

УДК 629.054

Импульсно-силовой способ оценки технического состояния цилиндрико-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания*Курносов А.Ф., Гуськов Ю.А.**Новосибирский государственный аграрный университет***Аннотация**

В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию нового диагностического параметра при оценке технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания в режиме прокрутки стартером. В современных условиях большое значение придается повышению эффективности диагностирования двигателей при эксплуатации транспортных средств сельскохозяйственного назначения за счет использования цифровых измерительных средств.

Предложенный безразборный метод оценки герметичности цилиндропоршневой группы позволит автоматизировать процесс диагностирования и снизить непроизводительные простои машин при проведении диагностических операций

Ключевые слова: ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, ДИАГНОСТИРОВАНИЕ, КОМПРЕССИЯ, ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЕ, УСИЛИЯ НА ОПОРАХ, ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВАЯ ГРУППА

Одним из недостатков современных встроенных систем диагностирования авто-тракторных двигателей является низкий уровень приспособленности к оценке технического состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ). По существующим, наиболее распространенным методикам диагностирования [1, 2], оценку работоспособности ЦПГ проводят путем измерения компрессии при частичной разборке двигателя, что увеличивает трудоемкость диагностирования и приводит к непроизводительным простоям машин.

С целью снижения трудоемкости при диагностировании цилиндропоршневой группы в качестве диагностического параметра авторы [3, 4] предлагают использовать силу тока, потребляемую стартером в режиме прокрутки двигателя. Согласно результатам

исследований, применение данного способа позволит оценить на начальном этапе относительную величину компрессии при минимальных затратах труда. Недостатком данного метода является зависимость получаемых характеристик от технического состояния стартера и аккумуляторной батареи. Неисправность стартера может свидетельствовать о повышенном потреблении тока, неисправность аккумуляторной батареи – о заниженном потреблении тока.

Одним из наиболее перспективных методов оценки технического состояния ЦПГ, на наш взгляд, является метод [5] при котором в качестве диагностического параметра используются усилия на опорах двигателя, возникающие при включении стартера.

Для реализации предложенного метода диагностирования в условиях эксплуатации транспортных средств сельскохозяйственного назначения необходимо установить взаимосвязь и влияние параметров технического состояния ЦПГ на величину и характер усилий возникающих на опорах двигателя.

Программа исследований предусматривала решение следующих задач:

- обосновать диагностический параметр для контроля технического состояния ЦПГ двигателя внутреннего сгорания в режиме прокрутки стартером;
- экспериментально установить закономерности изменения величины возникающих усилий на опорах двигателя от технического состояния ЦПГ в режиме прокрутки стартером.

При прокручивании стартером коленчатого вала двигателя возникающий полезный крутящий момент M_{CT} можно представить, как сумму моментов:

$$M_{CT} = M_T + M_J + M_K, \quad (1)$$

где M_T – крутящий момент, затрачиваемый на преодоление сил трения в двигателе, Нм;

M_J – крутящий момент, затрачиваемый на ускорение движущихся частей двигателя, Нм;

M_K – крутящий момент, затрачиваемый на преодоление сил сопротивления сжатию воздуха, Нм.

Воздействие крутящих моментов на кривошипно-шатунный механизм (КШМ) двигателя приводит к возникновению разнонаправленных усилий, действие которых передается на опоры двигателя (рис. 1).

