

На правах рукописи

Сучков Александр Игоревич

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ
ГРУППЫ ДВИГАТЕЛЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ДАВЛЕНИЮ ГАЗОВ В
КАРТЕРЕ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и
оборудование для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

**Научный
руководитель:**

Девянин Сергей Николаевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО
«Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

**Официальные
оппоненты:**

Неговора Андрей Владимирович,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры автомобилей и машинно-тракторных
комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский
государственный аграрный университет»

Катаев Юрий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, ведущий
научный сотрудник Лаборатории технического
обслуживания, ремонта и рециклинга
сельскохозяйственной техники ФГБНУ
«Федеральный научный агроинженерный центр
ВИМ»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государствен-
ный аграрный университет»

Защита состоится 15.02.2024 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел./факс: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «_____» декабря 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 35.2.030.03

к.т.н., доцент

Н. Н. Пуляев

Актуальность темы исследования. Высокая производительность труда в сельскохозяйственном производстве невозможна без эффективного использования мобильных машин. Основным источником механической энергии современных мобильных машин остается дизельный двигатель, и обеспечение его работоспособности является важной задачей. В процессе эксплуатации дизеля его техническое состояние изменяется и это приводит к снижению эффективности выполняемых работ. Своевременное выявление такого состояния двигателя позволит исключить непреднамеренную эксплуатацию техники и снизить расходы, связанные с эксплуатацией такой техники. Поэтому разработка методов направленных на своевременное выявление нарушений технического состояния двигателя, и в частности, его цилиндропоршневой группы (ЦПГ) является актуальной задачей.

Наибольшее распространение на тракторах РФ получили дизели типа Д-243. Основное их назначение установка на сельскохозяйственные трактора класса 1,4-2,0 т/с, а также на другие машины промышленного, сельскохозяйственного, лесозаготовительного назначения. Широко применяется на экскаваторах, погрузчиках, компрессорных станциях и электрогенераторах. Поэтому выбор двигателя типа Д-243 в качестве объекта экспериментальных исследований представляет практическую ценность для нашей страны.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами диагностирования и регулировки двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и тракторных дизелей в частности, занимались многие ученые как в России, так и за рубежом. Значительный вклад в развитие средств и методов диагностики и регулировки ДВС в России внесли Аллилуев В.А., Бельских В.И., Варнаков В.В., Варнаков Д.В., Веденяпин Г.В., Габитов И.И., Девянин С.Н., Дидманидзе О.Н., Ждановский Н.С., Катаев Ю.В., Мигаль В.Д., Михлин В.М., Неговора А.В., Черноиванов В.И., Чечет В.А., Шубин В.М. и многие другие. За рубежом развитием методов диагностирования ДВС занимались Caban J., Drożdziel P., Ignaciuk P., Kordos P., Delvecchio S., Bonfiglio P., Pompoli F., Grajales J.A., Quintero H.F, López J.F., Romero C.A., Henaо E., Cardona O., Kim H.W, Lee S.K., Xiao G.F., Qiao XQ, Huang Z., Chen Z.P., Henein N.A, Zahdeh A.R., Yassine M.K., и др.

Известны работы, в которых методика контроля и регулировки ЦПГ в условиях эксплуатации обладает высокой трудоемкостью и низкой точностью, так как требуется применение специального оборудования и частичный демонтаж двигателя. Такие способы оценки технического состояния ЦПГ остаются непригодными для непрерывного контроля двигателя в процессе эксплуатации машины. При этом существуют способы оценки состояния ЦПГ

более приспособленные к непрерывному контролю в эксплуатации, однако их применение при таких условиях мало изучено.

Цель работы: совершенствование методов оценки технического состояния цилиндропоршневой группы тракторного дизеля с использованием давления отработавших газов в картере двигателя.

Задачи исследования:

1. Провести анализ известных способов оценки технического состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя на возможность их использования для непрерывного контроля в процессе эксплуатации.

2. Разработать методики расчёта процессов оценки технического состояния ЦПГ двигателя по давлению газа в закрытом картере и программные средства для проведения расчетных исследований.

3. Провести расчетные исследования влияния режима работы ДВС и состояния ЦПГ на изменение давления газов в закрытом картере ДВС и выявить характерные режимы и параметры.

4. Создать экспериментальную установку и провести экспериментальные исследования по оценке характерных режимов работы двигателя и оценочных параметров.

5. Разработать диагностические параметры и провести экспериментальную проверку оценки состояния ЦПГ с использованием предложенных диагностических параметров.

Научная новизна

1. Разработан комплекс математических моделей для оценки технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя в эксплуатации.

2. Предложено использовать скорость нарастания давления газов в закрытом картере в качестве критерия оценки технического состояния цилиндропоршневой группы тракторного дизеля.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке математических моделей для исследования процессов, протекающих в ДВС в результате прорыва газов из цилиндров в картер многоцилиндрового двигателя, в полученных новых результатах расчетных и экспериментальных исследований двигателей типа Д-243, позволивших выявить взаимосвязи между давлением картерных газов, режимом работы двигателя и техническим состоянием ЦПГ двигателя.

