом Ребиндера».

В СССР первыми обобщениями исследований в области трения и износа были монографии М. М. Хруцова, Д. В. Конвисарова, А. К. Зайцева (1946–1947 г.г.). В дальнейшем работы по изучению природы изнашивания проводились Е.А. Чудаковым (Институт машиноведения), Б. Д. Грозиным, Д. А. Драйгором (АН УССР), Б. И. Костецким, Н. Л. Голего (КИИГА) и другими исследователями.

Для изучения процессов трения, износа и смазки контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении во второй половине XX века была создана новая наука – трибология, включающая такие разделы, как триботехника, трибомеханика, химмотология и др. В 1957 г. Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским было открыто явление избирательного переноса, обеспечивающее при создании специальных условий смазки (при работе пары трения сталь – латунь в среде глицерина) практически безыносный режим трения, которое стало первым официально признанным открытием в области трибологии [38].

Расчет и конструирование подшипников скольжения долгое время производились на основе гидродинамической теории смазки (ГТС), созданной русским ученым Н. П. Петровым в 1883 г. Дальнейшее развитие ГТС получила в работах Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина, Э. Ф. Зоммерфельда, Н. И. Мерцалова, А. К. Дьячкова и др.

Несколько позже была создана усталостная теория износа твердых тел, продолжалось развитие контактно-гидродинамической теории смазки (КГТС), основы которой были заложены более полувека назад А. И. Петрусевичем, А. М. Эртелем, А. Н. Грубиным, Д. С. Кодниром. Дальнейшее развитие эта теория получила в работах М. В. Коровчинского и других исследователей [39].

В ГОСТ 27674–88 определены следующие виды изнашивания: механическое, коррозионно-механическое, абразивное, гидро- и газоабразивное, усталостное, эрозионное, гидро- и газозерозионное, кавитационное, изнашивание при заедании, окислительное, электроэрозионное, изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии. Однако доля каждого из вышеприведенных видов изнашивания в общем износе ДВС может изменяться в широких пределах.

Наиболее приемлемой для практического применения в настоящее время является классификация, при которой различают механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое изнашивание (рис. 7) [40].

Основными причинами износа деталей ДВС являются воздействие абразивных частиц (атмосферной пыли, продуктов износа деталей), продуктов сгорания топлива, а также электрические явления, вызывающие электростатический износ.

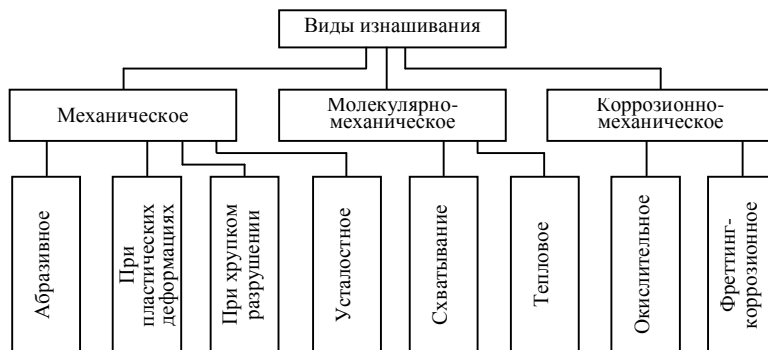


Рис. 7. Классификация видов изнашивания деталей ДВС.

Исследованиями влияния теплового режима на износ двигателей посвящено большое количество работ [34, 41–43 и др.], авторы которых придерживаются различных точек зрения, вплоть до диаметрально противоположных. Часть исследователей придерживается мнения, что с понижением теплового режима двигателя происходит увеличение интенсивности изнашивания деталей ЦПГ, подшипников и шеек КВ. К причинам повышенного износа ДВС на пониженных тепловых режимах они относят электрохимическую коррозию, смывание масляной пленки конденсатом, обводнение масла и повышение его вязкости, затрудняющее поступление масла на поверхности трения [41].

В работе М. А. Григорьева и Н. Н. Пономарева [34] отмечается увеличение интенсивности изнашивания цилиндров двигателя с понижением его теплового режима и наблюдается также незначительное (на 5...10 %) увеличение скорости изнашивания при повышении температуры охлаждающей воды с 80 до 100° С. В результате экспериментальных исследований установлено, что в дизелях при понижении температуры охлаждающей жидкости (ОЖ) с 80 до 30° С скорость изнашивания деталей увеличивается в 2...3 раза.

Имеются также экспериментальные данные, подтверждающие снижение износа деталей ДВС на пониженных тепловых режимах. Кажущееся парадоксальным снижение абразивного износа на пониженных тепловых режимах авторами работы [34] объясняется повышением вязкости масла, а, следовательно, и увеличением толщины масляной пленки. В результате меньшее количество абразивных частиц вступает в контакт с поверхностями трения и величина абразивного износа уменьшается.

Для автомобильных двигателей в эксплуатационных условиях износ при пониженном температурном режиме составляет 5...13,9 % и при нормальном температурном режиме в отсутствие пыли –

15,1...32,1 % [41]. При нормальном тепловом режиме износ цилиндров на 43...53 % больше, чем при пониженном [34].

