

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ПНЕВМОПЛОТНОСТИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. И. КОЦУБА, Е. В. СУЛИМА, Р.С. ДАРГЕЛЬ

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: tech_service@baa.by

В. М. КУЗИОР

УВО «Брянский государственный аграрный университет»,
г. Брянск, Российская Федерация, 243365, kvming@gmail.com

(Поступила в редакцию 28.06.2021)

Для диагностирования цилиндропоршневой группы (ЦПГ) широкое распространение получила оценка пневмоплотности цилиндра пневмотестером. Однако пневмотестеры разных производителей имеют рабочее давление от 1 до 6 бар и показывают разную величину утечек в одних и тех же условиях. Второй проблемой является определение причины снижения пневмоплотности. Для повышения точности определения причины снижения пневмоплотности предлагается выполнять два измерения – при положении поршня в ВМТ и в средней зоне цилиндра. При износе ЦПГ или залегании колец герметичность цилиндра в зоне ВМТ будет ниже, чем в средней зоне цилиндра. При нарушении герметичности клапанов изменения пневмоплотности по высоте цилиндра наблюдаться не будет.

В статье приведены результаты исследования пневмоплотности цилиндропоршневой группы дизельного двигателя в зависимости от положения поршня и давления подаваемого в цилиндр воздуха. На лабораторной установке исследовалась цилиндропоршневая группа двигателя D-260 в шести положениях поршня $h = 0 \dots 80$ мм от ВМТ и при давлении воздуха $P_1 = 1 \dots 6$ бар. Результаты опытов показали, что герметичность изношенной цилиндропоршневой группы в зоне ВМТ при давлении подаваемого воздуха 1 бар на 12,8 % ниже, чем в средней части цилиндра. С повышением давления до 6 бар разность герметичности по высоте цилиндра снижается до 3,2 ... 6,3 %. Зависимости утечек в ЦПГ от давления подаваемого воздуха показали, что утечки в зоне ВМТ снижаются с 25,3 % (при давлении подаваемого воздуха 1 бар) до 12,6 % (при давлении 5 бар). В остальной части цилиндра величина утечек увеличивается с 12,5% (при давлении 1 бар) до 9,1 ... 10,2 % (при давлении 5 бар).

Таким образом, подтверждена гипотеза о зависимости герметичности изношенной цилиндропоршневой группы от положения поршня, что позволяет более точно определять причину ее нарушения. Низкое давление подаваемого воздуха показывает большую информативность измерения, а высокое давление показывает большую стабильность измерения.

Ключевые слова: цилиндропоршневая группа, поршень, пневмоплотность, давление, диагностирование.

To diagnose the cylinder-piston group (CPG), the assessment of the pneumatic density of the cylinder with a pneumotester has become widespread. However, pneumatic testers from different manufacturers have an operating pressure of 1 to 6 bar and show different leak rates under the same conditions. The second problem is to determine the cause of the decrease in pneumatic density. To improve the accuracy of determining the cause of the decrease in pneumatic density, it is proposed to perform two measurements – with the piston position at TDC and in the middle zone of the cylinder. With the wear of the CPG or the occurrence of rings, the tightness of the cylinder in the TDC zone will be lower than in the middle zone of the cylinder. If the tightness of the valves is violated, there will be no change in the pneumatic density along the height of the cylinder.

The article presents results of a study of the pneumatic density of the cylinder-piston group of a diesel engine, depending on the position of the piston and the pressure of the air supplied to the cylinder. On a laboratory setup, the cylinder-piston group of the D-260 engine was investigated in six positions of the piston $h = 0 \dots 80$ mm from TDC and at an air pressure $P_1 = 1 \dots 6$ bar. The results of the experiments showed that the tightness of the worn-out cylinder-piston group in the TDC zone at a supply air pressure of 1 bar is 12.8 % lower than in the middle part of the cylinder. With an increase in pressure to 6 bar, the difference in tightness along the height of the cylinder decreases to 3.2 ... 6.3 %. The dependences of leaks in the CPG on the pressure of the supplied air showed that the leaks in the TDC zone are reduced from 25.3 % (at a supply air pressure of 1 bar) to 12.6 % (at a pressure of 5 bar). In the rest of the cylinder, the leak rate increases from 12.5 % (at a pressure of 1 bar) to 9.1 ... 10.2 % (at a pressure of 5 bar).