Практическая ценность результатов работы заключается в том, что модернизированный метод определения технического состояния ЦПГ двигателя по расходу картерных газов позволяет достичь при хорошей точности в сравнении с известными методами возможность непрерывного контроля технического состояния ЦПГ в процессе эксплуатации машины.

Предложен критерий оценки технического состояния ЦПГ и устройство для его реализации (заявка № 20233129765).

Объектом исследования является процесс оценки технического состояния ЦПГ.

Предмет исследования заключается в выявлении закономерности изменения скорости нарастания давления в закрытом картере от технического состояния ЦПГ.

Методы исследования. Расчетное исследование выполнено с использованием методов математического моделирования рабочих процессов в двигателях с различным состоянием ЦПГ. Основные результаты расчетных исследований и достоверность математической модели процессов контроля состояния ЦПГ проверялись в ходе натурных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методики расчёта процессов оценки технического состояния ЦПГ двигателя по давлению газа в закрытом картере и программные средства для проведения расчетных исследований.

2. Результаты расчетных и экспериментальных исследований влияния режима работы ДВС и состояния ЦПГ на изменение давления газов в закрытом картере ДВС и характерные режимы и параметры.

3. Результаты оценки состояния ЦПГ с использованием предложенных диагностических критериев.

Достоверность результатов исследования базируется на всестороннем изучении выполненных ранее научно-исследовательских работ, патентов на изобретения и полезные модели по теме исследования; использовании фундаментальных законов термо- и газодинамики в исследовании процессов, происходящих в ДВС при наличии различных неплотностей в уплотнении цилиндропоршневой группы при различных режимах работы, и апробированного научно-методического аппарата; согласованностью результатов теоретических и экспериментальных исследований; наличием лабораторной базы и современного диагностического оборудования.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-практической конференциях:

1. Научный семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 25-26 января 2023 года.

2. Международная научно-техническая конференция имени А. Ф. Ульянова «Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» 3-4 октября 2023 года.

3. Международная конференция «2022 Интеллектуальные технологии и электронные устройства в транспортных средствах и дорожно-транспортном комплексе» / International Scientific Conference «2022 INTELLIGENT TECHNOLOGIES AND ELECTRONIC DEVICES IN VEHICLE AND ROAD TRANSPORT COMPLEX», Москва, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) 10-11 ноября 2022 года.

4. 26-я Московская международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы», Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 12-13 мая 2022 г.

5. Научный семинар «Чтения академика В.Н. Болтинского, Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 25-26 января 2022 года.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 5 работ, в том числе 2 статьи в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов научных исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка использованной литературы из 129 наименований, 17 из которых на иностранном языке. Работа изложена на 195 страницах, содержит 89 рисунков и 38 таблиц.

Благодарности. Выражаю огромную благодарность Академику Российской академии наук Дидманизе Отари Назировичу, за большую научную и методическую помощь в подготовке, оформлении и представлении к защите диссертационной работы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика работы, представлена актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи научного исследования, отражена научная новизна работы, а также достоверность результатов и их практическая значимость.

В первой главе проведен анализ известных способов определения состояния ЦПГ. Показано, что оценка технического состояния ЦПГ поршневого двигателя в процессе эксплуатации позволяет своевременно принять меры по устранению неисправности и уменьшить интенсивность износа двигателя и расход ГСМ. Большинство способов определения диагностических параметров требует специального оборудования и частичной разборки двигателя, что невозможно выполнить в процессе эксплуатации машины и требует ее исключения из работы. Среди разработанных способов оценки технического состояния ЦПГ имеются такие, которые могут быть использованы для непрерывного контроля состояния ЦПГ в процессе

эксплуатации машины без ее исключения из работы. К таким способам можно отнести такие, которые используют в качестве диагностического параметра расход картерных газов. По результатам анализа поставлены задачи исследований.

Во второй главе разработан комплекс методик для оценки технического состояния ЦПГ двигателя по результатам измерений давления газов в картере:

- методика расчета утечек газа из цилиндра ДВС с учетом основных параметров рабочего цикла и режима работы двигателя;
- методика расчета изменения объема картерного пространства при работе ДВС, учитывающая число и порядок работы цилиндров многоцилиндрового двигателя;
- методика экспериментального определения объема картера ДВС, основанная на регистрации изменения давления в объеме при подводе воздуха заданного расхода;
- методика расчета изменения давления газов в замкнутом пространстве картера от прорвавшихся из цилиндров газов при работе многоцилиндрового двигателя.

Методика расчета утечек через поршневые кольца основана на типовом расчете рабочего цикла ДВС, в которой определяются изменение давления $P_{ц}$ и температуры $T_{ц}$ по углу поворота вала на различных режимах работы ДВС и дополнительно производится расчет расхода газа $G_{кг}$, прошедшего через неплотности ЦПГ площадью $f_{щ}$, в соответствии с расчетной схемой, показанной на рисунке 1,а.