9. ИЗНОС ПРИ ПУСКЕ И ПРОГРЕВЕ ДВС

Период пуска и прогрева холодного двигателя характеризуется рядом особенностей. Во-первых, значительный износ подшипников и шеек КВ при пуске ДВС обусловлен низкой эффективностью работы агрегатов очистки масла, в результате чего к парам трения поступает практически неочищенное ММ. Во-вторых, из-за высокой вязкости масло поступает к подшипникам с большим запаздыванием, что способствует возникновению в них граничного трения и повышенного износа, а в некоторых случаях и задира. И, в-третьих, в период пуска и прогрева наиболее интенсивно протекает процесс конденсации воды на холодных стенках цилиндров, вследствие чего интенсифицируется их коррозионный износ [44].

Один пуск холодного тракторного двигателя приравняют к износу за 4 ч 50 мин работы при нормальных режимах, а износ за один пуск горячего двигателя – соответственно к износу за 2 ч 13 мин, износ за время одного пуска автомобильного двигателя – к износу за 70 км пробега, а износ во время пуска при температуре -18°C – соответственно к износу за 210 км пробега [34]. В различных двигателях износы за 100 зимних пусков примерно в 2 раза больше, чем за 100 летних.

Максимальный износ гильз цилиндров дизеля соответствует периоду первых вспышек пуска-разгона, а скорость изнашивания в этот период в 18...27 раз превышает скорость изнашивания при последующем прогреве двигателя на холостом ходу [43].

Однако существует и противоположная точка зрения, также подтверждаемая результатами испытаний, согласно которой доля пусковых износов в общем износе ДВС не столь значительна.

Так, исследования пусков двигателя ЯМЗ-204А при температурах от -5 до -20°C показали, что износ цилиндров двигателя за один пуск эквивалентен пробегу автомобиля в пределах 4,4...40,2 км.

В результате 100 пусков холодного двигателя ЯАЗ-204, установленного в холодильной камере, при температуре ОЖ $-15...-20^{\circ}\text{C}$, средний максимальный износ цилиндров составил 25,3 мкм. Отмечено, что износ цилиндров от всех пусков при низких температурах составляет менее 8 % общего эксплуатационного износа цилиндров.

Другими исследованиями установлено, что за 50 пусков холодного дизеля ЯМЗ-238 при температуре -35°C средний максимальный износ цилиндров оказался равным 5,1 мкм. Потери моторесурса из-за пусков холодных двигателей, по мнению авторов, составляют 5,5 % от общего эксплуатационного износа.

Для автомобильных двигателей пусковой износ в эксплуатационных условиях оценивается в 2,4...23,4 % от общего износа [41].

Как видно из приведенных выше данных, при оценке величины пусковых износов и их вклада в общий баланс эксплуатационных износов взгляды специалистов значительно расходятся. Завышенные оценки пусковых износов, по мнению М. А. Григорьева и Н. Н. Пономарева [34], с одной стороны, основаны на том, что за эксплуатационный износ ошибочно принимаются минимально возможные износы, а с другой стороны, за износ при пуске принимается износ, полученный в наиболее тяжелых условиях пуска.

На достоверность результатов исследований большое влияние оказывает также методика измерения пусковых износов ДВС. Наиболее широкое применение для определения износов находят такие методы, как микрометрирование, взвешивание, метод определения железа в масле, метод спектрального анализа, метод искусственных баз, метод радиоактивных изотопов, метод нейтронно-активационного анализа, метод поверхностной активации и др.

Следует отметить, что наиболее низкие эквиваленты пробега в пределах 10...20 км и малые доли пусковых износов порядка 2...19 % от общего эксплуатационного износа двигателя получены в работах с применением метода искусственных баз [34]. Наиболее интенсивное изнашивание деталей двигателей при пуске и значительно большие эквиваленты пусковых износов порядка 50... 75 % установлены в работах, выполненных с применением методов железа в масле или радиоактивных изотопов.

При использовании метода искусственных баз пояс лунок характеризует только локальный износ малого участка поверхности детали непосредственно в зоне его расположения, поэтому результаты измерения максимального износа на пусковых режимах с применением данного метода в большинстве случаев оказываются заниженными.

Интегральные методы определения износа (метод определения железа в масле, метод радиоактивных изотопов и др.) оценивают пусковой износ в виде отношения количества железа, снимаемого с деталей ЦПГ за один пуск, к общему количеству железа, поступающему в ММ за 1 ч работы ДВС на номинальном режиме, и являются более достоверными.

Поэтому становится очевидным, что величина износа при пуске холодного двигателя является значительной составляющей в общей сумме эксплуатационных износов, в соответствии с которыми износ деталей двигателя на пусковых режимах составляет 50...75 % общего износа за период эксплуатации до ремонта.

Одной из основных причин повышенного пускового износа деталей КШМ и ГРМ, как уже было отмечено выше, является повышенная вязкость холодного ММ при пуске двигателя, обуславливающая высокое

гидравлическое сопротивление полнопоточных масляных фильтров, результатом которого является открытие перепускного клапана фильтра и поступление к парам трения неочищенного масла. Отсутствие такого клапана или его заклинивание резко снижает подачу масла к подшипникам, создавая условия для их «масляного голодания» и последующего задира, а также может стать причиной повреждения (разрыва) шторы ФЭ.

10. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ СМАЗОЧНОЙ СИСТЕМЫ

Смазочные системы характеризуются по кратности циркуляции; удельной емкости; удельной подаче масляного насоса; наличию теплообменников и других охлаждающих устройств; принципу работы средств очистки; наличию и степени автоматизации.

Кратность циркуляции определяется выражением

$$k = V_n / V \quad , \quad (1)$$

где V_n – подача масляного насоса, л/ч;

V – вместимость смазочной системы, л.