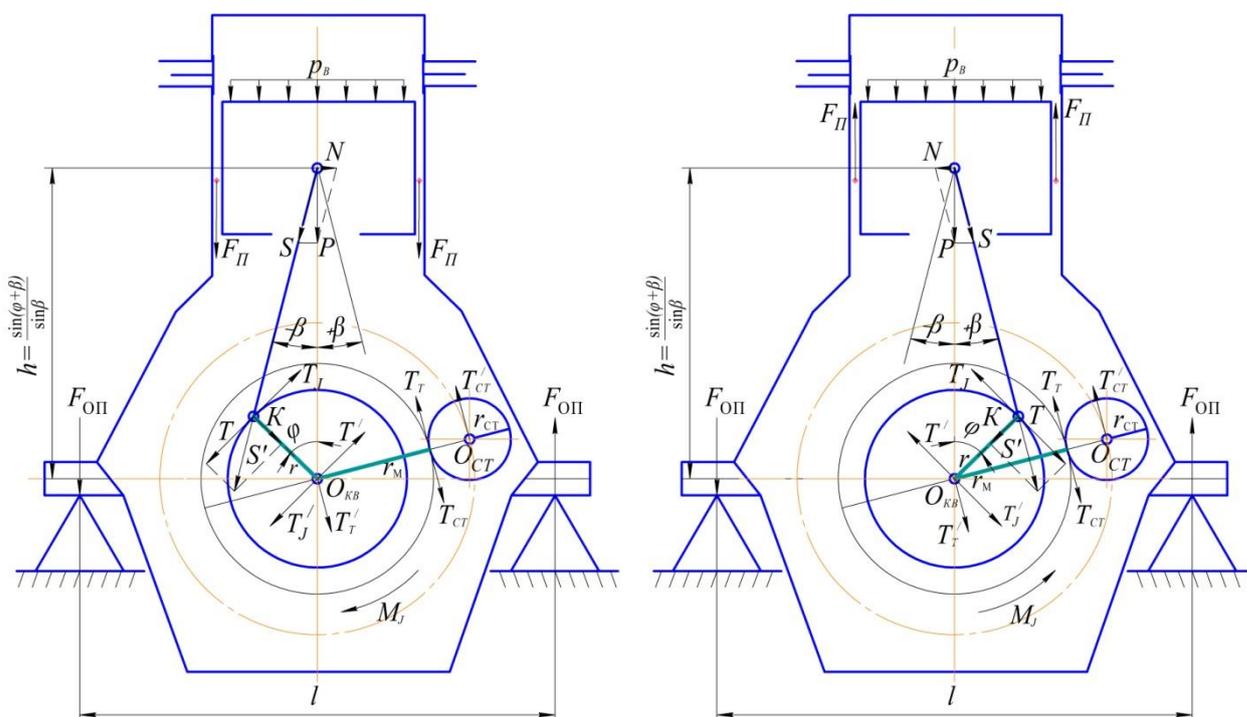


Рис. 1. Схема формирования усилий на опорах двигателя при прокрутке стартером коленчатого вала

Анализ распределения усилий, возникающих при прокрутке стартером коленчатого вала двигателя (рис. 1) показывает, что результат действия возникающих внутренних усилий воспринимают опоры двигателя. При движении поршня к верхней мертвой точке во время такта сжатия накопленным силам инерции вращающихся частей, выраженным в виде тангенциальной силы T_J , противодействует отрицательная тангенциальная сила T , которая возникает в следствии действия направленной вдоль шатуна силы S и боковой силы N , прижимающей поршень к цилиндру. В свою очередь, силы S и N образуются вследствие возникновения суммарной силы P , действующей на поршень. В конце такта сжатия тангенциальная сила T_{CT} достигает максимального значения, а кинетическая энергия вращательного движения уменьшается. При движении поршня к нижней мертвой точке происходит расширение воздуха в камере сгорания возникает положительно направленная тангенциальная сила T , совпадающая с направлением действия силы T_{CT} , что приводит к увеличению частоты вращения коленчатого вала двигателя. В рассматриваемых условиях усилия на опорах возникают вследствие суммарного воздействия на блок цилиндров боковой силы N и силы T'_{CT} , равной по величине и обратной по направлению силы T_{CT} .

Силы трения в двигателе можно разделить на силы трения поступательного движения поршней F_{Π} и вращательного движения коленчатого вала T_T . Силе трения вращательного движения в любой момент времени противодействует сила T_{CT} . Сила трения поступательного движения поршней непостоянна, увеличивается по мере увеличения скорости движения поршней и передается на опоры посредством действия боковой силы N и силы T_{CT} .

