

Научная статья
УДК 621.431
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-432-445>
EDN: SWFYKM



АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАЗНОСТИ РАСХОДОВ ВОЗДУХА КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

П.С. Яковчук¹ ✉, С.Н. Кривцов^{1,2}, В.Г. Дыгало³

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрНТУ),
г. Иркутск, Россия

²Северо-Восточный федеральный университет им М.К. Аммосова,
г. Якутск, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Мытищинский филиал),
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
Pashajakovchuk@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Дизельные двигатели остаются основным типом силовых установок для грузового транспорта и специальной техники, при этом в ближайшей перспективе их массовое замещение электрической тягой маловероятно. В этих условиях актуальной задачей является контроль технического состояния двигателя, в частности цилиндро-поршневой группы, ресурс которой определяет долговечность силового агрегата. Износ ЦПГ в процессе эксплуатации приводит к ухудшению основных эксплуатационных показателей двигателя. Несмотря на наличие различных методов диагностики, большинство из них отличается высокой трудоемкостью либо носит относительный характер. Наиболее надежные способы требуют применения внешних диагностических средств, тогда как бортовые системы самодиагностики позволяют оценивать состояние двигателя лишь косвенно. В связи с этим целесообразным является развитие методов оценки изношенности двигателя с использованием параметров, доступных для бортового контроля, таких как расход картерных газов.

Материалы и методы. Исследование зависимости расхода картерных газов с увеличением зазора в поршневом кольце от диаметра цилиндров проводилось математическим путем. В исследовании участвовали различные модели дизельных двигателей легкового и коммерческого сегмента. Для проведения исследования были выбраны дизельные двигатели с различными характеристиками, включая диаметр цилиндров в диапазоне от 83 до 144 мм и рабочий объем от 2 до 16,0 л. Для обработки данных применялись методы регрессионного анализа в программной среде MATLAB, в результате чего получены закономерности изменения расхода картерных газов через неплотности цилиндров и пропорциональная им величина – разность расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта. Дополнительно проводилась проверка адекватности модели путем сравнения расчетных данных с экспериментальными замерами в лабораторных и полевых условиях.

Обсуждение и заключение. Закономерность, полученная в ходе исследований, позволяет узнать степень изношенности цилиндропоршневой группы по значению расхода воздуха, измеренного штатными средствами бортового диагностирования, причем измерения проводятся с подсоединенным патрубком принудительной вентиляции картера и при изолировании данного патрубка от измерительного тракта в идентичных условиях. Научный вклад работы заключается в экспериментальном обосновании количественной связи между разностью расхода воздуха в двух режимах измерения (с подключенным и изолированным патрубком вентиляции картера) и степенью износа ЦПГ, что ранее в литературе не было представлено в виде явной диагностической закономерности, пригодной для использования со штатными датчиками. Установлено, что измерение разности расхода воздуха является надежным индикатором износа ЦПГ, позволяя прогнозировать состояние двигателя без применения инвазивных методов диагностики. В заключение исследования подчеркивается важность регулярного контроля состояния ЦПГ для поддержания оптимальных рабочих характеристик и продления срока службы двигателя. Дальнейшие работы рекомендуются направить на интеграцию предложенной методики в бортовые диагностические системы.

© Яковчук П.С., С.Н. Кривцов С.Н., Дыгало В.Г., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надёжность двигателя, дизельный двигатель, эксплуатационный ресурс, вероятность отказа, цилиндропоршневая группа

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и анонимным рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; одобрена после рецензирования 08.05.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Яковчук П.С., Кривцов С.Н., Дыгало В.Г. Аналитическая оценка разности расходов воздуха как диагностический параметр цилиндра-поршневой группы дизельных двигателей // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 432-445. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-432-445>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-432-445>

EDN: SWFYKM

ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE DIFFERENCE IN AIR FLOW RATES AS A DIAGNOSTIC PARAMETER OF THE CYLINDER-PISTON GROUP OF DIESEL ENGINES

Pavel S. Yakovchuk¹ ✉, Sergey N. Krivtsov^{1, 2}, Vladislav G. Dygalo³

¹Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

²North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov,
Yakutsk, Russia

³Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (Mytishchinskiy branch),
Moscow, Russia

✉ corresponding author
Pashajakovchuk@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Diesel engines remain the primary powertrain for trucks and special-purpose vehicles and their widespread replacement by electric traction is unlikely in the near future. Under these conditions, monitoring the technical condition of the engine, particularly the cylinder-piston group, whose service life determines the longevity of the powertrain, is a pressing issue. The cylinder-piston group wear during operation leads to a deterioration in the engine key performance indicators. Despite the availability of various diagnostic methods, most are labor-intensive or of limited practical value. The most reliable methods require the use of external diagnostic tools, while onboard self-diagnostic systems provide only indirect assessment of engine condition. Therefore, it is advisable to develop methods for estimating engine wear using parameters available for onboard monitoring, such as crankcase gas flow rate.

Materials and Methods. The study of the dependance of crankcase gas flow with increase of the clearance in the piston ring on cylinder diameter has been conducted by mathematical method. Various diesel engine models for passenger cars and commercial vehicles have been used in the research. Diesel engines with various characteristics have been selected for examination, including cylinder diameters ranging from 83 to 144 mm and engine capacity from 2 to 16.0 liters. Regression analysis methods in the MATLAB software environment have been applied to process the data, resulting in the determination of patterns of crankcase gas flow rate changes due to cylinder leaks and a proportional value – the difference in airflow rates with a closed crankcase ventilation system and with the crankcase breather isolated from the intake tract. The validation of the model has additionally been conducted by comparing the calculated data with experimental measurements in laboratory and in field conditions.

