

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОРШНЕВОГО УПЛОТНЕНИЯ В ДВС МЕТОДОМ ИНДИЦИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРОВ

*М.Г. Рыбаков, к.т.н., генеральный директор ООО «Дизель Тест»*

Разработан метод определения утечек в поршневом уплотнении ДВС, основанный на анализе индикаторной диаграммы цилиндра с выключенной подачей топлива. Определены расходные характеристики утечек через уплотнения ЦПГ эксплуатирующихся судовых дизелей. Выявлены особенности истечения заряда из надпоршневого объема при изношенных поршневых кольцах. Предложен способ диагностирования изменения состояния уплотнения, отличающийся высокой чувствительностью.

При проведении капитального ремонта поршневых ДВС самой трудозатратной из восстановительных операций является ремонт поршневых уплотнений, требующий разборки рабочих цилиндров с выемкой поршней.

Один из способов снижения затрат — организация своевременного проведения ремонтов уплотнений. Целесообразно исключить убыточную систему плановых профилактических ремонтов, направленных на опережение возможного появления отказов, а также не менее убыточную систему ремонтов по фактам отказов уплотнений. Система организации своевременных ремонтов должна быть основана на плановой безразборной диагностики уплотнений. Известные способы диагностики [1] — по максимальному давлению сжатия и пневмоиндцирование недостаточно информативны в следствие присущих им недостатков, поэтому разработка новых способов диагностики актуальна.

Перспективное направление разработки — диагностирование уплотнений на основе анализа индикаторных диаграмм. Преимущество этого направления состоит в следующем. Часть судовых, тепловозных и промышленных ДВС периодически обслуживают с одновременной записью индикаторных диаграмм. Результаты их обработки используют для определения мощности двигателя, проверок его регулировки и диагностирования топливной аппаратуры. Добавление в программу обработки индикаторных диаграмм алгоритма диагностирования поршневых уплотнений позволит получать информацию об их состоянии без существенных затрат как дополнение к обычно извлекаемой информации.



Измерения, выполненные на эксплуатирующихся судовых дизелях, показали, что форма индикаторной диаграммы, записанной в цилиндре с выключенной подачей топлива, существенно зависит от технического состояния поршневого уплотнения. Как показано на рис. 1, при ухудшении состояния уплотнения наиболее подверженной изменению оказывается линия расширения на участке около 30° после ВМТ. В поисках объяснения этого явления было предпринято исследование утечек воздушного заряда из надпоршневого объема на тактах сжатия и расширения в цилиндрах с поршневыми уплотнениями, состояние которых варьировалось от нового до аварийного. Расходная характеристика утечек отображалась в графической форме, как функция качества уплотнения.

Результаты исследования выявили особенности деформации индикаторной диаграммы и позволили на основе полученных данных предложить способ диагностирования поршневого уплотнения, выполняемый в следующей последовательности:

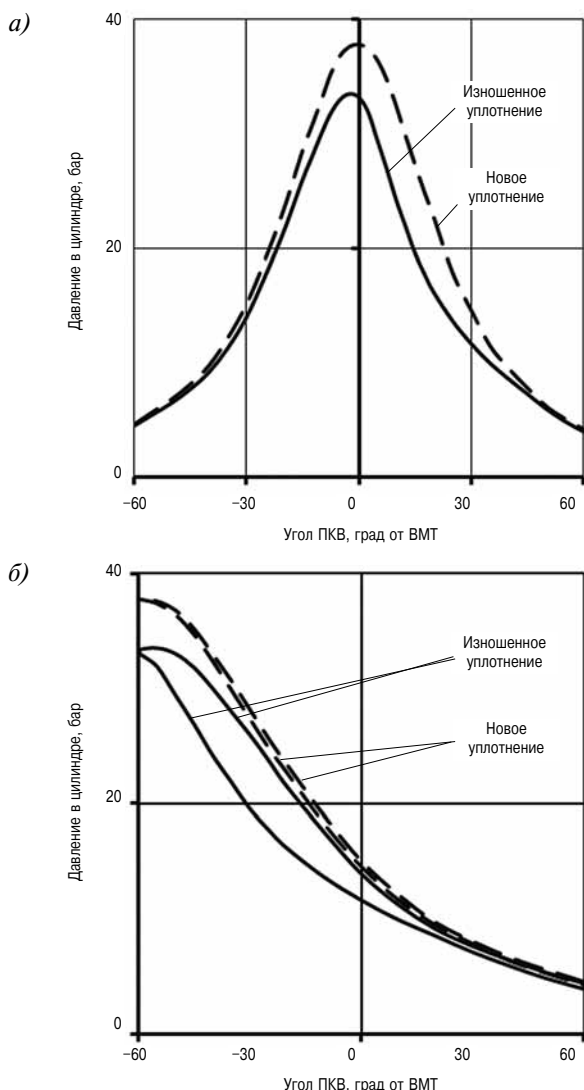
- запись индикаторной диаграммы в цилиндре при отключенной подаче топлива;
- определение по индикаторной диаграмме расходной характеристики утечек через уплотнения;
- оценка состояния уплотнения по параметрам расходной характеристики.

Расходная характеристика поршневого уплотнения в графической форме представляет собой изменение массы заряда в надпоршневом объеме от начала такта сжатия при закрытых органах газораспределения до окончания такта расширения при их открытии. Изменение массы заряда на графике отображают в процентах от полной массы заряда, измеренной после закрытия органов газораспределения. Примеры расходных

Таблица 1

**Сведения о двигателях, режимах диагностирования и наработке втулок и колец**

Номер рисунка	Объект и режим диагностирования	Наработка, характеризующая состояние колец и втулок
2, а	Главный судовый двигатель 6ЧСПН18/22, холостой ход, 458 об/мин	100 моточасов после капитального ремонта с установкой новых втулок, поршней и комплектов поршневых колец
2, б	Главный судовый двигатель 726MTBF40 (7ЧН26/40), холостой ход, 488 об/мин	Наработка втулок около 13 000 моточасов, комплектов колец — 1000 моточасов
2, в	Главный судовый двигатель G8V30/45ATL (8ЧН30/45), холостой ход, 485 об/мин	Наработка втулок около 28 000 моточасов, комплектов колец — 2500 моточасов
2, г	Главный судовый двигатель 6VD26/20AL-1 (6ЧН20/26), холостой ход, 994 об/мин	Сведения о наработке отсутствуют



**Рис. 1. Давление в цилиндре с выключенной подачей топлива при разном техническом состоянии поршневого уплотнения:**  
 а — развернутая индикаторная диаграмма; б — свернутая диаграмма

характеристик, построенных по индикаторным диаграммам нескольких судовых дизельных двигателей, представлены на рис. 2. Сведения об условиях, в которых они получены, приведены в табл. 1.

Расходная характеристика поршневого уплотнения, измеренная на работающем двигателе, описывает развитие двух процессов, происходящих в рабочем цилиндре при выключенной подаче топлива. Первый процесс — перемещение части воздушного заряда из надпоршневого объема в поршневое уплотнение на такте сжатия (далее — процесс истечения). Второй — возврат заряда из уплотнения на такте расширения (далее — процесс возврата).