Массовый расход $G_{кг}$ (кг/с) для докритического режима истечений определяется по выражению:

$$G_{кг} = f_{щ} \cdot \frac{p_{ц}}{\sqrt{R \cdot T_{ц}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_{к}}{p_{ц}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_{к}}{p_{ц}} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]}, \quad (1)$$

для критического режима истечений определяется по выражению:

$$G_{кг} = f_{щ} \cdot \frac{p_{ц}}{\sqrt{R \cdot T_{ц}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa + 1} \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{2}{\kappa - 1}}} \quad (2)$$

где: R – газовая постоянная для газа, Дж/(кг·К); $f_{щ}$ – площадь сечения неплотности ЦПГ (щели), м²; κ – показатель адиабаты газа; $T_{ц}$ – температура газа в цилиндре (на входе), К. $p_{ц}$, $p_{к}$ – давление газа в цилиндре и карете, Па.

Т.к. в результате износа цилиндра и компрессионных колец возможно неплотное прилегание колец, то площадь сечения неплотности $f_{щ}$, (м²) рассматривалась в виде:

$$f_{щ} = f_{щ0} + a \times n, \quad (3)$$

где: $f_{цо}$ – площадь сечения в замке кольца, м^2 ; a – коэффициент приведения $\text{м}^2/\text{мин}^{-1}$; n – частота вращения, мин^{-1} .

Количество газа попадающего в картер двигателя в процессе протекания рабочего цикла $M_{кф}$ определяется по формуле:

$$M_{кф} = \int_0^t G_{кг} \cdot dt, \quad (4)$$

где: t – время, с.

В результате за рабочий цикл количество газа попадающего в картер двигателя $M_{кц}$ определяется по формуле при $t = t_{ц}$ (время рабочего цикла).

Пример результатов одного из таких расчетов давления в цилиндре $p_{ц}$, расхода газов $G_{кг}$ и количества прошедшего газа $M_{кф}$ в цикле по углу поворота ϕ для заданных условий работы двигателя показан на рисунок 1, б.

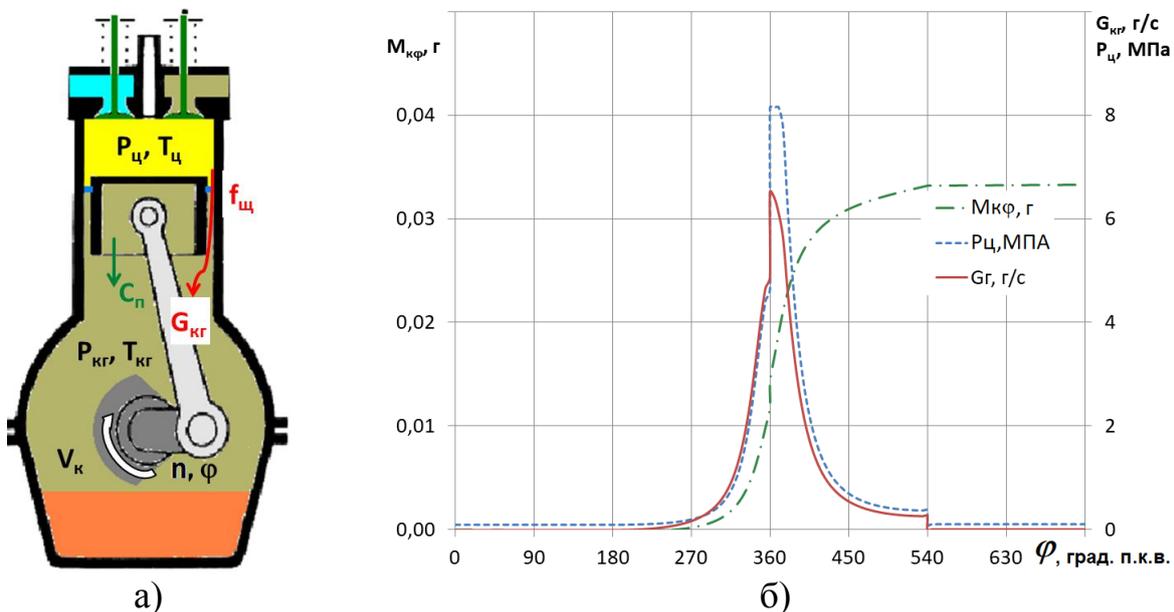


Рисунок 1 – Расчет картерных газов: а) – расчетная схема б) – пример результатов расчета $p_{ц}$, $G_{кг}$ и $M_{кф}$ за рабочий цикл двигателя

В результате движения поршня со скоростью $c_{п}$ изменяется объем, занимаемый картерными газами $V_{к}$ и в результате насосного действия поршня изменяется давление в картере $P_{кг}$.

При прекращении удаления из картера картерных газов через систему вентиляции картера, давление $P_{кг}$ в картере будет меняться по времени, и скорость изменения этого давления будет зависеть от расхода картерных газов $G_{г}$, занимаемого объема картерными газами $V_{к}$ и влияния движения поршней многоцилиндрового двигателя на этот объем.

В многоцилиндровом двигателе движение i -го поршня площадью F_n происходит со сдвигом по фазе. Величина относительного перемещения поршней в различных цилиндрах зависит от конструкции двигателя. В общем

виде при перемещении поршня в i -м цилиндре S_{pi} со сдвигом по фазе φ_i , изменение объема от движения поршней V_n может быть записано в виде:

$$V_n = F_n \cdot R \cdot \sum_{i=1}^{i_n} \left[(1 - \cos(\varphi + \varphi_i)) + \frac{\lambda_k}{4} \cdot (1 - \cos 2(\varphi + \varphi_i)) \right], \quad (5)$$

где: $\lambda_k = \frac{R}{L}$ – постоянная КШМ; R – радиус кривошипа; L – длина шатуна; i_n – количество цилиндров двигателя.