Вместимость смазочной системы (в литрах) принимается: в карбюраторных двигателях – $(0,06 \dots 0,016) N_e$, в автомобильных дизелях – $(0,14 \dots 0,2) N_e$, в тракторных дизелях – $(0,18 \dots 0,6) N_e$, ($N_e = N_{e, \max}$), кВт.

По значению k смазочные системы делят на системы с малой ($k < 60 \text{ ч}^{-1}$) и с большой ($k \geq 60 \text{ ч}^{-1}$) кратностью циркуляции.

Удельная емкость (л/кВт) смазочной системы $q = V/N_e$ (у современных двигателей $q = (0,11 \dots 0,62)$ л/кВт).

Удельная подача масляного насоса

$$a_n = V_n / N_e; \quad a_n = (0,33 \dots 1,59) \text{ л/(кВт} \cdot \text{ч)}. \quad (2)$$

При расчете смазочной системы определяют скорости потоков масла и гидравлические сопротивления в характерных участках системы. Скорость потоков масла (м/с) при прохождении через трубопроводы и каналы определяется по формуле

$$\omega_m = V_n \cdot 10^{-6} / f_k \quad , \quad (3)$$

где V_n – объем масла, проходящего через данный канал, см³/с;

f_k – площадь «живого» сечения канала, см².

Гидравлическое сопротивление рассчитывают по формуле

$$\Delta p_r = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi_m \right) \frac{\omega_m^2 \rho_m}{2g} \quad , \quad (4)$$

где λ – коэффициент сопротивления трению;

l и d – длина и внутренний диаметр трубопровода;

ξ_m – коэффициент местных сопротивлений;

ρ_m – плотность масла.

Расчет масляного насоса. Масляные насосы поддерживают не-

прерывную циркуляцию масла в двигателе, подавая его под давлением во все сопряженные пары, требующие смазывания. На современных двигателях в основном применяют шестеренные и одновинтовые (разновидность шестеренных) насосы. В зависимости от типа двигателя их устанавливают внутри или снаружи картера. Для надежности работы во многих двигателях устанавливают двух- и трехсекционные масляные насосы. При этом верхняя секция подает масло в смазочную систему и центробежный маслоочиститель, а нижняя – в масляный радиатор.

Исходным параметром для расчета элементов смазочной системы является необходимая подача масла (л/ч):

$$V_n = \xi N_e W_T / (\Delta t c_m \rho_m), \quad (5)$$

где ξ – коэффициент запаса, учитывающий возможность перегрузки и дальнейшего форсирования двигателя, увеличение зазоров при износе и т. п. ($\xi = 1,5 \dots 3$);

W_T – удельное количество теплоты, поступающее в масло от деталей двигателя, Дж/(кВт·ч);

Δt – перепад температур масла на выходе из двигателя и входе в него, °С;

c_m и ρ_m – соответственно удельная теплоемкость (кДж/(кг·К)) и плотность (кг/м³) масла.

Точный расчет по приведенной зависимости затруднителен, поэтому подачу масляного насоса чаще определяют по эмпирическим зависимостям вида

$$V_n = q_n N_e, \quad (6)$$

где q_n – удельная подача масляного насоса: для карбюраторных двигателей $q_n = 11 \dots 28$ л/(кВт·ч) и для дизелей $q_n = 28 \dots 56$ л/(кВт·ч).

Расчетная подача масляного насоса может быть также получена на основе следующих предположений. Необходимая подача масла насосом V_n зависит от количества отводимой от двигателя теплоты Q_M (кДж/с), которое для автотракторных двигателей составляет 1,5...3 % общего количества теплоты, введенной в двигатель при сгорании топлива, т. е.

$$Q_M = (0,015 \dots 0,03) Q_0; \quad Q_0 = Q_n G_T / 3600 \text{ кДж/с}. \quad (7)$$

Тогда необходимая подача масла (циркуляционный расход масла) в л/с с учетом заданного значения Q_M

$$V_n = Q_M / (\rho_m c_m \Delta T_M), \quad (8)$$

где ρ_m – плотность масла (в расчетах принимают $\rho_m = 0,9 \dots 0,92$ кг/дм³);

c_m – средняя теплоемкость масла ($c_m = 1,88 \dots 2,094$ кДж/кг·К);

ΔT_M – повышение температуры масла в двигателе ($\Delta T_M = 10 \dots 15$ К).

Подачу масла насосом для стабилизации давления масла в системе двигателя обычно увеличивают в 2 раза, т. е.

$$V'_n = (2 \dots 3,5) V_n.$$

Тогда расчетная подача насоса определится из выражения

$$V_{н.р} = V'_n / \eta_n, \quad (9)$$

где η_n – объемный коэффициент подачи, учитывающий утечки масла через неплотности и влияние других факторов; $\eta_n = 0,6 \dots 0,8$.

Основные размеры масляного насоса определяют в предположении, что объем впадин (дм³) между зубьями шестерен насоса равен объему зубьев. В этом случае объем масла (л), поданный шестернями масляного насоса за один оборот, равен

$$V = \pi D_0 h b 10^{-6}, \quad (10)$$

где D_0 – диаметр начальной окружности шестерни, мм;

h – высота зуба, мм;

b – длина зуба, мм.

Тогда расчетная подача (л/с) с учетом размеров масляного насоса может быть определена по формуле

$$V_{н.р} = \pi D_0 h b n_n / (10^6 \cdot 60), \quad (11)$$

где n_n – частота вращения шестерни насоса, мин⁻¹.