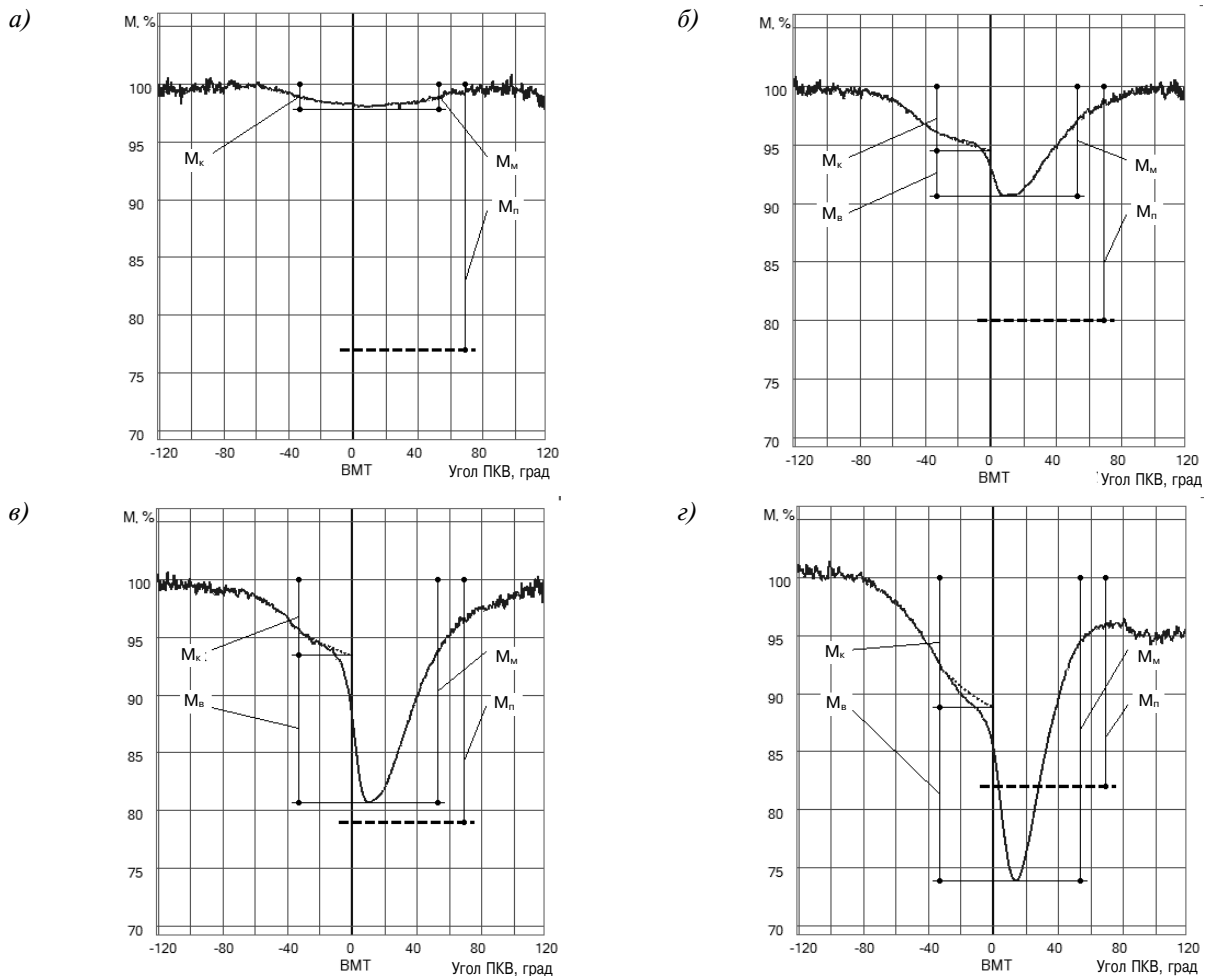
Анализ характеристик показывает, что процесс истечения в общем случае протекает в две фазы.

В первой фазе истечение происходит при движении поршневых колец по малоизношенной области зеркала втулки. Во второй фазе — при движении по области, имеющей существенный износ. Границу разделения областей можно увидеть на известных эпюрах износа и скоростей износа втулок цилиндров дизельных двигателей [2, 3]. Пример такой эпюры, заимствованный из [2], представлен на рис. 3. Здесь различимы области малого износа ( $A-A_1$ ) и существенного износа ( $A_1-A_2$ ). Скорость износа в точке  $A_2$  более чем в три раза выше скорости износа на участке  $A-A_1$ .