Discussion and Conclusion. The pattern obtained through the study allows us to determine the wear degree of the cylinder-piston group based on the air flow rate measured by standard on-board diagnostics. Measurements have been conducted with the forced crankcase ventilation hose connected and with this hose isolated from the

© Yakovchuk Pavel S., Krivtsov Sergey N., Dygalo Vladislav G., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

measurement tract under identical conditions. The scientific contribution of this study lies in the experimental substantiation of a quantitative relationship between the difference in air flow in two measurement modes (with the crankcase ventilation hose connected and isolated) and the degree of cylinder-piston group wear. This relationship has not previously been presented in the literature as a clear diagnostic pattern suitable for use with standard sensors. It has been established that measuring the difference in air flow is a reliable indicator of cylinder-piston group wear, allowing to predict the engine condition without the use of invasive diagnostic methods. In conclusion, the study highlights the importance of regular monitoring the cylinder-piston group condition to maintain optimal performance and extend engine service life. Further work is recommended to focus on integrating the proposed methodology into on-board diagnostic systems.

KEYWORDS: engine reliability, diesel engine, service life, failure probability, cylinder-piston group

ACKNOWLEDGMENTS. The authors express their gratitude to the Editors of The Russian Automobile and Highway Industry Journal and the anonymous reviewers of this article.

The article was submitted: February 04, 2026; approved after reviewing: May 08, 2026; accepted for publication: June 15, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Yakovchuk P.S., Krivtsov S.N., Dygalo V.G Analytical assessment of the difference in air flow rates as a diagnostic parameter of the cylinder-piston group of diesel engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 432-445. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-432-445>

ВВЕДЕНИЕ

Двигатели внутреннего сгорания с самовоспламенением от сжатия (дизельные двигатели) на сегодняшний момент являются основной силовой установкой, применяемой на автомобилях грузового сегмента и спецтехнике. Есть все основания полагать, что и в будущем значительного замещения на электротягу у указанной техники не произойдет, по крайней мере, в России. Следовательно, задача поддержания их работоспособности в условиях реальной эксплуатации сохраняет высокую практическую значимость, а поиск эффективных методов диагностики технического состояния остается актуальным научно-прикладным направлением.

Цилиндро-поршневая группа (ЦПГ) является одной из базовых составляющих дизельного двигателя, а достижение ей предельного состояния определяет ресурс [1, 2, 3]. С увеличением наработки (пробега) техническое состояние неуклонно ухудшается, что приводит к снижению мощности, увеличению расхода топлива и масла на угар, повышению дымности отработавших газов, возрастанию расхода картерных газов и др. [4]. Несвоевременное выявление критического износа ЦПГ ведет к внезапным отказам, дорогостоящим ремонтам и простоям техники, что обосновывает экономическую и эксплуатационную значимость ранней диагностики.

В настоящее время разработан обширный арсенал методов и средств диагностирования технического состояния ЦПГ. Анализ работ,

посвященных этой проблематике, позволил заключить, что используемые методы либо трудоемки (подразумевают частичную разборку), либо в известной степени считаются относительными [5]. Классическими и достаточно универсальными методами являются замер компрессии и использование пневматических тестеров для опрессовки надпоршневого пространства [6], однако они наиболее трудоемки. Виброакустический метод менее трудоемок, но сложен в реализации [7]. Весьма оперативным методом оценки изношенности ЦПГ является измерение расхода картерных газов, поскольку между их количеством и износом существует тесная взаимосвязь [8].

При этом существующие подходы имеют два существенных ограничения, определяющих проблемную область настоящего исследования: 1) большинство достоверных методов требуют внешнего диагностического оборудования и вмешательства в конструкцию; 2) штатные бортовые системы самодиагностики оценивают состояние ЦПГ лишь косвенно (например, по неравномерности вращения коленчатого вала при прокрутке стартером, току или пульсации напряжения [9,10]), что не позволяет напрямую судить о величине износа и прогнозировать остаточный ресурс.

Таким образом, актуальной научно-технической задачей является разработка способа диагностики износа ЦПГ:

- который основывался бы на штатных датчиках и не требовал дополнительного оборудования;

- обеспечивал количественную, а не только относительную оценку состояния;
- мог быть интегрирован в бортовые диагностические системы без разборки двигателя.

Цель исследования: выявление закономерности, отражающей взаимосвязь разности расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта с параметром технического состояния цилиндров – площадью сечения неплотности ЦПГ для дизельных двигателей разной размерности.

Задачи исследования:

1. Разработать аналитическую модель для расчета разности расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта (пропорциональной расходу картерных газов).
2. Выполнить расчеты для дизельных двигателей разной размерности расхода картерных газов от площади сечения неплотности ЦПГ.
3. Выявить закономерность изменения расхода картерных газов от площади сечения неплотности ЦПГ для дизельных двигателей разной размерности.
4. Выполнить экспериментальную проверку возможности применения разности расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта в качестве диагностического параметра.

Научная значимость работы состоит в обосновании новой диагностической закономерности, связывающей непосредственно измеряемый штатными средствами параметр (разность расходов воздуха) с физической величиной износа (площадью неплотности ЦПГ), что позволяет перейти от косвенных признаков к количественной оценке состояния. Практическая значимость заключается в возможности реализации предложенного метода в рамках штатной электроники автомобиля без дополнительных датчиков и разборки двигателя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При износе цилиндро-поршневой группы происходит изменение структурных параметров, а именно, зазора в замке компрессионных колец, а также диаметров и геометрии поршня и гильзы цилиндров. Это, в свою очередь, приводит к утечкам рабочего тела через увеличенные неплотности [8,11]. При этом не-

обходимо учесть и геометрические размеры цилиндров (ход поршня, диаметр цилиндра, рабочий объем и т.д.), поскольку при одних и тех же зазорах площади, через которые происходят утечки, различаются.

Методика расчёта утечек через поршневые кольца основана на типовом расчёте рабочего цикла ДВС [12], в которой определяются изменения давления P_u и температуры T_u по углу поворота вала на разных режимах работы ДВС и дополнительно производится расчёт расхода газа $G_{кр}$, прошедшего через неплотности ЦПГ условной площадью f_u (рисунок 1, а).