Принимая $h = 2m$ и $D_0 = z m$, где m – модуль зацепления ($m = 3,5 \dots 5$ мм), z – число зубьев шестерни ($z = 7 \dots 12$), получим

$$V_{н.р} = 2\pi m^2 z n_n b / (10^6 \cdot 60). \quad (12)$$

Принимается допустимая окружная скорость шестерни на внешнем диаметре $v_{ш}$, которая не должна превышать 8...10 м/с, и выбирается частота вращения вала насоса n_n (мин⁻¹) с учетом отношения частот вращения коленчатого вала и ведущей шестерни насоса в пределах 0,7...1 для дизелей и 1,5...2 для карбюраторных двигателей.

Тогда наружный диаметр (мм) шестерни насоса можно рассчитать по формуле

$$D = 10^3 \cdot 60 \cdot v / \pi n_n. \quad (13)$$

Далее, приняв стандартный модуль зацепления m и число зубьев шестерни z , уточняют наружный диаметр шестерен по формуле

$$D = m(z + 2). \quad (14)$$

Затем, задавшись предварительно значениями m , z , n_n , можно определить длину зуба шестерни

$$b = 10^6 \cdot 60 V_{н.р} / (2\pi m^2 z n_n). \quad (15)$$

Значение b находится в пределах 20...50 мм.

Мощность (кВт), затрачиваемая на привод масляного насоса, определяется по формуле

$$N_{\text{н}} = \Delta p V_{\text{н.р.}} / (3600 \eta_{\text{мн}}), \quad (16)$$

где Δp – рабочее давление масла в системе (в карбюраторных двигателях $\Delta p = 0,3 \dots 0,5$ МПа, в дизелях $\Delta p = 0,3 \dots 0,7$ МПа);

$\eta_{\text{мн}}$ – механический КПД масляного насоса, $\eta_{\text{мн}} = 0,85 \dots 0,9$.

Для автотракторных двигателей значение $N_{\text{н}} = 0,4 \dots 2$ кВт.

Расчет масляного радиатора. В автотракторных двигателях для поддержания требуемой температуры масла применяются масляные радиаторы, которые делят на два типа: воздушно-масляные и водомасляные; они могут быть трубчато-пластинчатыми или трубчато-ленточными.

Основная расчетная величина – площадь поверхности охлаждения радиатора (м^2)

$$F_{\text{р}} = \frac{Q'_{\text{м}}}{k_{\text{м}}(T_{\text{м}} - T_{\text{в}})}, \quad (17)$$

где $Q'_{\text{м}}$ – количество теплоты, отдаваемой радиатором в единицу времени, кДж/с, $Q'_{\text{м}} = (0,5 \dots 0,75) Q_{\text{м}}$;

$k_{\text{м}}$ – полный коэффициент теплопередачи от масла к охлаждающей среде, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$T_{\text{м}}$ – средняя температура масла в радиаторе: $T_{\text{м}} = (T_{\text{д.вх}} + T_{\text{д.вых}})/2 = 348 \dots 363$ К, где $T_{\text{д.вх}}$ и $T_{\text{д.вых}}$ – температура масла на входе в радиатор и выходе из него, К: $T_{\text{д.вх}} = T_{\text{д.вых}} + \Delta T_{\text{м}}$, где $\Delta T_{\text{м}}$ – степень подогрева масла в двигателе ($\Delta T_{\text{м}} = 10 \dots 15$ К, $T_{\text{д.вых}} = 343 \dots 363$ К);

$T_{\text{в}}$ – средняя температура проходящего через радиатор охладителя (воды или воздуха): $T_{\text{в}} = T_{\text{охл.вх}} + \Delta T_{\text{охл}}/2$, где $T_{\text{охл.вх}}$ – температура охладителя на входе в радиатор (для воздушно-масляных радиаторов $T_{\text{охл.вх}} = 313$ К), $\Delta T_{\text{охл}}$ – степень подогрева воздуха при прохождении через решетку масляного радиатора: $\Delta T_{\text{охл}} = 3 \dots 5$ К; для водомасляных радиаторов $T_{\text{в}} = 348 \dots 358$ К.

Значение коэффициента $k_{\text{м}}$ зависит от многих факторов. Его определяют по формуле

$$k_{\text{м}} = 1/(1/\alpha_1 + \delta/\lambda_{\text{т}} + 1/\alpha_2), \quad (18)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от масла к стенкам радиатора, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

δ – толщина стенки радиатора, м;

$\lambda_{\text{т}}$ – теплопроводность материала стенки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенок радиатора в воде, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Значения α_1 , $\lambda_{\text{т}}$ и α_2 принимают по опытным данным: для прямых гладких трубок при скорости движения масла $w_{\text{м}} = 0,1 \dots 0,5$ м/с $\alpha_1 = 100 \dots 500$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; при наличии завихрителей в трубках и скоро-

сти масла $w_m = 0,5 \dots 1$ м/с принимают $\alpha_1 = 800 \dots 1400$ Вт/(м²·К). Значение λ_r зависит от материала радиатора и составляет для латуни и алюминиевых сплавов 80...125 Вт/(м·К), для нержавеющей стали 10...20 Вт/(м·К); $\alpha_2 = 2300 \dots 4100$ Вт/(м²·К).

Полный коэффициент теплопередачи k_m для прямых гладких трубок составляет 115...350 Вт/(м²·К), для трубок с завихрителями – 815...1160 Вт/(м²·К).