Thus, the hypothesis about the dependence of the tightness of the worn-out cylinder-piston group on the position of the piston has been confirmed, which makes it possible to more accurately determine the cause of its violation. A low supply air pressure indicates a more informative measurement, and a high pressure indicates a more stable measurement.

Key words: cylinder-piston group, piston, pneumatic density, pressure, diagnostics.

Введение

В процессе эксплуатации автотракторных двигателей своевременная проверка и прогнозирование технического состояния их систем и механизмов является главным условием обеспечения эффективности и эксплуатационной надежности. В самых тяжелых условиях в двигателе работает цилиндропоршневая группа. Ее детали выполняют наиболее ответственные функции в рабочем процессе двигателя. Так, поршневые кольца и гильзы должны создавать достаточно герметичное рабочее пространство цилиндра, интенсивно отводить теплоту от поршней в систему охлаждения, маслоотъемные

кольца должны обеспечивать образование равномерной масляной пленки на трущихся поверхностях и не допускать попадания масла в камеру сгорания [1].

По мере изнашивания цилиндропоршневой группы, а также при закоксовывании колец или их поломке герметичность рабочего объема цилиндра становится недостаточной.

Утечки из-за нарушения герметичности ЦПГ приводят к уменьшению давления и температуры сжатого воздуха смеси в конце такта сжатия. Следствием этого являются затрудненный пуск (топливо не самовоспламеняется) и перебои в работе двигателя.

При сгорании топливоздушного смеси газы под большим давлением прорываются в картер, откуда выходят в атмосферу через сапун. Из-за повышенного прорыва газов уменьшается давление их на поршень, что приводит к снижению мощности двигателя.

С износом деталей, потерей упругости колец увеличивается количество масла, проникающего в надпоршневое пространство и сгорающего там под действием высокой температуры. Попадание масла в камеру сгорания вызывает образование нагара на днищах поршней и головке цилиндров и затрудняет отвод теплоты через стенки цилиндров. Сгорание масла изменяет цвет отработавших газов – они становятся синеватого цвета [1].

Поэтому в процессе эксплуатации машин оценке технического состояния ЦПГ необходимо уделять особое внимание.

Основная часть

Диагностирование ЦПГ производится по внешним признакам и инструментальным методом. Для оценки текущего состояния цилиндропоршневой группы двигателей наибольшее распространение получили следующие методы диагностики – измерение компрессии, расхода картерных газов, величины утечек из камеры сгорания.

Диагностирование состояния ЦПГ по внешним признакам осложняется тем, что имеется взаимовлияние неисправностей механизмов и систем двигателя. Причиной попадания масла в камеру сгорания кроме ЦПГ может быть износ или потеря эластичности маслосъемных колпачков, износ турбокомпрессора, коробление головки блока цилиндров, пробой прокладки и др. Мощность двигателя зависит от состояния и регулировок топливного насоса высокого давления и форсунок, угла опережения впрыска топлива, состояния воздушного фильтра и турбокомпрессора и др. Следовательно при диагностировании ЦПГ необходимо убедиться в исправности других механизмов и систем двигателя.

В практике диагностирования ЦПГ наибольшее распространение измерение расхода картерных газов, компрессии и герметичности камеры сгорания.

Оценка состояния ЦПГ по расходу картерных газов имеет недостаточную точность из-за утечек газов через уплотнения и вибрации двигателя. Кроме того, данный метод не позволяет определить отдельный неисправный цилиндр и конкретные причины снижения работоспособности ЦПГ [2].