Исходная система уравнений содержит закон сохранения энергии, массы, состояния газа и имеет вид [13]:

$$U_2 - U_1 = - \int_{V_1}^{V_2} p * dV + \sum I_j^* + Q_x - Q_w; \quad (1)$$

$$G_2 - G_1 = \sum \Delta G_j; \quad (2)$$

$$P * V = G * R * T, \quad (3)$$

где $\int_{V_1}^{V_2} p * dV$ – механическая работа, совершенная рабочим телом;

I_j^* – энтальпия рабочего тела, подведенная к системе в результате добавления массы ΔG_j от j -го источника массы;

Q_x – количество теплоты, подведенной к рабочему телу от постороннего источника (вследствие сгорания топлива);

Q_w – количество теплоты, отведенной в стенки;

p , T , G , V , U , R – давление, температура, масса, объём, внутренняя энергия и газовая постоянная рабочего тела.

Индексы 1 и 2 обычно относят к началу и концу рассматриваемого термодинамического процесса.

Указанная система уравнений является общепринятой системой для многих программных продуктов по расчету ДВС. К числу таких программ относится свободно распространяемая отечественная программа Дизель-РК (МГТУ им. Баумана). Примечательно, что она позволяет смоделировать и утечки рабочего тела и рассчитать массовый расход газа $G_{кр}$, прорывающегося через неплотности.

Массовый расход $G_{кр}$ (г/с) для докритического режима истечений определяется по выражению [15]:

$$G_{кг} = f_{щ} * \frac{p_{ц}}{\sqrt{R * T_{ц}}} * \sqrt{\frac{2k}{k-1} * \left[\left(\frac{p_{к}}{p_{ц}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{к}}{p_{ц}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (4)$$

Для критического режима истечений определяется по выражению

$$G_{кг} = f_{щ} * \frac{p_{ц}}{\sqrt{R * T_{ц}}} * \sqrt{\frac{2k}{k+1} * \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}, \quad (5)$$

где R – газовая постоянная для газа, Дж/(кг*К);
 $f_{щ}$ – площадь сечения неплотности ЦПГ (щели), м²;

k – показатель адиабаты газа;

$T_{ц}$ – температура газа в цилиндре (на входе), К;

$p_{ц}, p_{к}$ – давление газа в цилиндре и картере, Па.

Расход воздуха через ДМРВ согласно уравнениям (2) и (3) вычисляется как

$$G'_B = G_B - G_{кг} \quad (6)$$

Следовательно, разность расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта, вычисляемая посредством ДМРВ, будет пропорциональна известному диагностическому параметру – расходу картерных газов. Однако в данном случае это именно разность массовых расходов воздуха:

$$\dot{G}_B - G'_B = f(G_{кг}), \quad (7)$$

где G'_B – расход воздуха, проходящий через ДМРВ;

G_B – расход воздуха, поступающего из атмосферы при изолировании сапуна системы вентиляции картера от системы впуска;

$G_{кг}$ – расход картерных газов, проходящих через сапун двигателя.

Расход воздуха двигателем (то есть расход воздуха, прошедший через датчик массового расхода воздуха) можно определить по следующей зависимости¹:

$$G_B = \frac{120}{\tau} i_{ц} n_e V_h \rho_0 \eta_v, \quad (8)$$

где τ – тактность двигателя 2 либо 4;

$i_{ц}$ – количество цилиндров;

n_e – частота вращения коленчатого вала; мин⁻¹;

V_h – рабочий объем цилиндра, м³;

ρ_0 – плотность заряда, кг/м³;

η_v – коэффициент наполнения.

Коэффициент наполнения в свою очередь определяется как¹

$$\eta_v = \varphi_1 \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{p_a}{p_k} \frac{T_k}{T_k + \Delta T + \varphi \varphi_1 \gamma T_r}, \quad (9)$$

где φ_1 – коэффициент дозарядки;

ε – степень сжатия.

p_a и p_k – соответственно давления на впуске и поступающего в цилиндр, Па;

φ – отношение теплоемкостей продуктов сгорания и свежей смеси;

T_k и T_r – соответственно температуры воздуха, поступающего в цилиндр и остаточных газов, К;

γ – коэффициент остаточных газов;

ΔT – температура подогрева заряда, К.

Моделирование расхода картерных газов от диаметра цилиндра и зазора поршневых колец проводилось с помощью отечественной программы Дизель-РК (МГТУ им. Баумана) [16]. В качестве отправной точки были взяты в расчёт модели двигателей, диаметр цилиндра которых варьируется в пределах от 83 до 144 мм. Моделировался режим холостого хода, поскольку он является достаточно стабильным, легко реализуемым, а справочная величина минимальной частоты вращения холостого хода известна для каждого двигателя.

В качестве допущений принято:

- износ ЦПГ характеризуется площадью сечения ее неплотности $f_{щ}$ (см. рисунок 1, а), которую изменяли от 1 до 9 мм²;

- рециркуляция отработавших газов не учитывается;

- влиянием наличия турбокомпрессора для режима холостого хода пренебрегли [17].

В таблице 1 представлены данные, которые были приняты в качестве исходных данных при расчетах, а на рисунке 1, б – фрагмент расчета расхода газов через первое компрессионное кольцо в программе Дизель-РК.

¹ Автомобильные двигатели: учебник / М. Г. Шатров, К. А. Морозов, И. В. Алексеев [и др.]; под ред. М.Г. Шатрова. М.: Академия, 2010. 464 с.

Таблица 1
Технические характеристики двигателей, используемых для расчёта
Источник: составлено авторами.

Table 1
Technical characteristics of engines used for calculation
Source: compiled by the authors.

Модель Model	204DTD	D4CB	Cummins ISF3.8	TD520GE	КамАЗ- 740	D13A440	TAD1640 GE
Число цилиндров Number of cylinders	4	4	4	4	8	6	6
Рабочий объём, л Volume, l	2,0	2,5	3,8	4,8	11,8	12,8	16,1
Диаметр цилиндра, мм Bore, mm	83	91	102	108	120	131	144
Ход поршня, мм Stroke of the piston, mm	92,35	96	115	130	130	158	165
Атмосферное давление, бар Ambient pressure, bar	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Температура, К Ambient temperature, K	295	295	295	295	295	295	295
Объём цилиндра, л Volume of cylinder, l	0,5	0,624	0,940	1,191	1,470	2,130	2,687
Цикловой массовый расход воздуха, мг Stroke mass airflow, mg	475,69	594,40	894,59	1133,75	1399,69	2027,34	2558,21
Степень сжатия Compression ratio	15,5	17,6	17,2	17,5	18	18,1	17,5
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹ Nominal speed, min ⁻¹	4000	3800	3600	1500	2600	2100	1500

Выполнение расчетов с помощью разных специализированных пакетов программ, например, Дизель-РК или GT-Power, является трудоемкой вычислительной задачей, поэтому нами предложено было сделать серию вычислений для двигателей разной размерности, а выявленные закономерности использовать в дальнейшем как регрессионную зависимость. Для этой цели применялось программное обеспечение MatLab.