Очистка масла. Для уменьшения вредного действия механических примесей и продуктов окисления масло во время работы двигателя должно непрерывно очищаться. Очистку масла по целевому назначению и качественному эффекту подразделяют на три группы: предварительная, грубая и тонкая.

При предварительной очистке удаляются частицы загрязнений с размерами более 120...150 мкм, при грубой – свыше 50 мкм, при тонкой – меньше 50 мкм.

Агрегаты очистки могут пропускать весь поток масла (полнопоточные) и его часть (неполнопоточные). Коэффициент проточности определяется по формуле

$$k_p = V_a / V_m, \quad (19)$$

где V_a – поток масла, циркулирующий через агрегат очистки;

V_m – поток масла, циркулирующий через масляную магистраль.

При $k_p < 1$ – неполнопоточная очистка, при $k_p = 1$ – полнопоточная очистка.

Масло может очищаться в пористых средах (фильтрование) и в силовых полях (центробежная, магнитная, гравитационная очистка и др.).

Фильтры грубой очистки по конструкции подразделяются на пластинчато-, ленточно-, проволочно-щелевые и сетчатые.

Очистка масла в фильтрах является частным случаем общей теории фильтрации жидкостей в пористой среде [45]. Одной из основных характеристик пористого материала является его пористость, определяемая из выражения

$$\Psi = \frac{V_p}{V_{pm}} = \frac{V_{pm} - V_m}{V_{pm}} = 1 - \frac{V_m}{V_{pm}}, \quad (20)$$

где V_p – объем, занимаемый порами материала;

V_{pm} – общий объем пористого материала;

V_m – объем материала без учета пор.

Для фильтрования находят широкое применение разнообразные фильтрующие перегородки [9, 10], однако для полнопоточной очистки ММ в ДВС применяются преимущественно фильтрующие перегородки из бумаги или картона.

Процесс задержания частиц загрязнений фильтровальным материалом может происходить по одному из четырех законов фильтрования,

схемы которых приведены на рис. 8 [20].

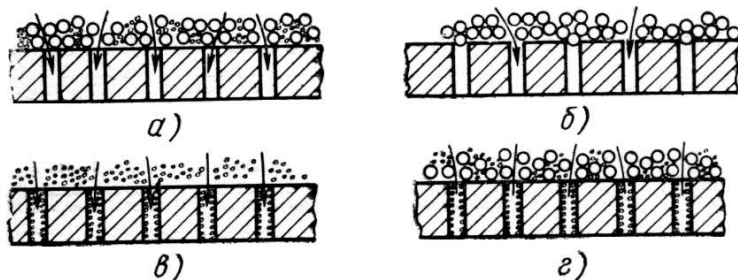


Рис. 8. Осаждение частиц загрязнений на фильтрующей перегородке фильтра при различных законах фильтрования: *a* – с образованием осадка; *b* – с полным закупориванием пор; *v* – с постепенным закупориванием каждой поры; *e* – промежуточный.

Каждый из приведенных законов фильтрования характеризуется соответствующим уравнением [20], связывающим скорость фильтрования жидкости w при постоянном перепаде давления в фильтре Δp или перепад давления в фильтре Δp при постоянной скорости фильтрования жидкости w , и объем фильтрата g . В бумажных ППФТОМ автотракторных ДВС осаждение частиц загрязнений происходит преимущественно по промежуточному закону фильтрования (рис. 8, *e*), а в частичнопоточных – в начале их работы – по промежуточному закону, а затем – по закону фильтрования с образованием осадка (рис. 8, *a*).

Расчет фильтрующих элементов сводится к определению площади поверхности фильтрации и пропускной способности. Площадь поверхности фильтрации (см^2)

$$F = 100f/k_f, \quad (21)$$

где f – необходимое «живое» сечение фильтра, см^2 ;

k_f – коэффициент живого сечения, %,

$$f = 1000 V_n / (60 \omega_m), \quad (22)$$

где V_n – подача масла, л/мин;

ω_m – допустимая средняя скорость масла, см/с.

Допустимая скорость масла ω_m для пластинчатых фильтров составляет 6...12 см/с, для сетчатых – 2...2,5 см/с, для проволочно-щелевых 2,5...5 (при отсутствии скребков) и 9...18 см/с (при наличии скребков).

Коэффициент «живого» сечения для ленточно- и проволочно-щелевых фильтров

$$k_f = 100 \delta l_0 (\rho' t), \quad (23)$$

где δ и l_0 – соответственно высота и длина фильтровальной щели, мм;

t и ρ' – шаг выступов и толщина ленты (проволоки), мм.

Пропускная способность q_f (л/(мин·см²)) и расход V_f (л/мин) фильтра выражаются зависимостями

$$q_f = \alpha \Delta p / \mu \quad \text{и} \quad V_f = \alpha \Delta p F / \mu, \quad (24)$$

где α – коэффициент пропорциональности, представляющий собой пропускную способность единицы площади поверхности фильтра при перепаде давления $\Delta p = 0,1$ МПа и вязкости масла $0,1$ Па·с, (л/см²). Значение α в зависимости от материала фильтра находится в пределах $0,012 \dots 0,105$ (для капрона $\alpha = 0,012$, для проволочного фильтра с размером щели $0,08$ мм – $0,105$);

Δp – перепад давления на фильтре (принимается $0,1$ МПа, предельный перепад давлений в фильтрах составляет $0,08 \dots 0,12$ МПа);

μ – динамическая вязкость масла, Па·с;

F – площадь поверхности фильтрации, см².