Основным недостатком диагностирования состояния ЦПГ измерением компрессии является зависимость показаний компрессометра от частоты вращения коленчатого вала. При этом частота вращения коленчатого вала при прокрутке стартером ($250\text{--}350\text{ мин}^{-1}$) существенно отличаются от частоты вращения в режиме холостого хода ($700\text{--}900\text{ мин}^{-1}$) и еще больше в режимах частичных и полных нагрузок. Из-за интенсивного движения поршня при прокрутке стартером проблематично выявление небольшого износа ЦПГ. Проблемой является также невозможность диагностирования ЦПГ на демонтированном, частично разобранным двигателе или двигателе с неработающим стартером. Кроме того, данный метод также не позволяет определить конкретные причины снижения работоспособности ЦПГ [3].

Косвенно состояние ЦПГ можно оценить измерением тока потребления стартером в режиме прокрутки двигателя. Чем герметичнее надпоршневое пространство цилиндра, тем больше будет давление сжимаемого воздуха и сопротивление вращению двигателя, следовательно, больший ток потребляет стартер для проворачивания коленчатого вала [4]. Однако на потребляемый ток влияет не только состояние ЦПГ, но и состояние стартера, кривошипно-шатунного механизма, проводки и др.

Диагностирование ЦПГ анализом продуктов износа в системе смазки с оценкой числа, концентрации частиц и их химического состава. При нормальном износе обнаруживаются частицы размером до 15 мкм и толщиной до 1 мкм . Начало интенсивного изнашивания сопровождается увеличением концентрации частиц и их размера до 50 мкм и появлением определенной их формы: осколки, пластины неправильной формы, стружка [5].

Площадь рабочей поверхности цилиндров двигателя Д-243 составляет $172787,60\text{ мм}^2$, а для двигателя Д-260 – $259181,39\text{ мм}^2$. При максимальном износе рабочей поверхности цилиндров $0,4\text{ мм}$ объем

снятого в процессе износа металла составит $3456,59 \text{ мм}^3$ (массой $266,045 \text{ г.}$) для двигателя Д-243 или $5184,88 \text{ мм}^3$ (массой $399,068 \text{ г.}$) – для двигателя Д-260.

Недостатком данного метода является то, что данный способ не может конкретно подтвердить наличие износа гильз цилиндров и поршневых колец, так как в двигателе присутствуют другие трущиеся пары механизмов КШМ и ГРМ, которые также могут давать продукты износа в процессе работы.

Кроме того, в двигателях предусмотрена периодическая замена масла и масляных фильтров. Периодичность замены масла в двигателях минского моторного завода составляет 250 часов наработки, в двигателях Deutz – 500 часов наработки. Следовательно, анализ масла покажет наличие процесса износа, но не может показать величину этого износа с начала наработки двигателя. Для определения величины износа и ресурса двигателя необходимо исследовать содержание металла в масле перед каждой его заменой для отслеживания динамики изменения этого параметра, что затруднительно реализовать в производственных условиях.

В последнее время широкое распространение получила диагностика состояния ЦПГ пневмотестером. Поршень проверяемого цилиндра выставляется в ВМТ на такте сжатия (при закрытых клапанах). В цилиндр подается сжатый воздух под фиксированным давлением и по величине падения давления оценивается пневмоплотность цилиндра [6].

Однако выпускаемые промышленностью пневмотестеры имеют рабочее давление от 1 до 6 бар и практика их использования показывает, что приборы разных производителей в одних и тех же условиях показывают разную величину утечек. Кроме того, приборы некоторых производителей не имеют жиклера между манометрами, что в принципе не позволяет выполнять диагностирование ЦПГ.