Эксперименты выполнялись на двигателе D4CB автомобилей Hyundai/Kia в условиях лаборатории «Технической эксплуатации» ИРНТУ (его характеристики приведены в таблице 1), а производственный эксперимент выполнялся в условиях дилерского центра Land-rover (г. Иркутск) на однотипных марках дизельных двигателей 306DT. Данный двигатель имеет следующие характеристики: рабочий объём 2993 см³, диаметр цилиндра

84 мм, ход поршня 90 мм, степень сжатия – 16,1, число цилиндров – 6.

Важным моментом при испытаниях было соблюдение постоянства теплового режима. Для этого измерения проводились только для полностью прогретого до рабочей температуры двигателя.

Расходы воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта измерялись приборным комплексом USB Autoscope III. Осциллограф при этом работал в двухканальном режиме с частотой дискретизации 125 кГц, где один из каналов служил измерителем сигнала с ДМРВ, а второй – с датчика положения распределительного вала для синхронизации с порядком работы цилиндров. При обработке применялся созданный авторами скрипт для обработки аналогового циклического сигнала².

² Программа для обработки и фильтрации экспериментальных данных FILTERING KYD / Кривцов С.Н., Яковчук П.С., Денгин И.Д. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022680578, 02.11.2022. Заявка № 2022680041 от 28.10.2022.

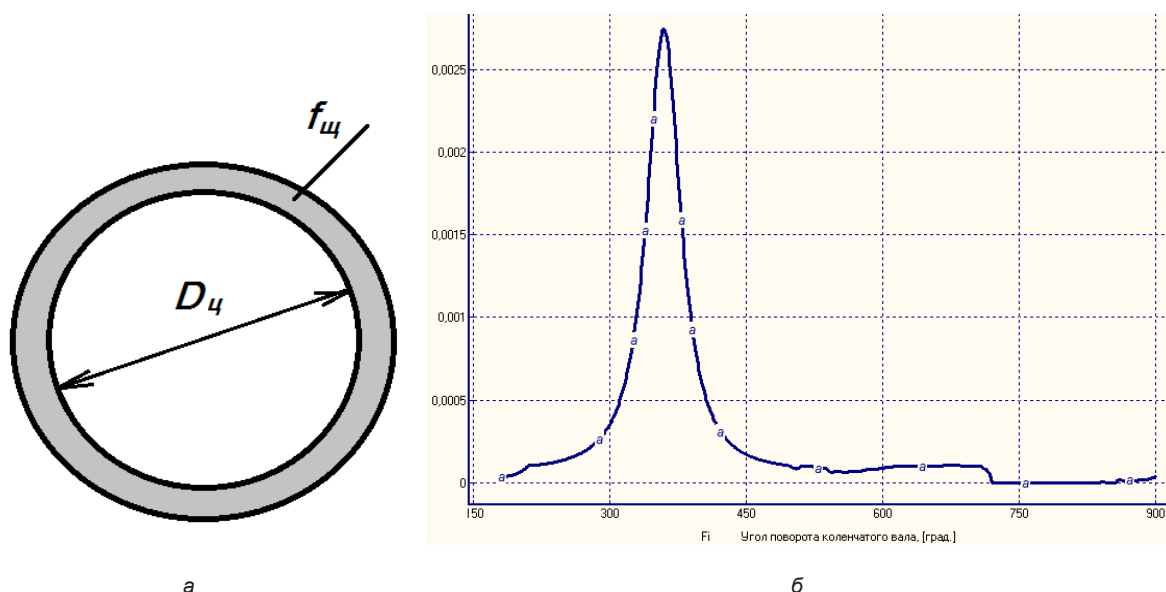


Рисунок 1 – Площадь сечения неплотности цилиндро-поршневой группы и фрагмент расчета расхода газов через первое компрессионное кольцо: а – графическое представление площади сечения неплотности ЦПГ; б – фрагмент расчета расхода газов через первое компрессионное кольцо
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Cross-sectional area of the cylinder-piston group leak and a fragment of the calculation of gas flow through the first compression ring: а – graphic scheme of cross-sectional area of the cylinder-piston group leak; б – fragment of the calculation of gas flow through the first compression ring
Source: compiled by the authors.

$f_{щ}$ – площадь сечения неплотности ЦПГ,
 $D_{ц}$ – диаметр цилиндра
 $f_{щ}$ – cross-sectional area of the cylinder-piston group leak, $D_{ц}$ – bore.

При расчетах определялось как абсолютное значение расхода картерных газов в гр/с как разность расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта, так и относительное, в процентах от расхода воздуха, поступившего в цилиндр:

$$\delta = \frac{G_B - G'_B}{G_B} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где G'_B – расход воздуха, проходящий через ДМРВ,

G_B – расход воздуха, поступающего из атмосферы при изолировании сапуна системы вентиляции картера от системы впуска.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования расхода воздуха и расхода картерных газов с учетом выражений (1), (2), (3), (4), (5) приведены в таблице 2. В ней указаны расходы картерных газов для исследуемых двигателей (см. таблицу 1), с учетом изменения площади неплотностей от 1 до 9 мм².

Графическая интерпретация выявленной зависимости приведена на рисунке 2.

Таблица 2

Данные расхода картерных газов через один цилиндр в зависимости от диаметра цилиндра и площади утечек через поршневые кольца
Источник: составлено авторами.

Table 2

Data on the of crankcase gases flow through one cylinder depending on the cylinder diameter and the area of leaks through the piston rings
Source: compiled by the authors.