Силы инерции первого порядка и их моменты полностью уравниваются в четырехцилиндровом рядном двигателе, силы инерции второго порядка для всех цилиндров равны, направлены в одну сторону и зависят от частоты вращения коленчатого вала. [6]

При низкой частоте вращения коленчатого вала силы трения в двигателе и силы инерции второго порядка принимают минимальные значения, поэтому в расчетах могут не учитываться. Таким образом, в рассматриваемых условиях для определения усилий на опорах двигателя достаточно рассмотреть взаимное действие боковой силы N и силы T'_{CT} .

В результате действия непосредственно на блок цилиндров силы T'_{CT} , усилие на опорах можно оценить следующим образом:

$$F_{\text{оп}}^{\text{CT}} = \frac{T'_{\text{CT}}(r_{\text{М}} + r_{\text{СТ}})}{\bar{l}} = \frac{M_{\text{СТ}}}{r_{\text{СТ}}\bar{l}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{оп}}^{\text{CT}}$ – усилие, воспринимаемое опорами двигателя в результате воздействия крутящего момента стартера, Н;

$M_{\text{СТ}}$ – крутящий момент стартера, Н;

$r_{\text{М}}$ – радиус делительной окружности венца маховика, м;

$r_{\text{СТ}}$ – радиус делительной окружности шестерни привода стартера, м;

\bar{l} – среднее расстояние между опорами двигателя, м.

Выражение (2) справедливо для случая равномерного движения коленчатого вала, когда угловая скорость вращающихся частей кривошипно-шатунного механизма остается постоянной. В действительности на такте сжатия каждого цилиндра наблюдается замедление вращения коленчатого вала, при этом расходуется значительная часть кинетической энергии вращающихся частей на осуществление сжатия воздуха. Возникающие силы передаются на блок цилиндров посредством действующей боковой силы N , которая создает крутящий момент на опорах, направленный противоположно действию силы F_{CT} .

В результате действия силы N усилие на опорах возникают импульсно-силовых характеристики, величину которых можно определить следующим образом:

$$F_{\text{оп}}^{N_i} = N h \bar{l}^{-1} = P \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta} r \bar{l}^{-1} \text{tg} \beta = p_{\varphi} S_{\text{п}} \frac{r \sin(\varphi + \beta)}{\bar{l} \cos \beta}, \quad (3)$$

p_{φ} – текущее давление в цилиндре, МПа;

$S_{\text{п}}$ – площадь поршня, м²;

r – радиус кривошипа, м;

φ – угол поворота коленчатого вала, град.;

β – угол отклонения оси шатуна в плоскости его качания в сторону от оси цилиндра, град.

Учитывая тот факт, что масса вращающихся и перемещающихся возвратно-поступательно частей будет меньше массы блока цилиндров, формулу (3) необходимо дополнить коэффициентом инерционности системы k_J :

$$k_J = \frac{J_{\text{КВ}}}{J_{\text{ДВС}}}, \quad (4)$$

где $J_{\text{КВ}}$ – момент инерции вращающихся частей двигателя, приведенный к оси вращения коленчатого вала, кг·м²;

$J_{\text{ДВС}}$ – момент инерции неподвижных частей двигателя, приведенный к оси вращения коленчатого вала, кг·м²;

Таким образом, в режиме прокрутки стартером коленчатого вала совокупное влияние боковой силы N и величины тангенциальной силы $T'_{\text{СТ}}$ можно охарактеризовать следующим образом:

$$F_{\text{оп}} = k_J \left(p_{\varphi} S_{\text{п}} \frac{r \sin(\varphi + \beta)}{\bar{l} \cos \beta} + \frac{M_{\text{СТ}}}{r_{\text{СТ}} \bar{l}} \right), \quad (5)$$