Верхнюю границу области существенного износа определяет положение верхнего поршневого кольца в ВМТ, нижнюю границу — положение этого кольца при повороте КВ на 20 градусов от ВМТ при начальной стадии износа, смещающееся затем до 40 градусов по мере развития износа. Разделение фаз процесса истечения происходит на нижней границе области существенного износа, то есть в диапазоне 20–40 градусов ПКВ за ВМТ.

В частном случае процесс истечения имеет однофазную форму (рис. 2, а). Такая форма соответствует режиму работы колец с новыми втулками. По мере износа втулок однофазная форма постепенно трансформируется в двухфазную (рис. 2, б, в, г).

Для количественной оценки процесса истечения используют три параметра, из которых  $M_k$  характеризует первую фазу истечения,  $M_v$  — вторую фазу,  $M_m$  — процесс истечения в целом. Параметры расходной характеристики приведены в табл. 2.



**Рис. 2. Расходные характеристики поршневых уплотнений:**

*a* — после обкатки нового комплекта колец по поверхности новой втулки; *б* — при работе малоизношенного комплекта колец по поверхности втулки, выработавшей около половины назначенного моторесурса; *в* — при работе среднеизношенного комплекта колец по поверхности втулки, выработавшей назначенный моторесурс; *з* — при работе изношенного комплекта колец по поверхности втулки, выработавшей назначенный моторесурс

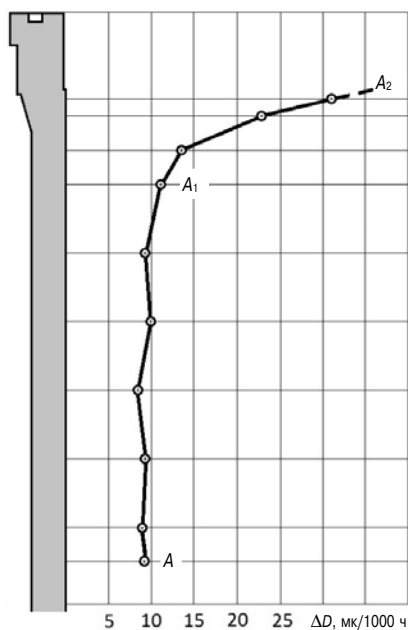
Результаты исследования показывают, что скорость перемещения массы во второй фазе истечения существенно возрастает. Причина роста заключается в следующем. Пока поршневые кольца на такте сжатия перемещаются по неизношенному зеркалу втулки, истечение воздуха из надпоршневого объема в уплотнение происходит только через зазоры в замках поршневых колец. Когда кольца попадают на изношенный участок, то к их основному перемещению, определяемому движением поршня, прибавляются перемещения в плоскости, перпендикулярной направлению движения, вызванные износом геометрии зеркала. При этих перемещениях открываются зазоры между кольцами и зеркалом, через который дополнительная часть воздуха из надпоршневого объема уходит в уплотнение.

При двухфазном процессе истечения точка минимальной массы в надпоршневом объеме (пик истечения массы в уплотнение) лежит на участке индикаторной диаграммы, расположен-

ном после ВМТ. Этот участок длиной порядка  $30^\circ$  — самое чувствительное место диаграммы по отношению к изменениям состояния поршневого уплотнения.

Процесс частичного возврата массы из уплотнения начинается на такте расширения, когда уменьшающееся давление в надпоршневом объеме становится ниже давления в уплотнении. Заканчивается процесс в момент открытия выпускного органа. Характеристикой степени износа является невозврат массы  $M_{н}$ , определяемой как разность между исходной массой заряда (100 %) и массой заряда в момент открытия выпускного органа.