$f_{ц}, \text{мм}^2$	Расход картерных газов при диаметре цилиндра $D_{ц}$ (мм) Crankcase gas flow at bore $D_{ц}$ (mm)						
	83	91	102	108	120	131	144
1	0,28	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,32
2	0,53	0,58	0,59	0,61	0,62	0,63	0,63
3	0,77	0,84	0,86	0,90	0,92	0,94	0,94
4	0,99	1,09	1,13	1,18	1,20	1,24	1,24
5	1,19	1,32	1,38	1,45	1,48	1,53	1,54
6	1,38	1,54	1,63	1,71	1,76	1,82	1,83
7	1,56	1,74	1,86	1,95	2,02	2,10	2,11
8	1,72	1,93	2,08	2,20	2,28	2,38	2,40
9	1,87	2,11	2,30	2,44	2,53	2,66	2,68

Зависимость расхода картерных газов на холостом ходу от диаметра и площади неплотности цилиндр/поршень была аппроксимирована уравнением множественной регрессии с помощью приложения Curve fitting tool, в среде MatLab.

Статистическая оценка регрессионной модели процесса формирования зависимости расхода картерных газов от диаметра цилиндра

и площади неплотностей ЦПГ выполнена в программной среде MATLAB с использованием метода наименьших квадратов. При доверительной вероятности 0,99 рассчитаны следующие статистические параметры: сумма квадратов SSE, коэффициент детерминации R^2 , скорректированный коэффициент R^2 , среднеквадратичная ошибка RMSE. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты статистической оценки регрессионной модели процесса формирования разности расхода воздуха от диаметра цилиндра и площади неплотностей ЦПГ
Источник: составлено авторами.

Table 3

Results of statistical evaluation of the regression model of the formation process of the difference in air flow from the cylinder diameter and the area of leaks of the cylinder-piston group
Source: compiled by the authors.

Зависимость Function	Статистические параметры при доверительной вероятности 0,99 Statistical parameters at a confidence level of 0.99			
	SSE	R^2	Adjusted R^2	RMSE
$G_{кр} = f(D_{ц}, f_{ц})$	0,0102	0,999	0,999	0,0138

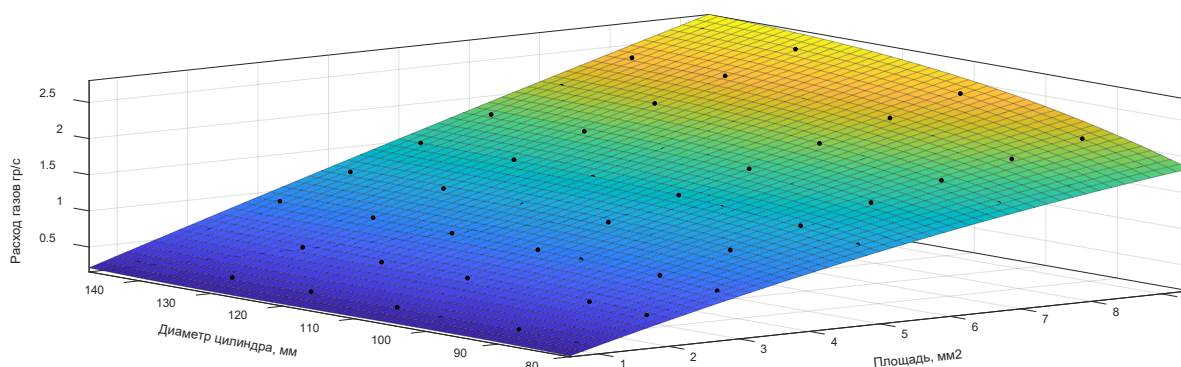


Рисунок 2 – График зависимости расхода газов от диаметра цилиндра и площади утечек
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Graph of gas flow dependence on cylinder diameter and leak area
Source: compiled by the authors.

Обработка данных позволила констатировать, что наилучшие результаты множественной регрессии получены при использовании полиномиальной зависимости второго порядка. После оценки значимости коэффициентов с доверительной вероятностью 0,99 получено следующее выражение:

$$G_{кр} = 0,03203 \cdot D_{ц} - 0,08484 \cdot f_{щ} - 0,01504 \cdot f_{щ}^2 + 0,006465 \cdot f_{щ} \cdot D_{ц} - 0,0003098 \cdot D_{ц}^2 + 0,00009171 \cdot f_{щ}^2 \cdot D_{ц} - 0,00002571 \cdot f_{щ} \cdot D_{ц}^2 + 0,0000009689 \cdot D_{ц}^3 - 1,065 \quad (11)$$

где $D_{ц}$ – диаметр цилиндра, мм;

$f_{щ}$ – площадь неплотности цилиндра, мм².

Эксперименты, проведенные в лабораторных условиях на двигателе D4CB (рисунок 3), показали, что величины расходов воздуха с

замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта различаются в диапазоне частот вращения от 800 до 2400 мин⁻¹ и выше. Причем эта разность положительна. Это подтверждает теоретические предпосылки возможности применения этого параметра, как диагностического [18]. В то же время анализ данных графика позволяет заключить, что разность расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта практически не изменяется от частоты вращения коленчатого вала двигателя. Эти данные не противоречат фактам, представленным в работе [19, 20], где автор пришел к аналогичным выводам. Это объясняется тем, что на холостом ходу индикаторное давление в цилиндре, в том числе среднее, значительно ниже, чем под нагрузкой выражения (4), (5).