Второй проблемой диагностирования ЦПГ является определение причины снижения пневмоплотности – износ поршневых колец и гильзы цилиндра или нарушение герметичности клапанов. В руководствах по эксплуатации приборов возможную причину неисправности рекомендуется определять по направлению потока воздуха. Если весь воздух выходит через картер двигателя, это указывает на износ ЦПГ или залегание колец, а шум во впускном или выпускном коллекторе – на нарушение герметичности клапанов. Однако данный метод не всегда может быть реализован на практике [6].

Тем не менее у диагностирования ЦПГ пневмотестером имеется нереализованный потенциал повышения точности определения причины снижения пневмоплотности. Это связано с тем, что в процессе работы цилиндр двигателя изнашивается неравномерно (рис. 1). Максимальный износ наблюдается в зоне ВМТ, который для большинства двигателей легковых автомобилей составляет $0,15 \text{ мм}$, а для двигателей грузовых автомобилей и тракторов – $0,4 \text{ мм}$ [2].

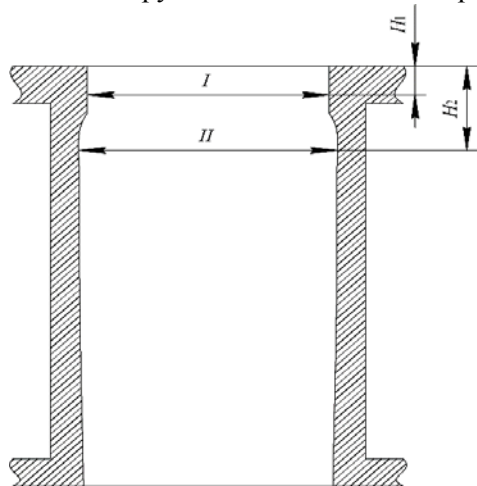


Рис. 1. Схема износа цилиндров: I – плоскость без износа; II – плоскость максимального износа

Следовательно, в процессе диагностирования необходимо выполнять два измерения – при положении поршня в ВМТ и в средней зоне цилиндра. При износе ЦПГ или залегании колец герметичность цилиндра в зоне ВМТ будет ниже, чем в средней зоне цилиндра. При нарушении герметичности клапанов изменения пневмоплотности по высоте цилиндра наблюдаться не будет.

В процессе лабораторных исследований ставилась цель определить зависимость пневмоплотности цилиндропоршневой группы дизельного двигателя от положения поршня и давления подаваемого в цилиндр воздуха.

Для исследования пневмоплотности цилиндропоршневой группы разработана лабораторная установка (рис. 2), которая представляет собой основание 1 с зафиксированной на ней гильзой 2, установ-

ленной между нижней 5 и верхней 4 крышками. Герметичность цилиндра обеспечивается установкой между цилиндром и крышками резиновой прокладки и стягивании крышек шпильками 6.

Внутри гильзы помещен поршень 3, высота установки которого изменяется при помощи винта 7. Высота установки поршня отслеживается по линейке 8, причем отметка «0» на линейке соответствует положению поршня в верхней мертвой точке, а «110» – в нижней мертвой точке.