Экспериментальные исследования проводились на четырехтактном рядном четырехцилиндровом дизельном двигателе Д-240, имеющем простую конструкцию и широкое применение на транспортных средствах сельскохозяйственного назначения. Так как передняя часть двигателя Д-240 соединена с остовом через балансирующую опору, то тензометрические датчики 1 (см. рис. 2) для определения усилий, возникающих на опорах двигателя, устанавливались под задние опоры. Сигналы низкого напряжения тензометриче-

ских датчиков предварительно усиливались в преобразователях сигнала 2. Измерение текущего давления в цилиндре проводилось с помощью датчика давления 3, который устанавливался вместо форсунки. Перевод информации от датчиков в цифровой вид и регистрацию усиленного напряжения тензодатчиков проводили в блоке диагностики 4 и соединенном с ним компьютере 5. Обработку полученных цифровых данных проводили на компьютере с помощью пакета прикладных программ, входящих в комплект диагностического комплекса «Дизель-тестер МТ10Д». Для перевода полученного значения величины выходного напряжения из преобразователя сигнала тензодатчика в единицы измерения силы устанавливали вспомогательную эмпирическую зависимость. Исходные данные для этого получали на предварительных испытаниях, измеряя величину напряжения с помощью блока АД-4Д, а текущее значение усилия, приложенного к тензодатчику, определяли с помощью тензометрической станции ZET 017-T8.

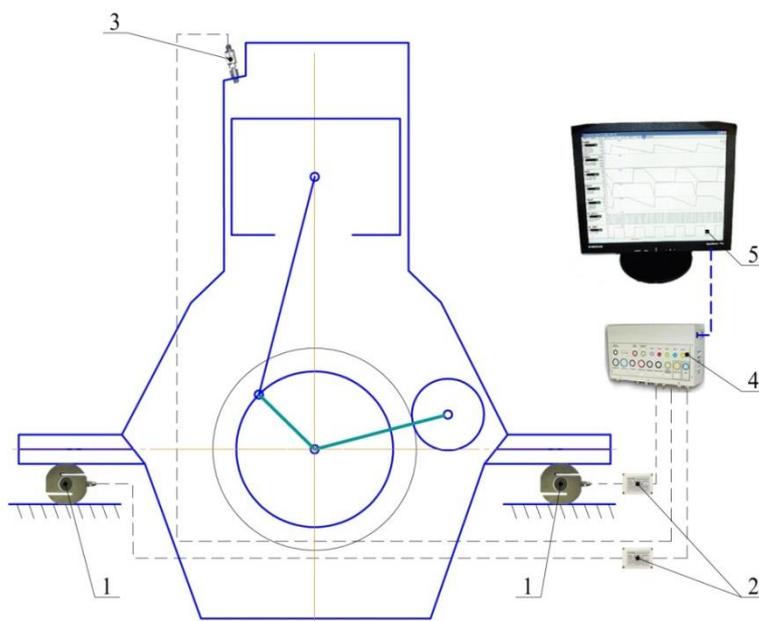


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Порядок проведения экспериментов следующий. Пускали и прогревали двигатель до температуры 90 °С, (при снижении температуры менее 78 °С двигатель вновь пускали и прогревали до исходной температуры). Степень прогрева двигателя определяли с помощью тепловизора Testo 871. Перед экспериментом двигатель останавливали, демонтировали форсунки и в место форсунки исследуемого цилиндра устанавливали датчик давления 3 (рис. 2). При достижении температуры двигателя 82 °С прокручивали стартером ко-

ленчатый вал и регистрировали измеряемые параметры. Для остальных цилиндров испытания проводили аналогичным образом. При проведении испытаний в случае, когда форсунки остальных цилиндров не демонтировали, исследования проводили аналогичным образом.