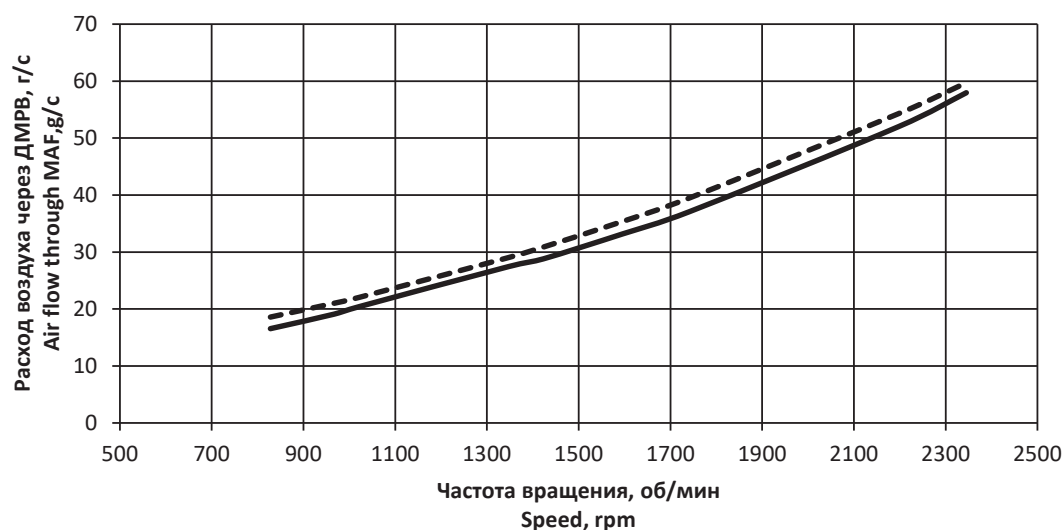


Рисунок 3 – Зависимость расходов воздуха двигателем D4CB через датчик массового расхода воздуха сплошная линия – с замкнутой системой вентиляции картера, штриховая – сапун изолирован от впуска
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of air consumption by the D4CB engine via the mass air flow sensor: solid line – with closed crankcase ventilation system, dashed line – the crankcase breather is isolated from the intake
Source: compiled by the authors.

На рисунке 4 изображена графическая зависимость разности расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта автомобилей Land Rover с двигателем 306DT, полученная в ходе производственной проверки. Используя полученную нами зависимость мо-

жем констатировать, что с увеличением пробега от 25 (то есть практически неизношенного двигателя) до 300 тыс. км, расход газов увеличивается в 3,7 раза (или от 1,8 до 9,8%), это соответствует изменению площади неплотностей цилиндра от 1 мм² до 4,2 мм².

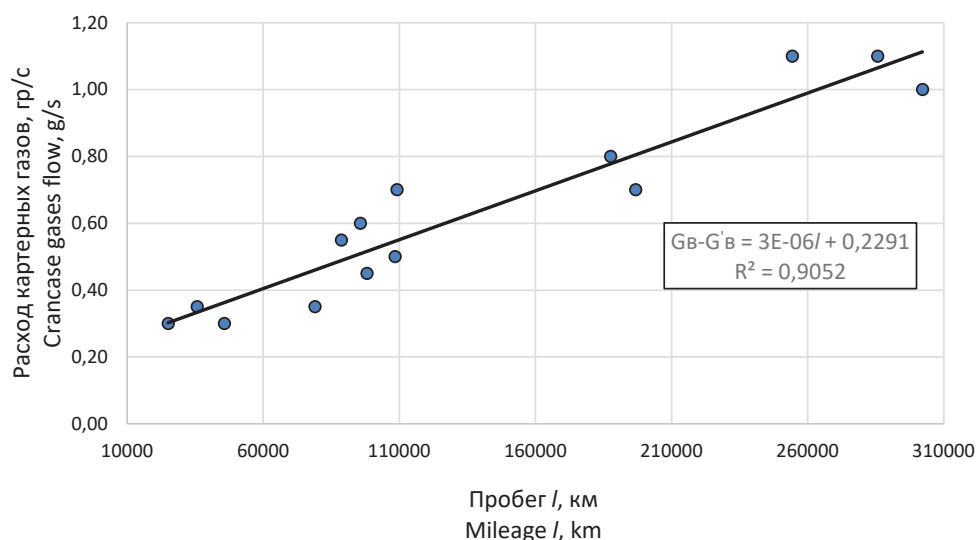


Рисунок 4 – График зависимости разности расхода воздуха на холостом ходу двигателей 306DT автомобилей Land Rover от пробега
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graph of the dependence of the difference in air consumption at idle speed of 306DT engines of Land Rover vehicles on mileage
Source: compiled by the authors.

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в ходе численного эксперимента, показали следующее:

1) Выявлена универсальная закономерность расхода картерных газов от износа ЦПГ, позволяющая проверять техническое состояние двигателя посредством штатных средств бортовой самодиагностики и нормировать диагностический параметр, пропорциональный расходу картерных газов в зависимости от литража двигателя и диаметров цилиндров.

2) Установлено, что с увеличением диаметра цилиндра уменьшается процентное соотношение прорывающихся газов через неплотности цилиндров от общей массы поступающего воздуха. Так, при изменении диаметра цилиндра от 83 до 144 мм и площади утечек в 1 мм² доля прорывающихся газов изменяется от 8,76 до 1,8%.

3) Производственной проверкой установлено, что разность расходов с изолированной и замкнутой системой вентиляции картера линейно зависит от пробега автомобиля.

4) Экспериментальная проверка возможности применения разности расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта как диагностического параметра показала, что данный параметр пропорционален как структурному параметру в виде площади неплотностей цилиндра, так и проверенному диагностическому параметру – расходу картерных газов.

Ограничения исследования

Предложенная методика и выявленные закономерности имеют следующие временные и эксплуатационные границы применимости:

- метод предполагает исправность системы принудительной вентиляции картера (PCV); негерметичность патрубков или неисправность клапана вентиляции могут искажать измеряемую разность расходов воздуха;
- линейная зависимость разности расходов от пробега установлена производственной проверкой, однако пробег является косвенным показателем износа; при различных условиях эксплуатации (нагрузка, качество масла, топлива, температурные режимы) один и тот же пробег может соответствовать разной степени износа ЦПГ, что следует учитывать при практическом применении.