Систематическая причина невозврата — утечка массы через уплотнения в подпоршневое пространство. Величина утечки определяется условиями работы нижнего кольца. Если нижнее кольцо в ВМТ не достигает области существенного износа зеркала цилиндра, то утечка из уплотнения в подпоршневое пространство происходит через



**Рис. 3. Распределение скорости изнашивания втулки четырехтактного двигателя 4DV224**

зазор в замке нижнего кольца. Утечка через зазор в замке обычно не превышает долей одного процента. Из-за малости точно оценить ее по расходной характеристике не удастся. В графическом виде процессы истечения и возврата выглядят равновеликими (см. рис. 2, а–в).

Если нижнее кольцо в верхней части своего хода попадает в область существенного износа, то через открывающийся зазор между кольцом и зеркалом, дополнительная часть воздуха уходит из уплотнения в подпоршневое пространство. В

этом случае невозврат массы в надпоршневой объем достигает заметной величины, измеряемой несколькими процентами (см. рис. 2, з).

Невозврат массы может возникнуть также из-за перекадки комплекта колец в канавках поршня из нижнего положения в верхнее. При перекадке часть массы воздуха из уплотнения уходит в подпоршневое пространство. Благоприятные условия для перекадки возникают при низком избыточном давлении над поршнем и высокой скорости движения поршня к нижней мертвой точке. Такие условия возникают в четырехтактных двигателях на режиме холостого хода или малой нагрузки в цилиндре с выключенной подачей в средней части хода поршня на такте расширения.

Случайной причиной невозврата может быть происходящая во время измерений утечка массы воздуха при неисправностях индикаторного крана. Поэтому для получения расходных характеристик используют индикаторные диаграммы, полученные с помощью исправных кранов.

Оценим пригодность параметров расходной характеристики для целей диагностики состояния уплотнения. Самым информативным является параметр  $M_m$ . Он пригоден для интегральной оценки технического состояния поршневого уплотнения, так как чувствительно реагирует на изменение состояния всех его деталей. У него самый большой диапазон значений — от 2–3 % у новых уплотнений до 20–30 % у изношенных уплотнений. Периодическое измерение его значений позволяет отслеживать изменение состояния уплотнения во времени.

Параметры  $M_k$  и  $M_b$  играют вспомогательную роль. Их значения дополняют интегральную оценку состояния уплотнения сведениями о состоянии комплекта колец и состоянии «зеркала» цилиндра. Параметр невозврата  $M_n$  в сравнении с остальными параметрами расходной характеристики наименее чувствителен к изменению технического состояния уплотнения. Для целей диагностирования его не используют.

Рассмотрим использование параметра  $M_m$  для оценки текущего состояния уплотнения по двухуровневой шкале «работоспособное–неработоспособное». Чтобы оценить работоспособность, рассчитывают  $M_n$  — предельно допустимое значение массы, перемещающейся в уплотнение, выраженное в процентах от массы заряда в надпоршневом объеме. Для расчета используют эмпирическую формулу, полученную с учетом того, что объем перемещенной массы равен объему предельно изношенного уплотнения, а ее плотность превышает плотность массы в надпоршневом объеме в 1,33 раза из-за охлаждения воздуха в процессе перетекания в уплотнение.

Таблица 2

**Параметры расходной характеристики**

Параметр, обозначение	Формула определения	Что характеризует	Значение параметра по опытным данным, %	
			min	max
Максимальное перемещение массы в уплотнение из надпоршневого объема, $M_m$	100 % минус минимальное значение массы в надпоршневом объеме	Состояние уплотнения в целом	2–3 % у нового уплотнения	До 30 % у изношенного уплотнения
Перемещение массы в уплотнение в первой фазе истечения, $M_k$	100 % минус значение массы в надпоршневом объеме в ВМТ	Состояние поршневых колец	2–3 % у нового комплекта	До 15 % у изношенного комплекта
Перемещение массы в уплотнение во второй фазе истечения, $M_b$	Разность значений $M_m$ и $M_k$	Состояние «зеркала» цилиндра	0 % у новой втулки	До 20 % у втулки с предельным износом

Формула имеет вид

$$M_p = 1,33 (V_{y.p.}/V_c),$$

где  $V_{y.p.}/V_c$  — соотношение объемов предельно изношенного уплотнения и камеры сжатия.