При проведении экспериментальных исследований предварительно проводилось измерение давления в конце такта сжатия каждого цилиндра, результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Давление в конце такта сжатия по цилиндрам при прокрутке стартером, кгс/см²

Номер цилиндра	Номер измерения					Среднее значение
	1	2	3	4	5	
1	31	30,9	30,8	30,9	30,9	30,9
2	27,8	27,7	27,8	27,7	27,8	27,8
3	26,4	26,5	26,5	26,4	26,5	26,5
4	28,3	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4

Анализ таблицы показывает, что давление в цилиндрах не одинаковое, при этом нормативному значению, принятому за номинальное в 30 кгс/см², соответствует только давление в первом цилиндре. Давление в конце такта сжатия третьего цилиндра имеет минимальное значение 26,4 кгс/см², что характеризует его техническое состояние как неработоспособное. При этих условиях, согласно теоретическим исследованиям, разное давление в цилиндрах должно привести к ситуации, когда на опорах двигателя можно будет синхронно зафиксировать различные значения возникающих усилий.

Результаты измерения величины усилия на опорах двигателя для каждого цилиндра отдельно при прокручивании стартером коленчатого вала представлены на рис. 3.

Как видно из рисунка, характер зависимостей достаточно полно отражает процессы формирования усилий в КШМ. Такт сжатия соответствующих цилиндров характеризуется формированием отрицательного усилия на опорах, что объясняется снижением частоты вращения коленчатого вала и кинетической энергии вращающихся частей. Изменение компрессии от 26,5 кгс/см² для третьего цилиндра до 30,9 кгс/см² для первого цилиндра приводит к изменению усилий на опорах от минус 390 Н до минус 448 Н соответственно.

Максимальное пиковое усилие на опорах в момент такта расширения зарегистрировано для первого цилиндра и составляет 644 Н, минимальное пиковое усилие 529 Н наблюдается на такте расширения третьего цилиндра. Значения усилий на опорах для

остальных цилиндров находятся в указанном диапазоне. Формирование усилий на опорах на такте выпуска и впуска всех цилиндров происходит за счет переменных сил трения и сил инерции и подобны между собой.