Указанные ограничения не снижают ценности полученных результатов, но определяют область корректного применения предложенного диагностического подхода и направления для дальнейших исследований (в частности,

изучение влияния наддува, расширение размерного ряда двигателей, учет неисправностей системы вентиляции картера).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pavlov A., Karagodin V. Ensuring reliability of transportation vehicles with redundancy methods // MATEC Web of Conferences. 2021. Т. 334. С. 02028. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133402028>
2. Cui Y., Mu H., Yi X., Wei, S. Reliability Optimization Design of Diesel Engine System Based on the GO Method. Appl. Sci. 2023, 13, 3727. <https://doi.org/10.3390/app13063727>
3. Wang D.F., Yang H.X. Reliability Design Analysis of Engine //Intern. Combust. Engine Accessories. 2021. Т. 333. С.37-38.
4. Huang Y., Elvin C.Y. Ng, Yat-shing Yam, Casey K.C. Lee, Nic C. Surawski, Wai-chuen Mok, Bruce Organ, John L. Zhou, Edward F.C. Chan. "Impact of potential engine malfunctions on fuel consumption and gaseous emissions of a Euro VI diesel truck," Energy Conversion and Management, vol.184, pp. 521–529, Mar. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.076>
5. Дунаев А.В., Тарасенко В.Е., Жешко А.А. Бесприборные приемы контроля технического состояния автотракторных двигателей. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2024;1(57):199–205.
6. Чечет В.А., Демьяненко С.Н. Актуальность модернизации компрессионно-вакуумного метода в современных условиях // В сборнике: Доклады ТСХА: сб. ст. М., 2020. С. 310–312.
7. Шнитков Г.В., Воронин Д.М. Анализ современных способов оценки технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: материалы XIII Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры надежности и ремонта машин ФГБОУ ВО Новосибирского ГАУ, Новосибирск, 15 декабря 2021 г. Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета «Золотой колос», 2021. С. 54–58. EDN QMDDBM.
8. Понизовский А.Ю. Определение наработки двигателя по параметру неплотности цилиндропоршневой группы // В сборнике: Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: материалы XV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова. Новосибирск, 2023. С. 125–127.
9. Кривцов С.Н., Пукало А.В., Кривцова Т.И. Сравнение диагностических параметров оценки герметичности надпоршневого пространства цилиндров дизельного двигателя при прокручивании стартером без подачи топлива // Журнал ААИ. № 6. 2015. С. 54–57.
10. Krivtsov S.N., Krivtsova T.I., Grebennikov A.S. Rotational dynamics of piston diesel engine crank-

shaft with deactivated cylinders at idle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, 27 мая – 01 2019 года. Vol. 632. Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012040>. EDN DXEEMC.

11. Safonov A.V., Vervey M.L., Syrbakov A.P., Shnitkov G.V., Krivtsov S.N., Berezhnov N.N. Diagnostics of piston space tightness by pressure change in engine casing under dynamic loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, 27 мая – 01 2019 года. Vol. 632. Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012069> EDN SDQNXM.

12. Кулешов А.С., Козлов А.В., Фадеев Ю.М., Барченко Ф.Б. Программа ДИЗЕЛЬ-РК: Моделирование и оптимизация рабочих процессов ДВС // В сборнике: Двигатель-2010: материалы Международной конференции: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 287–292.

13. Kuleshov A., Mahkamov K. Multi-zone diesel fuel spray combustion model for the simulation of a diesel engine running on biofuel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2008;222(3):309-321. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE530>

14. Кулешов А.С., Фадеев Ю.М., Кулешов А.А. Развитие многозонных моделей для расчета сгорания в современных ДВС // Двигателестроение. 2017. № 2(268). С. 7–10. EDN ZCHZNH.

15. Быкова Ю.С., Вагин А.А., Андриянов С.М., Исламгулов Т.Ф., Сафин Р.Ф. Комплексный анализ прокладки газового стыка и элементов, ее окружающих, численным методом // Автомобильная промышленность. 2024. № 5. С. 11–19.

16. Kuleshov A., Grekhov L., "Multidimensional Optimization of DI Diesel Engine Process Using Multi-Zone Fuel Spray Combustion Model and Detailed Chemistry NOx Formation Model," SAE Technical Paper 2013-01-0882, 2013, <https://doi.org/10.4271/2013-01-0882>

17. Кривцов С.Н., Яковчук П.С., Деньгин И.Д. Влияние технического состояния дизельного двигателя на изменения давления в цилиндре // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 25-летию Института транспорта, Тюмень, 11–12 апреля 2024 года. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. С. 163–167. EDN SDZRYG.

18. Кривцов С.Н., Яковчук П.С. Метод диагностирования цилиндропоршневой группы автомобильного двигателя // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 116-й Международной науч.-техн. конференции. (Улан-Удэ, 2023). Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2023. С. 99–104.

19. Николаев Е.В., Филиппова Е.М. Техническое состояние цилиндро-поршневой группы и расход картерных газов // Техника и оборудование для села. 2011. № 3. С. 41–42.

20. Кулаков А.Т., Нуретдинов Д.И., Назаров Ф.Л. Контроль давления картерных газов дизельного двигателя при испытаниях и в эксплуатации для встроенной системы диагностирования // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2019. № 3 (82). С. 36–42.

REFERENCES

1. Pavlov A., Karagodin V. Ensuring reliability of transportation vehicles with redundancy methods // MATEC Web of Conferences. 2021. T. 334. P. 02028. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133402028>

2. Cui Y., Mu H., Yi X., Wei, S. Reliability Optimization Design of Diesel Engine System Based on the GO Method. Appl. Sci. 2023, 13, 3727. <https://doi.org/10.3390/app13063727>

3. Wang D. F., Yang H. X. Reliability Design Analysis of Engine //Intern. Combust. Engine Accessories. 2021. T. 333. P.37-38.

4. Huang Y., Elvin C.Y. Ng, Yat-shing Yam, Casey K.C. Lee, Nic C. Surawski, Wai-chuen Mok, Bruce Organ, John L. Zhou, Edward F.C. Chan. "Impact of potential engine malfunctions on fuel consumption and gaseous emissions of a Euro VI diesel truck," Energy Conversion and Management, vol. 184, pp. 521–529, Mar. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.076>

5. Dunaev A.V., Tarasenko V.E., Zheshko A.A. Non-instrumental methods for monitoring the technical condition of automotive and tractor engines. Mechanization and Electrification of Agriculture. 2024; 1 (57): 199–205.

6. Chechet V.A., Demyanenko S.N. Relevance of the modernization of the compression-vacuum method in modern conditions. In the collection: Reports of the Timiryazev Agricultural Academy: collection of articles. Moscow, 2020. Pp. 310-312.