Фильтры тонкой очистки масла по конструкции разделяют на щелевые, объемно- и поверхностно-адсорбирующие и рассчитывают по тем же зависимостям, что и фильтры грубой очистки.

Центробежные маслоочистители (центрифуги) обладают избирательным свойством очистки. Тонкость очистки масла в центрифугах при многократной циркуляции составляет $1 \dots 3$ мкм, поэтому их широко применяют на двигателях, работающих в условиях сильной запыленности.

По типу привода центрифуги бывают реактивные и реактивно-активные. У реактивных центрифуг ротор вращается за счет струй масла, вытекающих с большой скоростью через наружные сопла, а у реактивно-активных – за счет моментов, создаваемых потоком масла, проходящего через тангенциальные каналы внутри ротора.

Очистка масла в центрифуге осуществляется за счет центробежных сил, действующих на вращающееся вместе с ротором масло и находящиеся в нем частицы загрязняющих примесей. В результате частицы загрязнений с плотностью, превышающей плотность масла, отбрасываются к внутренним стенкам ротора, где и скапливаются, образуя плотный слой отложений. Центробежная сила F_c , действующая на находящуюся в роторе частицу, определяется из выражения [46]

$$F_c = m \omega^2 r, \quad (25)$$

где m – масса частицы, кг;

ω – угловая скорость, с⁻¹;

r – расстояние от частицы до оси вращения, м.

С другой стороны осаждению частицы препятствует сила гидравлического сопротивления жидкости F_s , определяемая по формуле Стокса [45]:

$$F_s = 3 \pi \mu d w, \quad (26)$$

где μ – динамическая вязкость масла, Па·с;

d – диаметр частицы, м;

w – скорость осаждения частицы, м/с.

Из выражений (25) и (26) видно, что при увеличении массы частицы увеличивается и действующая на нее центробежная сила, а при увеличении размера частицы возрастает сила сопротивления жидкости, препятствующая ее осаждению. Следовательно, наиболее эффективно в центрифуге будут выделяться частицы, обладающие большей массой и меньшими размерами, т.е. частицы с максимальной плотностью. С уменьшением плотности загрязнений эффективность их осаждения в роторе центрифуги снижается, а загрязнения с плотностью, равной плотности масла, практически не задерживаются центрифугой даже при их значительных размерах. Также из выражения (26) видно, что эффективность задержания частиц центрифугой в большой степени зависит от вязкости ММ, которая может изменяться в широких пределах.

Основным показателем эффективности центрифуги является ее фактор разделения F_r , величина которого определяется из выражения

$$F_r = \frac{\omega^2 r}{g}, \quad (27)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Иначе говоря, фактор разделения показывает, во сколько раз ускорение центробежных сил, действующих на частицы загрязняющих примесей в роторе центрифуги, превышает ускорение силы тяжести. Как видно из выражения (27), величина фактора разделения прямо пропорциональна квадрату угловой скорости и расстоянию от частицы до оси вращения, т.е. определяющая роль принадлежит угловой скорости ротора центрифуги, а размеры ротора (его диаметр) оказывают меньшее влияние на величину фактора разделения. Основным параметром, определяющим частоту вращения ротора центрифуги, является давление масла, при снижении которого эффективность очистки масла центрифугой значительно ухудшается. Частота вращения ротора центрифуг автотракторных ДВС на номинальном режиме составляет не менее 5000 мин⁻¹, а значение фактора разделения – 1250...2000 [30].

Кроме фактора разделения большое влияние на эффективность работы центрифуги оказывает также организация в ней потока жидкости. В зависимости от организации потока жидкости в роторе различают центрифуги с однокамерными и многокамерными роторами, известны также центрифуги, имеющие роторы со спиральными камерами или с пакетом конических тарелок и др.

Эффективность очистки ММ в центрифуге прямо пропорциональна времени нахождения его в роторе, определяемого размерами ротора и скоростью движения в нем масла. Скорость масла в роторе центрифуги не должна превышать критического значения, при котором начина-

ется процесс уноса жидкостью задержанных ранее частиц. В роторах автомобильных и тракторных центрифуг значение критической скорости $w_{кр} \leq 5 \dots 10$ см/с [9, 20].

Расчет подшипника. Для создания при работе двигателя в сопрягаемых деталях жидкостного трения необходимо, чтобы под действием гидродинамического давления в несущей части масляного слоя вал поднимался на определенное минимальное значение.

Считается, что жидкостное трение достигается, если между валом и подшипником имеется минимальный зазор

$$h_{\min} \geq h_{кр.\min} + h_r, \quad (28)$$

где $h_{кр.\min}$ – критическая минимальная толщина масляного слоя, при которой возможен переход жидкостного трения в сухое;

h_r – рабочая толщина масляного слоя (обычно h_r принимают 2 мкм).

$$h_{кр.\min} = \Delta_v + \Delta_p + \Delta_g, \quad (29)$$

где Δ_v – высота неровностей вала;

Δ_p – высота неровностей подшипника;

Δ_g – отклонение от геометрической формы.

Для приработанных автотракторных двигателей $h_{кр.\min} = 3 \dots 4$ мкм.