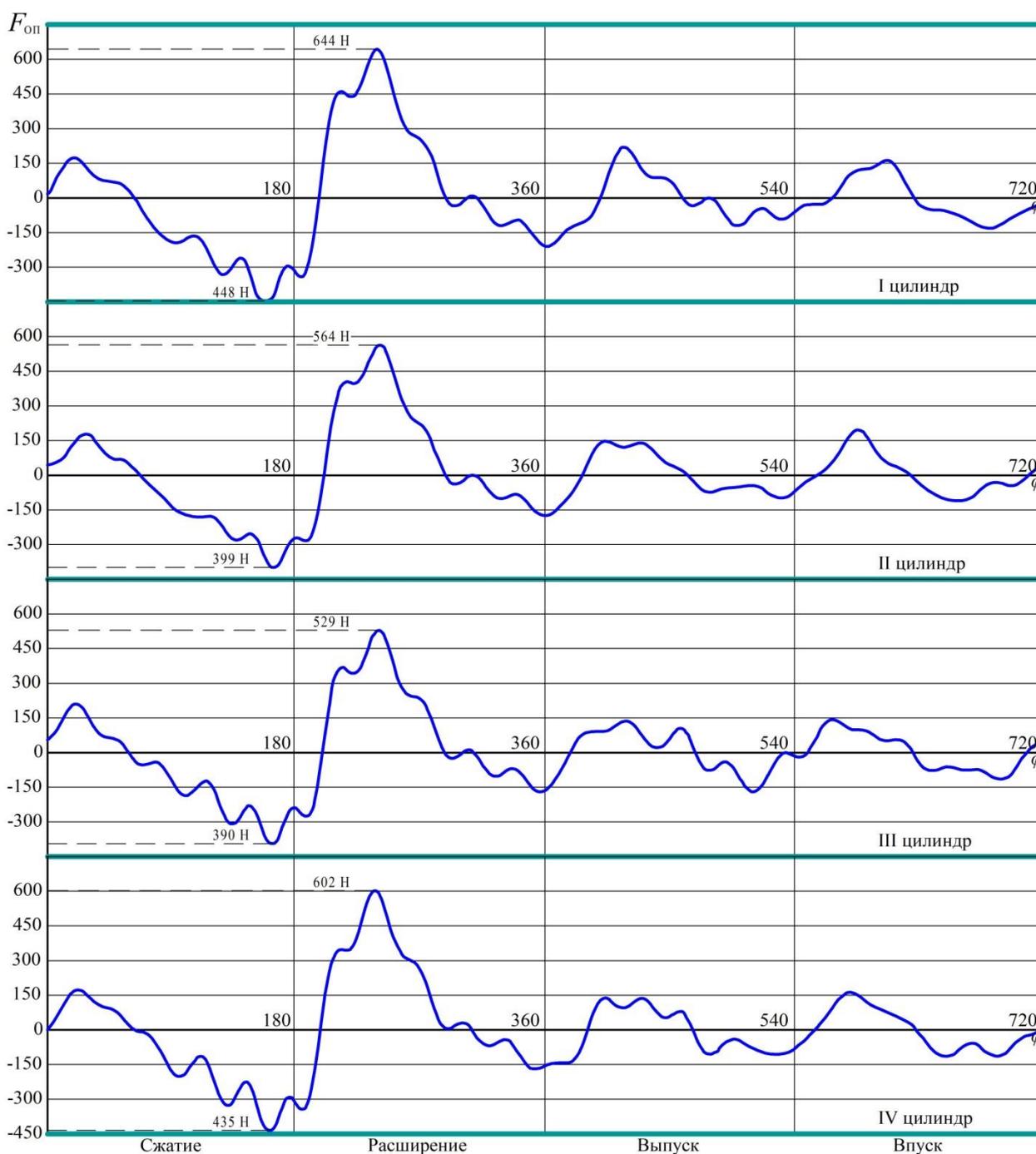


Рис. 3. Импульсно-силовые характеристики на опорах двигателя при прокрутке стартером коленчатого вала (топливные форсунки не диагностируемых цилиндров установлены)

Для практического использования предложенного метода наибольший интерес представляет процесс формирования усилий на опорах двигателя при проверке технического состояния одновременно всех цилиндров. На рис. 4 представлены результаты измерения усилий на опорах двигателя при прокручивании стартером коленчатого вала с пусковой частотой в случае, когда установлены топливные форсунки не диагностируемых цилиндров.

Анализ графика показывает, что величина усилий на опорах двигателя на такте сжатия, несмотря на различную величину компрессии в цилиндрах, практически не изменяется и колеблется в пределах от минус 505 Н до минус 530 Н. Это объясняется тем, что одновременно с тактом сжатия в исследуемом цилиндре происходит такт расширения в другом цилиндре, что несколько искажает результаты измерений. На такте расширения колебания усилий на опорах двигателя значительны от 793 Н (для первого цилиндра) до 641 Н (для третьего цилиндра) и соотносятся с величиной компрессии исследуемого цилиндра. Следует отметить, что максимальное значение возникающего на опоре усилия на такте расширения соответствующего цилиндра формируется за счет давления в надпоршневом пространстве и крутящего момента стартера, одинакового для всех цилиндров. Таким образом, в рассматриваемом варианте большему давлению в цилиндре соответствует большее усилие на опорах двигателя.