Располагая значением  $M_m$  и предельно допустимым значением  $M_p$ , определяем текущее состояние уплотнения. Если измеренное значение не превышает предельно допустимого, то состояние уплотнения работоспособное, если превышает — неработоспособное.

Более точную оценку состояния, необходимую для прогнозирования, дает показатель, определяемый по формуле

$$KTC = 1 - (M_m - M_{m \min}) / (M_p - M_{m \min}),$$

где КТС — коэффициент технического состояния поршневого уплотнения;  $M_{m \min}$  — минимальное значение параметра  $M_m$ , принимаемое равным 2,5 %.

Диапазон изменения КТС — от 1 до 0. Коэффициент равен 1, если текущее значение параметра  $M_m$  равно минимуму ( $M_m = M_{m \min}$ ) или меньше его ( $M_m < M_{m \min}$ ). Коэффициент равен 0, если текущее значение параметра  $M_m$  равно предельно допустимому ( $M_m = M_p$ ) или превышает его ( $M_m > M_p$ ).

Для расходных характеристик, представленных на рис. 2, значения КТС составляют: для случая (а) КТС = 1; для (б) КТС = 0,6; для (в) КТС = 0,08; для (г) КТС = 0.

При организации планового диагностирования периодическое измерение значений КТС позволяет прогнозировать изменение состояния уплотнения на период до следующего диагностического обследования.

В табл. 3 приведено сравнение возможностей двух известных способов диагностирования поршневых уплотнений и предлагаемого способа.

Первый способ основан на измерении максимального давления сжатия, которое достигается в ВМТ или в нескольких градусах до ВМТ. В момент достижения максимума давления заканчивается первая фаза истечения, а вторая находится в начале своего развития. Следовательно, диагностический параметр первого способа не учитывает вторую фазу истечения и поэтому недостаточно чувствителен к изменению состояния уплотнения.

Второй способ основан на измерении расхода воздуха через неподвижное уплотнение. При

Таблица 3

Возможности различных способов диагностирования поршневых уплотнений

№	Способ диагностирования	Возможность оценки истечения воздуха по фазам	
		Первая фаза	Вторая фаза
1	По максимальному давлению сжатия	да	нет
2	Пневмоиндицирование	да	нет
3	По расходной характеристике	да	да

неподвижном уплотнении отсутствуют перемещения колец, характерные для второй фазы истечения. Пневмоиндицирование не моделирует вторую фазу истечения. Его результат не учитывает наличие этой фазы.

Способ, основанный на определении расходной характеристики утечек, учитывает обе формы истечения. Благодаря этому он более чувствителен к изменению состояния уплотнения.

#### Заключение

1. Разработан и опробован метод диагностирования, основанный на определении расходной характеристики утечек через поршневое уплотнение ДВС, рассчитанных при обработке индикаторной диаграммы цилиндра с выключенной подачей топлива.

2. Определены параметры расходной характеристики поршневого уплотнения и установлена их связь с неисправностями деталей уплотнения.

3. Предложен показатель, пригодный для текущего контроля технического состояния поршневого уплотнения и прогноза его изменения до следующего диагностического обследования.

4. Показано преимущество диагностирования состояния уплотнения по расходной характеристике утечек относительно известных способов.

#### Литература

1. Голуб Е.С., Мадорский Е.З., Розенберг Г.Ш. Диагностирование судовых технических средств: Справочник. — М.: Транспорт, 1993. — 150 с.
2. Семенов В.С., Трофимов П.С. Долговечность цилиндропоршневой группы судовых дизелей. — М.: Транспорт, 1969. — 216 с.
3. Кончаев В.И., Шелученко В.М. Ремонт судовых дизелей. — М.: Транспорт, 1965. — 390 с.