7. Shnitkov G.V., Voronin D.M. Analysis of modern methods for assessing the technical condition of the cylinder-piston group of an internal combustion engine // The state and innovations of technical service of machines and equipment: Proceedings of the XIII international scientific and technical conference dedicated to the 70th anniversary of the Department of Reliability and Repair of Machines of the Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, December 15, 2021. Novosibirsk: Publishing center of the Novosibirsk State Agrarian University "Golden Ear", 2021. Pp. 54-58. EDN QMDDBM.

8. Ponizovsky A.Yu. Determination of engine operating time by the cylinder-piston group leakage parameter. In the collection: Status and Innovations in Technical Service of Machines and Equipment. Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Memory of Associate Professor M.A. Anfinogenov. Novosibirsk, 2023. pp. 125-127.

9. Krivtsov S.N., Pukalo A.V., Krivtsova T.I. Comparison of Diagnostic Parameters for Assessing the Tightness of the Above-Piston Space of Diesel Engine Cylinder Heads When Cranking with a Starter Without Fuel. *AAI Journal* No. 6, 2015, pp. 54-57.

10. Krivtsov S.N., Krivtsova T.I., Grebennikov A.S. Rotational dynamics of piston diesel engine crankshaft with deactivated cylinders at idle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, May 27 – 01, 2019. Vol. 632. Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012040>. EDN DXEEMC.

11. Safonov A.V., Verter M.L., Syrbakov A.P., Shnitkov G.V., Krivtsov S.N., Berezhnov N.N. Diagnostics of piston space tightness by pressure change in engine casing under dynamic loading. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, May 27 – 01 2019. Vol. 632. Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012069>. EDN SDQNXM.

12. Kuleshov A.S., Kozlov A.V., Fadeev Yu.M., Barchenko F.B. DIESEL-RK Program: Modeling and Optimization of Internal Combustion Engine Operating Processes. In the collection: Engine-2010: Proceedings of the International Conference: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2010. Pp. 287-292.

13. Kuleshov A., Mahkamov K. Multi-zone diesel fuel spray combustion model for the simulation of a diesel engine running on biofuel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*. 2008; 222(3): 309-321. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE530>

14. Kuleshov A.S., Fadeev Yu.M., Kuleshov A.A. Development of multi-zone models for calculating combustion in modern internal combustion engines. *Dvigatelsestroyeniye*. 2017. No. 2(268). P. 7-10. EDN ZCHZNH.

15. Bykova Yu.S., Vagin A.A., Andriyanov S.M., Islamgulov T.F., Safin R.F. Complex analysis of the gas joint laying and the elements surrounding it using a numerical method. *Automotive industry*. 2024. No.5. P. 11-19.

16. Kuleshov A., Grekhov L., "Multidimensional Optimization of DI Diesel Engine Process Using Multi-Zone Fuel Spray Combustion Model and Detailed Chemistry NOx Formation Model," SAE Technical Paper 2013-01-0882, 2013 <https://doi.org/10.4271/2013-01-0882>

17. Krivtsov S.N., Yakovchuk P.S., Dengin I.D. Influence of the Technical Condition of a Diesel Engine on Changes in Cylinder Pressure. Transport and Transport-Technological Systems: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 25th Anniversary of the Institute of Transport, Tyumen, April 11–12, 2024. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2024. P. 163–167. EDNSDZRYG.

18. Krivtsov S.N., Yakovchuk P.S. Method for diagnosing the cylinder-piston group of an automobile engine. Safety of wheeled vehicles under operating conditions: Proceedings of the 116th international scientific and technical conference. (Ulan-Ude, 2023). Ulan-Ude: Publishing house of VSGUTU, 2023. Pp. 99–104.

19. Nikolaev E.V., Filippova E.M. Technical condition of the cylinder-piston group and crankcase gas consumption. *Machinery and equipment for the village*. 2011; No. 3. pp. 41–42.

20. Kulakov A.T., Nuretdinov D.I., Nazarov F.L. Monitoring the crankcase gas pressure of a diesel engine during testing and operation for the built-in diagnostic system. Text: direct. *Socio-economic and technical systems: research, design, optimization*. 2019; No. 3 (82). P. 36-42.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Яковчук П.С. Сбор статистических данных, обработка данных, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, оформление рукописи, работа с графическим материалом (45%).

Кривцов С.Н. Формулировка направления, проблемы, темы исследования; общее руководство исследованиями (35%).

Дыгало В.Г. Обзор результатов предшествующих исследований; проверка статистических исследований (20%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yakovchuk P.S. Statistical data collection, data processing, writing and editing the text, article design, working with graphic material (45%).

Krivtsov S.N. Formulation of the research direction, problem statement, theme development; general management of the research (35%).

Dygalo V.G. Review of the results of previous studies; verification of statistical studies (20%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковчук Павел Сергеевич – аспирант кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8192-4953>,

SPIN-код: 3053-2935,

e-mail: pashajakovchuk@mail.ru

Кривцов Сергей Николаевич – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), также проф. кафедры «Машиноведение» Северо-Восточного федерального университета им М.К. Аммосова (677000, г. Якутск, ул. Белинского, д.58).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0462-8455>,

SPIN-код: 9278-4018,

e-mail: krivcov_sergei@mail.ru

Дыгало Владислав Геннадьевич – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал) (105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-5976>,

SPIN-код: 9072-3095,

e-mail: dygalovg@bmstu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakovchuk Pavel S. – postgraduate student, Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov Street, Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8192-4953>,

SPIN-code: 3053-2935,

e-mail: pashajakovchuk@mail.ru

Krivtsov Sergey N. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Lermontov St., 83), Professor of the Department of Mechanical Engineering, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov (677000, Yakutsk, Belinskiy Street, 58).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0462-8455>,

SPIN-code: 9278-4018,

e-mail: krivcov_sergei@mail.ru

Dygalo Vladislav G. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (Mytishchinskiy Branch) (5, 2-nd Baumanskaya Street, Moscow, 105005).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-5976>,

SPIN-code: 9072-3095,

e-mail: dygalovg@bmstu.ru