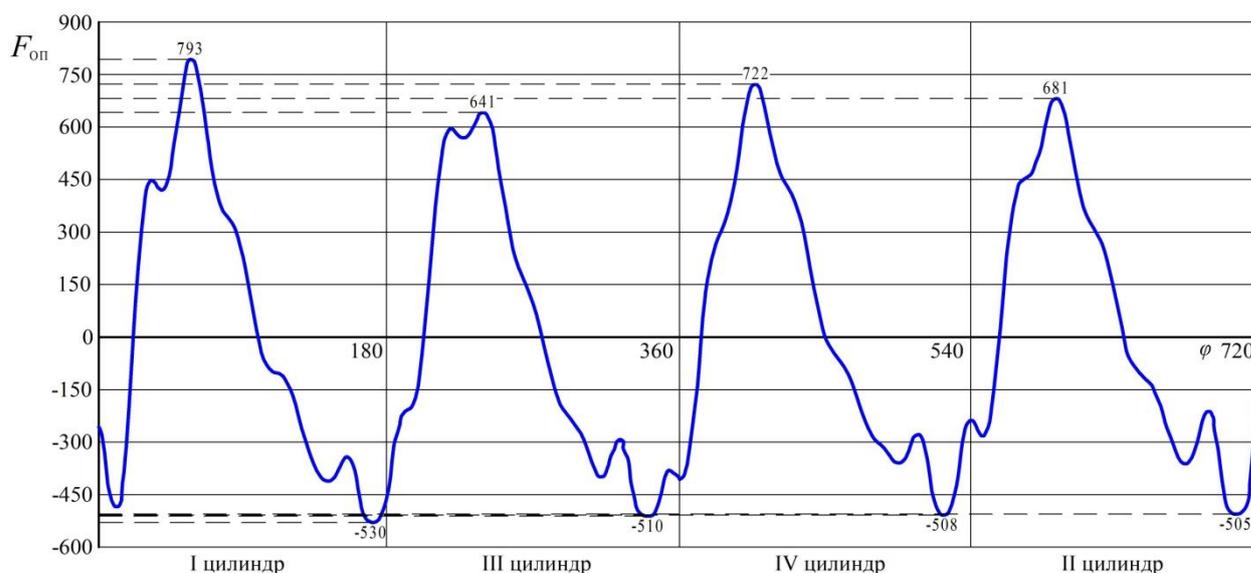


Рис. 4. Импульсно-силовые характеристики на опорах двигателя при прокрутке стартером коленчатого вала двигателя (цилиндры герметичны)

Для оценки чувствительности, стабильности и однозначности предлагаемого диагностического параметра на основании полученных экспериментальных данных проведены необходимые расчеты в соответствии с методикой [7]. Учитывая некоторые колебания значений усилий на опорах, для повышения точности расчета предварительно оценили объем выборки значений для каждого цилиндра по известной методике [8]. На основании расчетов можно сделать вывод, что предлагаемый параметр чувствителен, стабилен и однозначен. Аналогичные выводы можно сделать в результате анализа графиков на рисунке 5. Как видно из графика, максимальные усилия на опорах двигателя прямо пропорционально зависят от величины давления в цилиндрах. При этом степень рассеянности экспериментальных данных минимальна, что говорит об удовлетворительной однозначности и стабильности диагностического параметра. В случае испытаний двигателя, когда топливные форсунки остальных цилиндров не демонтированы, чувствительность диагностического параметра составляет 34,5, а для цилиндров с демонтированными форсунками – 26,4. Следовательно, точность оценки технического состояния ЦПГ при прокрутке коленчатого вала стартером в случае с установленными форсунками на оставшихся цилиндрах будет существенно больше. Таким образом, предложенный диагностический параметр позволит оценить техническое состояние цилиндропоршневой группы с высокой степенью достоверности.