Для двигателя Д-243 максимальное значение насосного эффекта (эквивалентно объемной подаче газа) при $\varphi = 45$ град. (и повторяется через 180 град.) и на частоте вращения вала 2200 мин^{-1} составило $\sim 154 \text{ л/с}$, что почти в 100 раз больше предельного значения среднего расхода картерных газов для этого двигателя. Такие колебания могут приводить к ощутимым колебаниям давления газа в картере.

Для определения объема картерного пространства использовался эффект повышения давления в замкнутом объеме при подаче в него известного количества газа (воздуха). Изменение давления $\Delta p = (p_2 - p_1)$ в картере от количества поступившего воздуха может быть описано выражением в соответствии с уравнением состояния идеального газа:

$$\Delta p = \frac{\Delta V - \Delta V_y}{V_k} \cdot p_2, \quad (6)$$

где: $\Delta V = Q_b \cdot \Delta t$ – объем воздуха, поступившего в картер; Q_b – объемный расход поступающего воздуха; $\Delta t = (t_2 - t_1)$ – время процесса подачи воздуха в картер; ΔV_y – потери воздуха в результате утечек; V_k – объем картера.

Или после преобразований получим выражение для объема картера:

$$V_k = \frac{\Delta V - \Delta V_y}{\Delta p} \cdot p_2 \quad (7)$$

Изменение давления в процессе подачи воздуха показано на рисунке 2, где t_1, t_2, t_3 – моменты начала, окончания подачи воздуха и окончания регистрации давления, соответственно; p_1, p_2, p_3 – давление воздуха, соответствующие моментам t_1, t_2 и t_3 ; $\Delta p_y = p_2 - p_3$ – падение давления после окончания подачи воздуха.

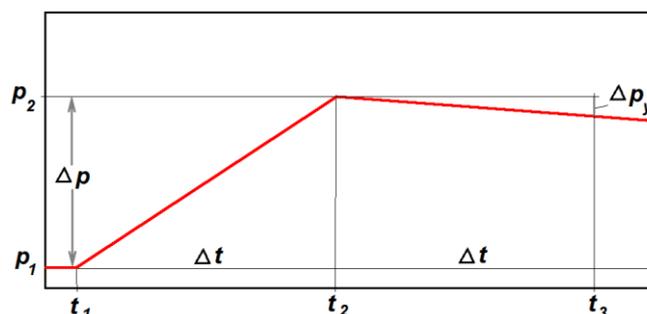


Рисунок 2 – Процесс изменения давления в картере при измерении V_k

Принимая линейное изменение расхода при утечке объем V_k :

$$V_k \approx \frac{\Delta V}{(\Delta p + 0,5 \cdot \Delta p_y)} \cdot p_2 \quad (8)$$

Расчет изменения давления газов в замкнутом пространстве картера $p_{кг}$ от прорвавшихся из цилиндров газов при работе многоцилиндрового двигателя производился путем складывания начального давления $p_{кг0}$, изменения давления от поступающих газов в картер Δp и изменения давления от насосных ходов поршней $\Delta p_{п}$:

$$p_{кг} = p_{кг0} + \Delta p + \Delta p_{п} \quad (9)$$

Изменение давления газов в закрытом картере зависит от количества поступивших газов $\Delta M_{г}$, их температуры $T_{кг}$, газовой постоянной R и объема занимаемого пространства V_k и может быть описано выражением в соответствии с уравнением состояния идеального газа в следующем виде:

$$\Delta p = \frac{\Delta M_{г}}{V_k} \cdot R \cdot T_{кг}, \quad (10)$$

Количество газа, поступающего в картер двигателя, имеющего i цилиндров, за счет утечек через неплотности по углу поворота вала φ зависит от массового расхода проходящих через неплотности газов $G_{кг}$ и определяется по выражению:

$$\Delta M_{г} = \frac{1}{6 \cdot n} \cdot \sum_{\varphi}^{i_{п}} \left(\int_0^{\varphi} G_{кг} \cdot d\varphi \right), \quad (11)$$

Изменение давления газов в закрытом картере при повороте коленчатого вала на угол φ от насосного действия поршней $\Delta p_{п}$ можно рассматривать как результат изменения объема картера на величину $V_n(\varphi)$ определяемую выражением (5). Рассматривая процесс изменения объема картера при движении поршней как процесс сжатия – расширения газа и принимая этот процесс адиабатным с показателем κ , давление в картере будет изменяться в соответствии выражением:

$$\Delta p_{п} = p_{п} - p_{кг0} = p_{кг0} \cdot \left(\frac{V_{к0}}{V_{к0} + V_{п}(\varphi)} \right)^{\kappa} - p_{кг0} = p_{кг0} \cdot \left[\left(\frac{V_{к0}}{V_{к0} + V_{п}(\varphi)} \right)^{\kappa} - 1 \right], \quad (12)$$

где: $V_{к0}$ – объем картерного пространства при $\varphi = 0$ градусов; $p_{кг0}$ – давление газов в картере при $\varphi = 0$ градусов.