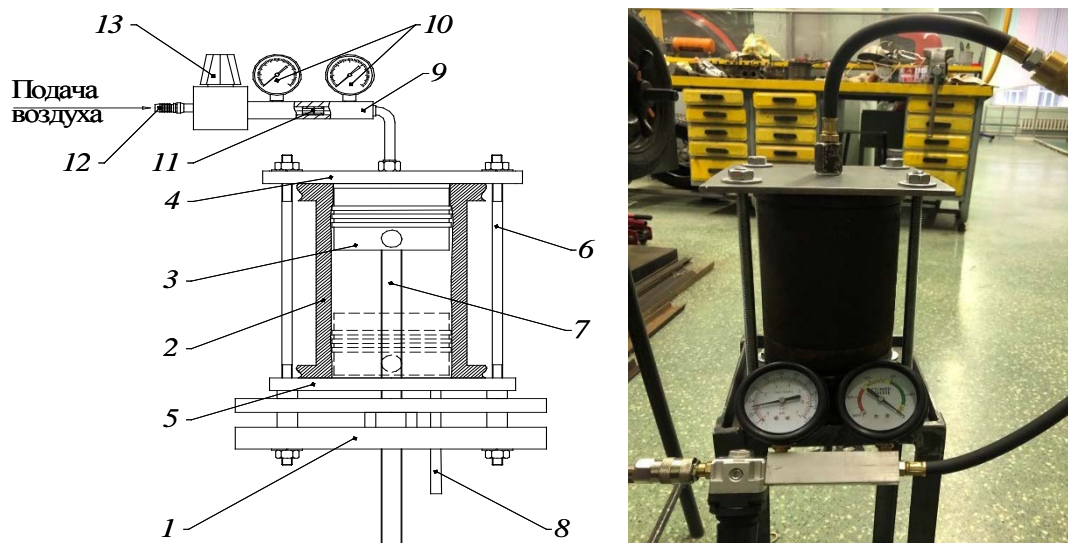


Рис. 2. Схема и общий вид лабораторной установки для измерения пневмоплотности цилиндропоршневой группы:
 1 – основание; 2 – цилиндр; 3 – поршень; 4 – крышка верхняя; 5 – крышка нижняя; 6 – шпильки;
 7 – винт регулировки положения поршня; 8 – линейка; 9 – корпус пневмотестера; 10 – манометр;
 11 – жиклер; 12 – патрубок подачи сжатого воздуха; 13 – дроссель

В надпоршневое пространство через штуцер подается воздух, а подпоршневое пространство связано с атмосферой. В конструкцию пневмотестера были внесены изменения, позволяющие проводить измерения с жиклерами 11 различного диаметра (от 0,4 до 2,0 мм) и манометрами 10, имеющими рабочее давление от 1 до 6 бар.

Исследования проводились на цилиндропоршневой группе двигателя Д-260. Измерения выполнялись в шести положениях поршня от ВМТ: $h = 0$ мм (ВМТ), $h = 5$ мм, $h = 10$ мм, $h = 20$ мм, $h = 50$ мм и $h = 80$ мм. Через штуцер в надпоршневое пространство подавался воздух под давлением P_1 от 1 до 6 бар. Измерение на пневмоплотность цилиндропоршневой группы осуществлялось по падению давления на втором манометре пневмотестера. Замер производился в трехкратной повторности, при фиксированном положении поршня.

Зависимость герметичности изношенной цилиндропоршневой группы от положения поршня по высоте цилиндра при различном давлении подаваемого воздуха представлена на рис. 3.