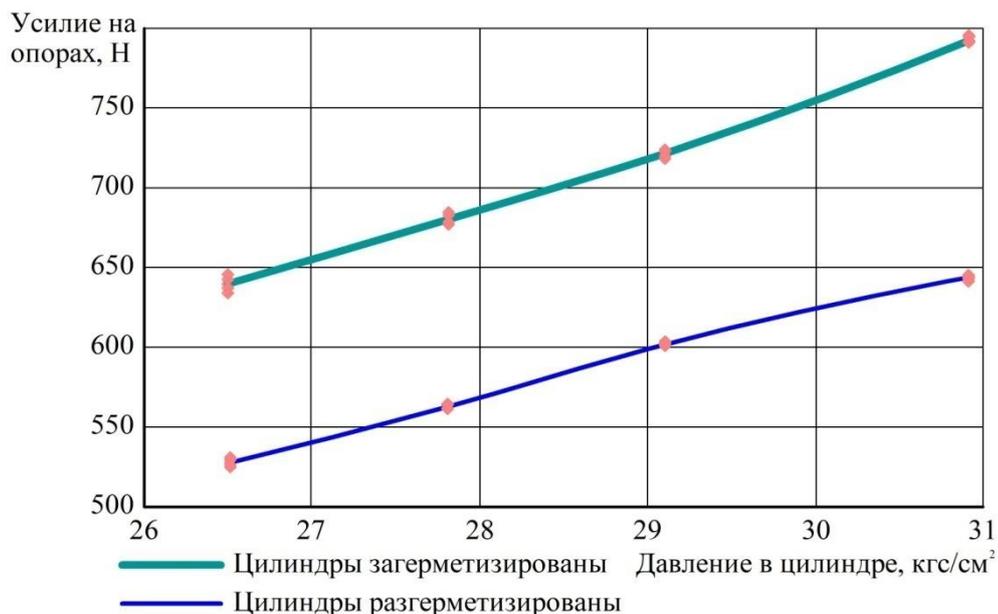


Рис. 5. Зависимость максимальных усилий на опорах двигателя от величины компрессии в цилиндрах при прокрутке стартером коленчатого вала

Выводы

На основании проведенных теоретических исследований процесса формирования усилий на опорах двигателя в режиме прокрутки стартером коленчатого вала установлено, что для оценки давления в цилиндрах возможно использовать величину импульсно-силовых характеристик, формируемых на опорах двигателя.

Полученные экспериментальные данные позволили установить, что максимальные значения усилий на опорах находятся в линейной зависимости от величины компрессии в соответствующих цилиндрах. При проведении испытаний на двигателе с загерметизированными цилиндрами, увеличение компрессии в цилиндрах с 26,5 кгс/см² для третьего цилиндра до 30,9 кгс/см² для первого цилиндра приводит к изменению усилий на опорах с 529 Н до 644 Н соответственно.

Список литературы

1. Компьютерный комплекс Дизель-тестер МТ10Д. Руководство пользователя. – Самара: НПП «НТС». – 2017. – 54 с.
2. Практикум по технической эксплуатации автомобилей: учеб. пособие для студ. учреждений высш. образования / А.А. Долгушин, Ю.Н. Блынский, Воронин Д.М. [и др.]; под. Ред. А.А. Долгушина; Новосиб. гос. Аграр. ун-т, Инженер. ин-т. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2018. – 424 с.
3. Кривцова Т.И. Совершенствование метода диагностирования компрессионных свойств дизельных двигателей тракторов и автомобилей сельскохозяйственного назначения по характеристикам стартерного тока. Дис. ... канд. техн. наук. / Т.И. Кривцова. – Иркутск, 2011. – 153 с.
4. Кривцов С.Н. Алгоритм диагностирования дизельного двигателя по характеристикам стартерного тока // Машиностроение. – 2015. – №1. – С. 41-44.
5. Пат. № 2690998 РФ, МПК G01M 15/04. Способ оценки технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания / А.Ф. Курносков, Ю.А. Гуськов, С.А. Голубь, В.А. Зейб. – № 2018130539; заявл. 22.08.2018; опубл. 07.06.2019, Бюл. № 16. – 10 с.
6. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – 4-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2008. – С. 191.
7. Малкин В.С. Техническая эксплуатация автомобилей. Теоретические и практические аспекты: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В.С. Малкин – М.: Издательский центр "Академия", 2007 – С.157-158.

Курносов А.Ф., Гуськов Ю.А. Импульсно-силовой способ оценки технического состояния
цилиндро-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

=====

8. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

=====

Цитирование:

Курносов А.Ф., Гуськов Ю.А. Импульсно-силовой способ оценки технического состояния цилиндра-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания // АгроЭкоИнфо. – 2020, №3. – http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/3/st_319.pdf