На основании зависимостей (10) и (12) после подстановки в выражение (9) и преобразования получим:

$$p_{кг} = p_{кг0} + \left[\frac{\sum_{\varphi}^{i_{п}} \left(\int_0^{\varphi} G_{кг} \cdot dt \right)}{V_k} \cdot R \cdot T_{кг} + p_{кг0} \cdot \left(\left(\frac{V_{к0}}{V_{к0} + V_{п}(\varphi)} \right)^{\kappa} - 1 \right) \right] \quad (13)$$

Полученное выражение использовано для расчета давления газов в картере после перекрытия канала вентиляции картера для проверки технического состояния ЦПГ по количеству поступающих газов из цилиндров ДВС.

В третьей главе представлены результаты расчётов двигателя по разработанным методикам на разных режимах работы и с различным износом

ЦПГ. Расчеты проводились для двигателей типа Д-243 в табличном процессоре Excel Microsoft Office 2010 и результаты их анализа показали влияние на расход картерных газов двигателя режима его работы, технического состояния ЦПГ и возможность определения расхода газов по степени изменения давления в картере после перекрытия отвода газа из картера.

Анализ расхода газов через неплотности ЦПГ за рабочий цикл показывает, что максимальный расход наблюдается в зоне ВМТ при максимальном давлении сгорания (рис. 1,б).

С ростом нагрузки двигателя от 0 до 60 кВт при частоте вращения 2200 мин⁻¹ максимальный расход газов в картер за рабочий цикл увеличивается на 26 % и средний расход картерных газов увеличивается на 25 % для двигателей с нормальным, допустимым и предельным износом.

С ростом частоты вращения от 800 до 2400 мин⁻¹ на режиме холостого хода максимальный расход газов в картер за рабочий цикл увеличивается, и интенсивность увеличения растет по мере износа ЦПГ. Для ЦПГ с нормальным состоянием рост расхода составляет 0,338 г/с на каждые 1000 мин⁻¹, с допустимым состоянием ЦПГ составляет 1,106 г/с на каждые 1000 мин⁻¹ или в 3,27 раза выше и с предельным состоянием ЦПГ составляет 1,681 г/с на каждые 1000 мин⁻¹ или в 4,97 раза выше, чем при нормальном состоянии ЦПГ.

В результате движения поршней двигателя типа Д-243 давление газов в закрытом картере объемом 50 л изменяется от -0,3 до 0,3 кПа или с амплитудой колебания давления $P_{па} = 0,3$ кПа. Экстремумы давления наблюдаются при положении поршней в мертвых точках, начиная с 0 градусов через каждые 90 градусов.

С увеличением объема картера V_k от 5 до 100 л амплитуда колебаний давления изменяется от 3 до 0,15 кПа или в 20 раз. В диапазоне изменения объема ± 2 л, например при изменении количества масла в картере, такое изменение при объеме картера 50 л приведет к изменению амплитуды колебаний давления на 0,02 кПа или 6,5 % от среднего значения амплитуды.

Исследования изменения давления в закрытом картере от поступающих в него газов и насосного действия поршней показали:

- характер изменения давления газов в картере за цикл имеет ярко выраженный колебательный характер с постепенным повышением среднего значения давления;
- колебания давлений от насосного хода поршней превышают колебания от утечек газа через неплотности из цилиндра в 12...21 раз для ЦПГ с нормальным износом, в 6...8 раз для ЦПГ с допустимым износом и в 5 раз для ЦПГ с предельным износом.

После перекрытия отвода газов из картера время достижения давления 120 кПа при частоте вращения 2200 мин⁻¹ в зависимости от нагрузки для двигателя с нормальным износом ЦПГ составляет от 14 до 18 с, для двигателя с допустимым износом ЦПГ составляет от 6 до 7,5 с и для двигателя с предельным износом ЦПГ время составляет 4...5 с.

Время достижения давления в картере двигателя во время его работы на режиме холостого хода при частоте вращения 2200 мин⁻¹, с момента перекрытия отвода газов, достигает давления 120 кПа при нормальном износе через 18 ±0,55 с, при допустимом износе – 7 ±0,25 с и при предельном износе – 4 ±0,38 с (рисунок 3). Каждый следующий качественный показатель (время нарастания давления до 120 кПа) отличается от ближайшего почти в 1,5 раза и более при возможной погрешности менее ±10 %, что позволяет делать оценку технического состояния с хорошей достоверностью.

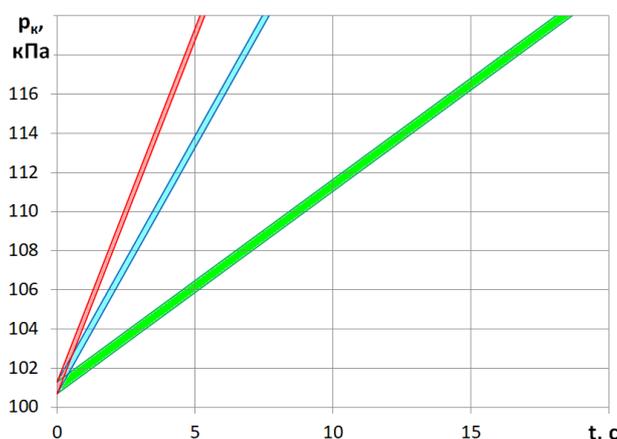


Рисунок 3 – Изменение давления газов в картере по времени работы с момента перекрытия отвода газов с ограничением давления 120 кПа для двигателя Д-243 с различной степенью износа ЦПГ: Н – нормальный; Д – допустимый; П – предельный. Ширина линий выбрана в соответствии с амплитудой колебаний давления от насосных ходов поршней (0,6 кПа)