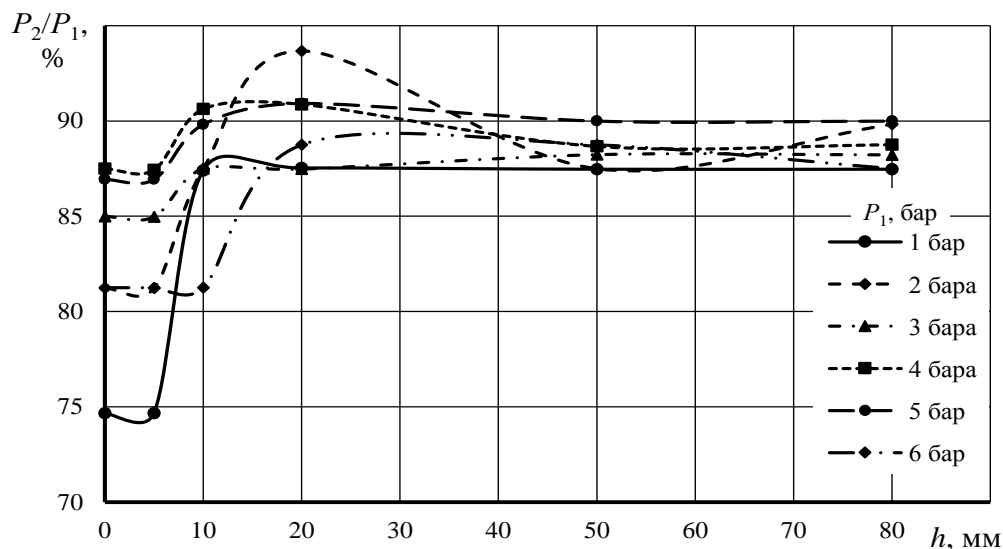


Рис. 3. Зависимость герметичности цилиндропоршневой группы от положения поршня по высоте цилиндра (h) при различном давлении подаваемого воздуха (P_1)

Анализ полученных зависимостей показал, что герметичность изношенной цилиндропоршневой группы в зоне ВМТ ($h = 0 \dots 5$ мм) при давлении подаваемого воздуха 1 бар на 12,8 % ниже, чем в остальной части цилиндра. С повышением давления до 6 бар разность герметичности снижается до 3,2...6,3 %.

На рис. 4 представлена зависимость герметичности изношенной цилиндропоршневой группы от давления подаваемого воздуха при различном положении поршня по высоте цилиндра.

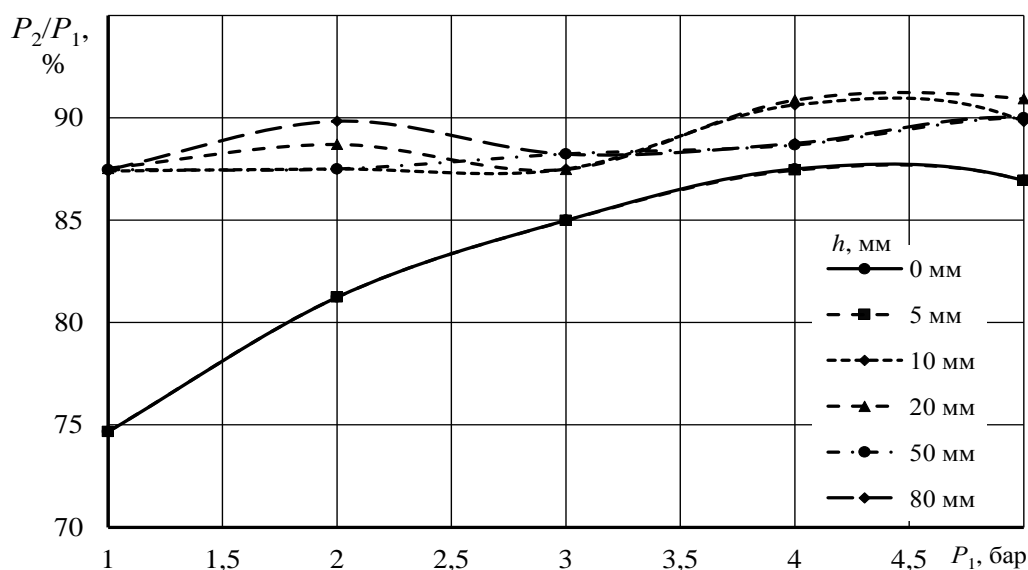


Рис. 4. Зависимость величины утечек от давления подаваемого воздуха (P_1) при различном положении поршня по высоте цилиндра (h)

Анализ полученных зависимостей показал, что при увеличении давления подаваемого воздуха утечки воздуха в зоне ВМТ ($h = 0 \dots 5$ мм) снижаются с 25,3 % (при давлении подаваемого воздуха $P_1 = 1$ бар) до 12,6 % (при давлении $P_1 = 5$ бар). В остальной части цилиндра величина утечек воздуха увеличивается с 12,5% (при давлении $P_1 = 1$ бар) до 9,1...10,2 % (при давлении $P_1 = 5$ бар).