Надежность работы подшипника оценивают коэффициентом надежности жидкостного трения

$$\xi = h_{\min} / h_{кр.\min} \geq 1,5. \quad (30)$$

По гидродинамической теории смазки минимально допустимый зазор между валом и подшипником определяется по формуле

$$h_{\min} = 55 \cdot 10^{-9} \cdot \mu n d / (k_s X c), \quad (31)$$

где μ – динамическая вязкость масла, Па·с;

n – частота вращения вала, мин⁻¹;

d – диаметр вала, мм;

k_s – среднее удельное давление на опорную поверхность подшипника, МПа;

$X = \Delta/d$ – относительный зазор;

Δ – диаметральный зазор между подшипником и валом, мм;

$c = 1+d/l$ – коэффициент, характеризующий геометрию вала в подшипнике;

l – длина опорной поверхности подшипника, мм.

При выборе значения вязкости масла следует учитывать, что средняя температура масляного слоя в подшипниках достигает 390 К; например, в подшипниках из свинцовистой бронзы она составляет 373...383 К.

Для правильно сконструированного подшипника минимальная толщина h_{\min} слоя масла должна быть более 5...6 мкм.

При расчете подшипников автотракторных двигателей величина диаметрального зазора ориентировочно может быть принята: для карбюраторных двигателей $\Delta_{\min} = 0,004\sqrt{d_h}$, для дизелей $\Delta_{\min} = 0,007\sqrt{d_h}$. Максимальный зазор $\Delta_{\max} = (2,2\dots 2,5) \Delta_{\min}$, где d_h – диаметр шатунной шейки.

ЛИТЕРАТУРА

1. The History of Oil Filtration [Electronic resource]. 2003. Mode of access: [http://www.north-american-lubricants.com/History Of Oil Filtra-tion.htm](http://www.north-american-lubricants.com/History%20Of%20Oil%20Filtration.htm). – Date of access: 17.08.2003.
2. Маев В. Е. Средства фильтрации и их сертификация / В. Е. Маев, Г. А. Смирнов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2001. № 1. С. 28–29.
3. Трактор-пропашник «Универсал». Модель 1-2. Каталог запасных частей. Л.–М.: Наркомтяжпром, 1936. 182 с.
4. Трактор «Универсал-2». Руководство по уходу. Каталог запасных частей. Владимирский тракторный завод, 1945. 84 с.
5. Трактор «Катерпиллар» шестьдесят: справочная книга для полевых и ремонтных механиков и для сельскохозяйственных школ. Сан-Леандро, Калифорния: Caterpillar Tractor Co., 1930. 147 с.
6. Тракторы ЧТЗ С-60 и С-65: руководство службы. М.: Военное издательство народного комиссариата обороны, 1945. 260 с.
7. Тракторы КД-35 и КДП-35: краткое руководство по уходу и эксплуатации / ЛТЗ. Воронеж: Облполиграфиздат, 1952. 179 с.
8. Двигатели ЯАЗ-204: инструкция по уходу. М.: Машгиз, 1953. 207 с.
9. Глыбин А. И. Автотракторные фильтры: справочник / А. И. Глыбин Л.: Машиностроение, 1980. 181 с.
10. Скиридов И. С. Обзор по фильтрации масла в тракторных двигателях / И. С. Скиридов. М.: Отдел науч.-техн. информации, 1956. 33 с.
11. Тракторы «Беларусь» МТЗ-1 и МТЗ-2 / П. И. Бойков и др.; под ред. А. М. Тарасова. М.: Гос. изд-во с.-х. лит., 1956. 351 с.
12. Трактор АСХТЗ-НАТИ. Модель 1 ТА / А. Г. Гайворонский и др.; под ред. Л. Е. Макоеда. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. лит., 1950. 180 с.
13. Трактор ХТЗ-7 / К. А. Кацевич и др.; под ред. И. Н. Медведева. М.: Гос. изд-во с.-х. лит., 1954. 200 с.
14. Смирнов Г. А. Реактивные масляные центрифуги тракторных и комбайновых двигателей / Г. А. Смирнов // Труды / Гос. союзн. научн.-исслед. тракторн. ин-т. – Вып. 171: Очистка топлива и масла в тракторных двигателях. Серия: Повышение надежности и долговечности. М.: ОНТИ-НАТИ, 1964. С. 26–129.
15. Гродзиевский В. И. Опыт ХТЗ по конструированию и испытанию реактивной масляной центрифуги для тракторных двигателей / В. И. Гродзиевский // Научная сессия НАТИ по вопросам развития конструкций тракторных дизелей (23–25 июня 1955 г.). М.: Отд. техн. информ., 1955. С. 123–129.
16. Двигатели Д-54А, Д-40Р и Д-75. Руководство по эксплуатации / Х. А. Вейхман и др.; под ред. Б. П. Кашуба. М.: Машгиз, 1960. 254 с.
17. Трактор ДТ-14. Руководство по эксплуатации. 3-е изд., испр. Киев–М.: Машгиз, 1958. 190 с.
18. Трактор ДТ-20. Руководство по эксплуатации / под ред. Б. П. Кашуба. Киев–М.: Машгиз, 1958. 206 с.
19. Скиридов И. С. Исследование центробежной полнопоточной фильтрации масла на дизеле Д-35 / И. С. Скиридов. // Научная сессия НАТИ по вопросам развития конструкций тракторных дизелей (23–25 июня 1955 г.). М.: Отд. техн. информ., 1955. С. 130–140.