В четвертой главе дано описание созданной экспериментальной установки и представлены результаты экспериментальных исследований двигателей типа Д-243 с различной степенью износа ЦПГ, которые включали измерение расхода картерного газа и давления в картере при перекрытии их отвода для двигателей Д-240 № 393170 и Д-243 № 213436 в условиях испытательного стенда и двигателя Д-240 № 248100 в составе трактора МТЗ-80 при изменении частоты вращения вала от 800 до 2200 мин⁻¹ на режиме холостого хода.

Экспериментальная проверка измерения замкнутого объема произвольной формы по разработанной методике измерений обеспечивает погрешность не более 2 %, что позволяет использовать ее для измерения объема картерного пространства ДВС. Измеренный объем картерного пространства испытываемых двигателей Д-240 и Д-243 при полном уровне

масла в картере составил 50,0 л при доверительном интервале 0,5 л для уровня значимости $\alpha = 0,05$. Полученные результаты по измерению объема картерного пространства показывают, что разработанная методика позволяет определять объем картера с вероятностью 95 % и погрешностью ± 1 %.

При измерении объема картерного пространства двигателей Д-240 и Д-243 расход подаваемого воздуха должен быть не ниже 40 л/мин, что позволяет проводить измерение объема картерного пространства с погрешностью ± 1 % при доверительной вероятности 95 %.

Исследование влияния режима работы двигателя на расход картерных газов показали, что влияние частоты вращения гораздо существеннее, чем нагрузки двигателя. При изменении частоты вращения в пределах допустимого диапазона (800...2200 мин⁻¹) расход картерных газов изменяется:

- для двигателя с нормальным износом в 1,6 раза;
- для двигателя с допустимым износом в 2 раза;
- для двигателя с предельным износом в 6,9 раза.

При изменении нагрузки в пределах допустимого диапазона расход картерных газов изменяется: для двигателя с нормальным износом на 14 % и для двигателя с предельным износом на 2 %. Поэтому в качестве диагностического режима предлагается использовать режим холостого хода при номинальной частоте или максимальных оборотов холостого хода, которые могут быть получены на машине с работающим двигателем без специальных приспособлений.

Разработанная методика расчета расхода картерных газов и изменения давления в картере при перекрытии отвода газа достоверно описывает изменение давления в картере и позволяет прогнозировать расход картерных газов с погрешностью не более 10 %, как показано на рисунке 4.

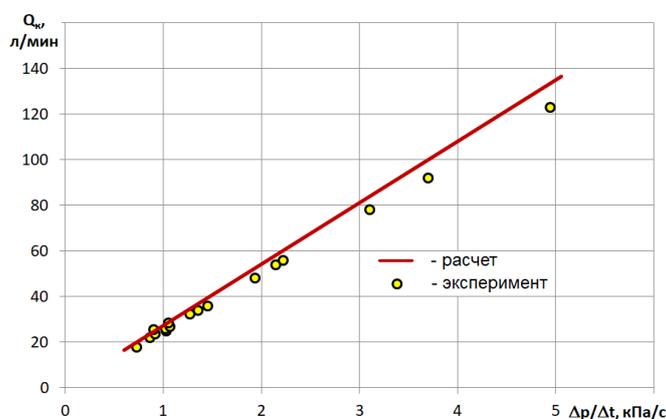


Рисунок 4 – Зависимость расхода картерных газов $Q_{кг}$ от скорости нарастания давления в картере $\Delta p/\Delta t$

Результаты регистрации давления газа в картерном пространстве после его закрытия показали возможности использования скорости нарастания давления в качестве характеристики расхода картерных газов или диагностического параметра для оценки технического состояния ЦПГ. Для двигателей Д-240 и Д-243 граничные значения скорости нарастания давления составляют:

- для нормального состояния ЦПГ $(dp/dt)_н = 1,1$ кПа/с;
- для допустимого состояния ЦПГ $(dp/dt)_д = 2,5$ кПа/с;
- для предельного состояния ЦПГ $(dp/dt)_п = 3,5$ кПа/с.

Полученные граничные значения диагностического показателя (dp/dt) и его взаимосвязь с расходом картерного газа позволяют определить зоны различных технических состояний ЦПГ двигателей, как показано на рисунке 5.