Причиной различия зависимости утечек от давления воздуха в изношенной и неизношенной части цилиндра является то, что в зоне ВМТ утечки воздуха происходят через замки колец и через зазор между кольцами и стенкой цилиндра. В средней части цилиндра утечки воздуха происходят через замки колец.

Снижение утечек при увеличении давления воздуха обусловлено тем, что режим течения газов зависит от соотношения сил инерции и сил вязкости (внутреннего трения) в потоке, которое выражается критерием Рейнольдса [7]:

$$Re = \frac{dv\rho}{\mu}, \quad (1)$$

где d – внутренний диаметр канала (условный диаметр зазоров ЦПГ), м; v – скорость воздушного потока, м/с; ρ – плотность среды, кг/с; μ – динамическая вязкость среды, Па·с.

Процесс истечения газа через сужающие устройства можно считать адиабатическим (отвод или подвод тепла отсутствует). В этом случае плотность газа меняется по адиабате:

$$\rho = \rho_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (2)$$

где ρ_1 – начальная плотность газа, кг/с; P_1 и P_2 – давление воздушного потока до и после отверстия, Па; k – показатель адиабаты, зависящий от типа газа, его температуры и давления.

Пропускная способность отверстия зависит от отношения давлений и снижается пропорционально уменьшению соотношения $\frac{P_2}{P_1}$.

Таким образом, в результате лабораторных опытов подтверждена гипотеза о зависимости герметичности изношенной цилиндропоршневой группы от положения поршня, что позволяет более точно определять причину нарушения герметичности цилиндра.

Низкое давление подаваемого воздуха показывает большую информативность измерения, за счет более широкого изменения пневмоплотности в зоне ВМТ по сравнению со средней частью цилиндра и меньшего изменения плотности воздуха, истекающего через зазоры ЦПГ.

Заключение

В результате лабораторных опытов подтверждена гипотеза о зависимости герметичности изношенной цилиндропоршневой группы от положения поршня, что позволяет более точно определять причину нарушения герметичности цилиндра. Кроме того, низкое давление подаваемого воздуха показывает большую информативность измерения, в то время как высокие давления показывают большую стабильность измерения.

Для определения причины снижения пневмоплотности необходимо выполнять два измерения – при положении поршня в ВМТ и в средней зоне цилиндра при давлении подаваемого воздуха 1...2 бар. При износе ЦПГ или залегании колец герметичность цилиндра в зоне ВМТ при давлении подаваемого воздуха 1 бар на 12,8 % ниже, чем в средней части цилиндра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Совершенствование методики и средств диагностирования дизельных двигателей / С. И. Будко [и др.] // Сельский механизатор. – 2020. – №1. – С. 36–40.
2. Диагностика и техническое обслуживание машин: лаб. практикум. В 6 ч. Ч. 1 / Г.С. Дубовик [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2009. – 96 с.
3. Повреждения поршней и их причины [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://www.ms-motorservice.com/ru/tekhnipedija/post/povrezhde-nija-porshnei-i-ikh-prichiny/>. – Дата доступа: 09.01.2021.
4. Оценка технического состояния двигателей внутреннего сгорания по току, потребляемому стартером при прокрутке двигателя / А. А. Бабошин, А. С. Косарев, В. С. Малышев. – Вестник МГТУ. – Том 16. – №1. – 2013. – С. 33–39.
5. Минаков, В. А. Совершенствование технологии диагностирования тепловозного дизеля по результатам контроля содержания продуктов износа в моторном масле: дис. канд. техн. наук. / В. А. Минаков. – Омск: Омский ГУПС, 2018. – 152 с.
6. Force. Тестер герметичности (утечек) цилиндра [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: <https://toolsclub.com.ua/force-tester-germetichnosti-utechek-cilindra-p-9259.html> / – Дата доступа: 02.03.2020.
7. Чухарева, Н. В. Определение количественных характеристик нефти и газа в системе магистральных трубопроводов: учебное пособие / Н. В. Чухарева, А. В. Рудаченко, В. А. Поляков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 311 с.