20. Григорьев М. А. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания / М. А. Григорьев. М.: Машиностроение, 1983. 148 с.
21. All About Oil Filters [Electronic resource]. 2003. Mode of access: [http://www. syn-lube.com_oilfilters.htm](http://www.syn-lube.com_oilfilters.htm). Date of access: 17.08.2003.
22. Дизели Д-260.1/260.2 энергонасыщенных тракторов «Беларус» 1221/1221В/1222/1222В/1522/1522В / В. Г. Левков и др. Мн.: ПО «Минский тракторный завод», 2000.
23. Исаев Е. Немецкий двигатель на Т-150К / Е. Исаев // Сельский механизатор. 2002. № 5. С. 18–19.
24. Долецкий В. А. Дизели ЯМЗ / В. А. Долецкий, Ю. Г. Субботин, М. А. Григорьев // Автомобильная промышленность. 1993. № 2. С. 5–7.
25. Семейство дизельных двигателей ЯМЗ-530 (EURO 3) // Строительные и дорожные машины. 2003. № 7. С. 50–51.
26. Лышко Г. П. Рациональное использование топлива и смазочных материалов для сельскохозяйственной техники / Г. П. Лышко. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1986. 238 с.
27. Лышко Г. П. Топливо и смазочные материалы / Г. П. Лышко. М.: Агропромиздат, 1985. 336 с.
28. Витязь П. А. Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления / П. А. Витязь, В. М. Кащевич, Р. А. Кусин. Минск: НИИПМ с ОП, 1999. 304 с.
29. Микипорис Ю. А. Трибоэлектрофильтрация рабочей жидкости гидропривода строительных машин / Ю. А. Микипорис, Р. В. Смышников // Строительные и дорожные машины. 2004. № 8. С. 33–35.
30. Рыбаков К. В. Работа полнопоточных очистителей масла / К. В. Рыбаков, Ю. А. Усанов // Техника в сельском хозяйстве. 1987. № 2. С. 24–26.
31. Граблин Е. Е. Разработка и внедрение усовершенствованной системы смазки для семейства дизелей 8ЧВН15/16 производства Волгоградского моторного завода / Е. Е. Граблин, А. П. Лебедь, Н. Н. Верченко // Двигателестроение. 2003. № 3. С. 17–19.
32. Антропов Б. С. Двигатель ЯМЗ-240Н: улучшенная система очистки масла / Б. С. Антропов, В. М. Чернышев // Автомобильная промышленность. 1989. № 12. С. 14–15.
33. Артемьев В. А. Исследование комбинированной системы очистки масла в дизелях ЯМЗ / В. А. Артемьев, М. А. Григорьев, В. Н. Ефремов // Автомобильная промышленность. 1980. № 4. С. 7–9.
34. Григорьев М. А. Износ и долговечность автомобильных двигателей / М. А. Григорьев, Н. Н. Пономарев. М.: Машиностроение, 1976. 248 с.
35. Перминов Б. Н. Двухконтурная система комбинированной очистки моторного масла в судовых тронковых дизелях / Б. Н. Перминов // Двигателестроение. 2004. № 4. С. 43–45.
36. Совершенствование конструкции коленчатого вала двигателей КамАЗ / А. С. Денисов и др. // Двигателестроение. 2003. № 3. С. 24–26.
37. Карташевич А. Н. История развития, современное состояние и основные направления совершенствования средств очистки масла в двигателях внутреннего сгорания / А. Н. Карташевич, В. Г. Костенич // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2006. № 3. С. 118–124.
38. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В. Д. Зозуля и др.; АН УССР, Ин-т проблем материаловедения; отв. ред. И. М. Федорченко. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1990. 264 с.
39. Венцель С. В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С. В. Венцель. М.: Химия, 1979. 240 с.
40. Гурвич И. Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей / И. Б. Гурвич, П. Э. Сыркин, В. И. Чумак. М.: Транспорт, 1994. 44 с.
41. Венцель С. В. Смазка и долговечность двигателей внутреннего сгорания / С. В. Венцель. Киев: Техніка, 1977. 208 с.

42. Григорьев М. А. Отечественный и зарубежный опыт повышения надежности и долговечности автомобильных двигателей / М. А. Григорьев, В. А. Долецкий. М.: НИИНавтопром, 1973. 177 с.
43. Суранов Г. И. К исследованию пусковых износов двигателей внутреннего сгорания / Г. И. Суранов // Труды ЦНИИМЭ. Сб. 90. М.: 1968. С. 37–45.
44. Костенич В. Г. Анализ способов очистки масла в двигателях внутреннего сгорания / В. Г. Костенич // Механизация мелиоративных работ: сб. науч. тр. / Бел. с.-х. акад.; редкол.: А. Н. Карташевич (отв. ред.) и др. Горки: БСХА, 1997. С. 18–23.
45. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л. С. Лейбензон. М.–Л.: Гос. изд-во технико-теоретич. лит., 1947. 244 с.
46. Гродзиевский В. И. Реактивные центрифуги для очистки масла в двигателях внутреннего сгорания / В. И. Гродзиевский. М.–Киев: Машгиз, 1963. 88 с.

Учебное издание

Анатолий Николаевич Карташевич
Валерий Геннадьевич Костенич

**СМАЗОЧНЫЕ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Лекция

Редактор Е. О. Бурхан
Техн. редактор Н. К. Шапрунова
Корректор Е. А. Юрченко

ЛВ № 348 от 09.06.2004. Подписано в печать
Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага для множительных аппаратов.
Печать ризографическая. Гарнитура «Таймс».
Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,97.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена 2730 руб.

Редакционно-издательский отдел БГСХА
213407, г. Горки Могилевской обл., ул. Студенческая, 2
Отпечатано в отделе издания учебно-методической литературы
и ризографии БГСХА г. Горки, ул. Мичурина, 5