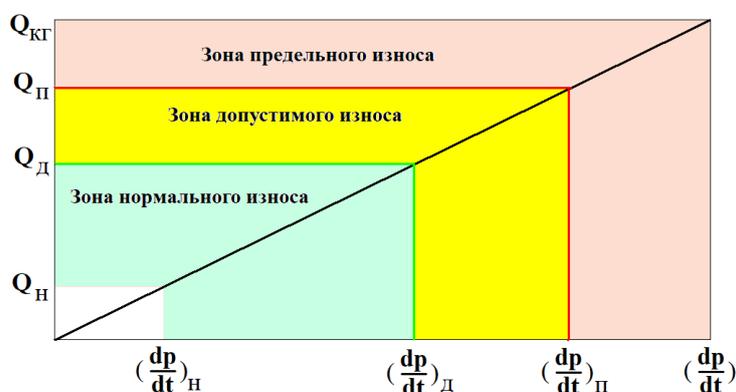


Рисунок 5 – Изображение зон различного технического состояния ЦПГ двигателя по расходу картерных газов $Q_{кГ}$ или по скорости нарастания давления в картере dp/dt и их взаимосвязь

Пятая глава посвящена перспективам использования исследованного метода оценки технического состояния ЦПГ двигателя по скорости изменения давления газов в картере после перекрытия их отвода. Показаны варианты реализации метода в процессе эксплуатации техники без ее отрыва от эксплуатации для диагностирования.

Для реализации исследованного метода предложена модернизация системы вентиляции картера двигателя установкой дополнительного устройства, которое позволяет диагностировать ЦПГ ДВС в процессе эксплуатации по исследованному методу. Задачи, решаемые предложенным устройством, заключаются в своевременном перекрытии и открытии канала отвода газов из картера, измерения давления газов в закрытом картерном пространстве и регистрации времени выполняемых процессов.

Рассмотрены два возможных способа управления разработанным устройством в процессе диагностирования и для каждого разработаны

алгоритмы управления процессом и получения оценочной информации, которые представлены в таблице.

Таблица – Возможные алгоритмы управления ДВС при диагностировании

Алгоритм 1	Алгоритм 2
1. В процессе работы двигателя на холостом ходу установить номинальную частоту вращения (можно – максимальных оборотов холостого хода).	1. В процессе работы двигателя на холостом ходу установить номинальную частоту вращения (можно – максимальных оборотов холостого хода).
2. Запустить процесс регистрации давления: а) перекрыть клапан отвода газов из картера; б) начать отсчет времени; в) начать регистрацию давления; (все операции начинаются одновременно с приоритетом а-б-в).	2. Запустить процесс регистрации давления: а) перекрыть клапан отвода газов из картера; б) начать отсчет времени; в) начать регистрацию давления; (все операции начинаются одновременно с приоритетом а-б-в).
3. В момент достижения контрольного давления p_k : а) зарегистрировать время процесса t_i ; б) зарегистрировать измеренное давление p_k ; в) открыть клапан отвода газов из картера; (все операции выполняются одновременно с приоритетом а-б-в).	3. В момент достижения контрольного времени t_k : а) зарегистрировать измеренное давление p_i ; б) зарегистрировать время процесса t_k ; в) открыть клапан отвода газов из картера; (все операции выполняются одновременно с приоритетом а-б-в).
4. В момент достижения максимального времени измерений t_{max} : а) зарегистрировать измеренное давление p_3 ; б) зарегистрировать время процесса t_{max} ; в) открыть клапан отвода газов из картера; г) скорость нарастания давления определить по выражению $\frac{dp}{dt} = \frac{p_3}{t_{max}}$ (операции выполняются одновременно с приоритетом а-б-в-г).	4. В момент достижения максимального давления в картере p_{max} : а) зарегистрировать время процесса t_3 ; б) зарегистрировать измеренное давление p_{max} ; в) открыть клапан отвода газов из картера; г) скорость нарастания давления определить по выражению $\frac{dp}{dt} = \frac{p_{max}}{t_3}$ (операции выполняются одновременно с приоритетом а-б-в-г).
5. Сохранить результаты измерений, дату и время проведения измерений.	5. Сохранить результаты измерений, дату и время проведения измерений.
6. Снизить частоту вращения двигателя до минимальных оборотов холостого хода.	6. Снизить частоту вращения двигателя до минимальных оборотов холостого хода.
7. При необходимости заглушить двигатель.	7. При необходимости заглушить двигатель.

Разработанная конструкция устройства управления потоком картерного газа и контроля давления газов в картере позволяет использовать его на любом двигателе, имеющем свободный доступ к каналу отвода картерных газов. Устройство может быть использовано за счет модернизации системы вентиляции картера уже эксплуатируемых двигателей или может быть встроено в конструкцию вновь разрабатываемых двигателей (№ 20233129765).

Предложенные алгоритмы процесса измерения расхода картерных газов при эксплуатации могут быть автоматизированы и выполняться по заданному графику, например, ежедневно в конце прекращения работ, а зарегистрированные данные будут храниться в памяти системы управления

машины для контроля изменения состояния ЦПГ в процессе эксплуатации и своевременно провести операции обслуживания.

Анализ экономической эффективности использования данного подхода показал целесообразность проведения модернизации техники с двигателями типа Д-243. Оценочный срок окупаемости единовременных затрат составил 0,9 года.

Заключение

1. Анализ известных способов оценки технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя на возможность их использования для непрерывного контроля в процессе эксплуатации показал целесообразность использования в качестве диагностического параметра расход картерных газов.

2. Разработан комплекс методик расчёта и программа проведения расчётных исследований в среде Excel, позволяющие:

- рассчитывать утечки газа из цилиндра ДВС с учетом основных параметров рабочего цикла и режима работы двигателя;
- расчётным и экспериментальными методами определить влияние движения поршней многоцилиндрового ДВС на амплитуду колебаний давления в картере;
- рассчитать изменение давления газов в замкнутом пространстве картера от прорвавшихся из цилиндров газов при работе многоцилиндрового двигателя.

3. Результаты расчета двигателя Д-243 на разных режимах работы и с различным износом ЦПГ показали:

- увеличение нагрузки и частоты вращения приводит к увеличению расхода картерных газов, и при увеличении нагрузки от 0 до 100 % расход увеличивается на 25 %, а при увеличении частоты вращения от 800 до 2400 мин⁻¹ расход увеличивается в 1,8 раза при нормальном износе, в 2,4 раза при допустимом износе и в 2,6 раза при предельном износе;
- для диагностирования состояния ЦПГ лучше использовать режим холостого хода при номинальной или максимальной частоте вращения, который может быть проще реализован на двигателе в процессе эксплуатации и имеет большую чувствительность к техническому состоянию ЦПГ;
- характер изменения давления газов в закрытом картере за цикл имеет ярко выраженный колебательный характер с постепенным повышением среднего значения давления, причем амплитуда колебаний давления от насосного хода поршней в 5...21 раз больше, чем от утечек газа через неплотности из цилиндра;
- время достижения давления в картере двигателя во время его работы на режиме холостого хода при частоте вращения 2200 мин⁻¹, с момента

перекрытия отвода газов, достигает давления 120 кПа при нормальном износе через $18 \pm 0,55$ с, при допустимом износе – $7 \pm 0,25$ с и при предельном износе – $4 \pm 0,38$ с. Каждый следующий качественный показатель (время нарастания давления до 120 кПа) отличается от ближайшего почти в 1,5 раза и более при возможной погрешности менее ± 10 %, что позволяет делать оценку технического состояния с хорошей достоверностью.

4. Проведенные на созданной установке экспериментальные исследования двигателей типа Д-243 с различной степенью износа ЦПГ на разных режимах их работы показали:

- правомерность использования разработанной методики и программы расчета для оценки расхода картерных газов для двигателей с разным износом ЦПГ;
- в качестве диагностического режима лучше использовать режим холостого хода при номинальной частоте вращения или максимальных оборотах холостого хода, которые могут быть получены на машине с работающим двигателем без специальных приспособлений;
- разработанная методика оценки расхода картерных газов по изменению давления в картере при перекрытии отвода газа достоверно описывает изменение давления в картере и позволяет прогнозировать расход картерных газов с погрешностью не более 10 %;
- скорость нарастания давления может быть использована в качестве диагностического параметра оценки технического состояния ЦПГ для двигателей типа Д-243, при этом граничные значения скорости нарастания давления составляют для нормального состояния ЦПГ 1,1 кПа/с; для допустимого состояния ЦПГ 2,5 кПа/с и для предельного состояния ЦПГ 3,5 кПа/с.

5. Разработанная методика определения объема картерного пространства позволяет определять объем картера двигателей типа Д-243 с вероятностью 95 % и погрешностью ± 1 % при расходе подаваемого воздуха с расходом не менее 40 л/мин.

6. Показан вариант модернизации системы вентиляции картера двигателя установкой дополнительного устройства, которое позволяет диагностировать ЦПГ ДВС в процессе эксплуатации по исследованному методу, предложены два способа управления разработанным устройством и разработаны соответствующие алгоритмы управления, которые позволяют производить оценку технического состояния ЦПГ двигателя без отрыва машины от эксплуатации. Экономическая оценка показала целесообразность такого подхода и срок окупаемости устройства составит менее одного года.

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Сучков, А. И. Оценка состояния ЦПГ двигателя по давлению газов в картере / О. Н. Дидманидзе, А. И. Сучков, С. Н. Девянин, А. В. Бугаев, А. С. Гузалов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 50-54.
2. Сучков, А. И. Экспериментальные исследования расхода картерных газов двигателя типа Д-243 с разной степенью износа ЦПГ / О. Н. Дидманидзе, А. И. Сучков, С. Н. Девянин, А. С. Гузалов, А. В. Бугаев, А. В. Куриленко // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 4. – С. 36-40.

Публикации в других рецензируемых научных изданиях:

3. Сучков, А. И. Способы оценки технического состояния ЦПГ двигателя / О. Н. Дидманидзе, С. Н. Девянин, А. И. Сучков // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25-26 января 2022 года. – Ч. 2. – М. : ООО «Сам полиграфист», 2022. – С. 7-19.
4. Сучков, А. И. Моделирование контроля технического состояния ЦПГ ДВС в эксплуатации / А. И. Сучков, О. Н. Дидманидзе, С. Н. Девянин // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25-26 января 2023 года. – Ч. 2. – М. : ООО «Сам полиграфист», 2023. – С. 10-19.
5. Сучков, А. И. Методика оценки технического состояния ЦПГ автотракторных двигателей / О. Н. Дидманидзе, С. Н. Девянин, А. И. Сучков, Е. П. Парлюк, Н. Н. Пуляев, А. В. Бугаев, А. С. Гузалов, А. В. Куриленко – М. : ООО «Сам полиграфист», 2023 – 83 с.