

---

---

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.  
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

---

---

УДК 621.43.06: 62-404.2

**ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАРТЕРНЫХ ГАЗОВ С МОТОРНЫМ МАСЛОМ**© 2021 г. В. И. Кубич<sup>1</sup>, О. Г. Чернета<sup>2</sup>, В. И. Бокарьов<sup>1</sup>, Е. П. Лещенко<sup>2</sup>,  
В. М. Юров<sup>3</sup>, В. С. Олешко<sup>4,\*</sup><sup>1</sup> *Национальный университет “Запорожская политехника”, Запорожье, Украина*<sup>2</sup> *Днепропетровский государственный технический университет, Каменское, Украина*<sup>3</sup> *Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Республика Казахстан*<sup>4</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия**\*e-mail: OleshkoVS@mai.ru*

Поступила в редакцию 22.02.2021 г.

После доработки 26.03.2021 г.

Принята к публикации 26.04.2021 г.

Рассматриваются актуальные аспекты оценки влияния картерных газов двигателя внутреннего сгорания на проявление эксплуатационных показателей моторного масла с учетом расходования его ресурса. Для математического описания изменения состояния моторного масла предложены комплексный критерий оценки его эксплуатационных показателей и критерий оценки нагружения картерными газами. При этом установлено, что изменение каждого из критериев в зависимости от ресурса и оборотов двигателя имеет экспоненциальный характер с достоверностью аппроксимации данных 0.95. Произведена оценка параметров предложенных критериев и показана возможность их совместного использования для диагностирования состояния моторного масла. Предварительно установлено, что развернутый эксплуатационный ресурс двигателя, на котором проявляются свойства моторного масла, может определяться моделируемым временем его взаимодействия с картерными газами.

*Ключевые слова:* моторное масло, картерные газы, давление, вязкость, критерий, ресурс

DOI: 10.31857/S0235711921040064

Известно, что надежность двигателей внутреннего сгорания определяется тремя группами факторов – конструкционными, технологическими и эксплуатационными. Причем если при проектировании и производстве двигателей надежность закладывается и обеспечивается в соответствии с конструкторско-технологической документацией, то в процессе их использования по назначению – проявляется в виде отказов, и поддерживается широким спектром мероприятий в соответствии с инструкциями и рекомендациями. Безотказность кривошипно-шатунного механизма, систем смазывания и вентиляции картера двигателя является одним из свойств его параметрической надежности в целом. Эффективное функционирование указанных элементов конструкции неразрывно связано с процессами подведения моторного масла к подшипникам скольжения, взаимодействия масляного аэрозоля в полостях двигателя (картерном пространстве, головке блока цилиндров и каналах) с картерными газами, очистки и удаления этих газов. Исследование этих процессов представляется актуальной научно-технической задачей, решаемой для обеспечения эксплуатационной надежности двигателей различного назначения.

**Анализ литературных источников.** На сегодняшний день вопросам обеспечения эффективного функционирования систем вентиляции картеров двигателей, взаимосвязи между состоянием двигателя и изменением показателей эксплуатационных свойств моторных масел уделяется большое внимание [1–9].

В работах [1–3] совершенствуются конструкции систем вентиляции картера: предлагается новая конструкция маслоотделителя, вводится дополнительный “сильфонный теплообменник”, выполняются дополнительные элементы в виде стенок и каналов связи, и др. технические решения. При этом рассматривается и оценивается содержание моторного масла в картерных газах. В работе [4] оценивается связь между износом цилиндропоршневой группы и расходом картерных газов. При этом установлено, что при “старении масла” расход картерных газов растет. В работе [5] предложен вариант управления вязкостью судовых моторных масел за счет интенсификации пополнения масла в масляной системе, а также за счет добавления в масло поверхностно-активных веществ. При этом установлен факт снижения роста “пристенной” и “объемной” вязкости моторного масла MLC30 фирмы Castrol по мере наработки дизеля S6A2 фирмы Mitsubishi.

Проводятся исследования на установление термоокислительной стабильности моторных масел, например, работы авторов [6, 7]. При этом пользуются специальными приборами, в которые помещают только свежие порции топлива, не предполагая их аэрацию иными газообразными веществами. В работах [7, 8] уделяется внимание исследованию влияния процесса старения моторного масла на его противоизносные свойства. Для этого предлагается отбирать пробы масел из работающих двигателей, что позволяет оценивать изменение их свойств по коэффициенту поглощения светового потока (метод прямого фотометрирования), по коэффициенту относительной вязкости, и его противоизносным свойствам на трехшариковой машине трения. При этом если масло использовалось с учетом взаимодействия с картерным газом, что предполагало объективность оценки потери свойств по вязкостному и термоокислительному показателям, то материалы шариков машины трения не соответствовали трибологическим системам материалов деталей двигателя.

**Постановка проблемы, формулирование цели.** Работа двигателя на холостом ходу сопровождается плохой вентиляцией камеры сгорания из-за прикрытой дроссельной заслонки, малой турбулизацией топливо-воздушной смеси из-за относительно медленного движения поршня, а отсюда и малой скорости ее сгорания. При этом пропуск газов в картер максимальный [8], что связано с уменьшением давления газов на внутреннюю поверхность компрессионных колец, и проявляющийся в большей мере при расходе ресурса цилиндропоршневой группы 50% и выше. Повышение вязкости моторного масла может быть обусловлено следующими причинами: термическая полимеризация масла и добавок, окисление, потери при испарении низкотемпературных фракций, попадание воды, аэрация, попадание антифриза. Если исключить четыре предыдущие причины, то стоит уделять внимание в первую очередь термической полимеризации и окислению [10].

Таким образом, влияние картерных газов на изменение эксплуатационных показателей масла имеет место и сопровождает работу цилиндров двигателя. Эффективность удаления картерных газов из двигателя задана конструктивными особенностями его системы вентиляции картера, а уменьшение величины аэрации – как свойствами самого масла, так и конструктивными особенностями системы смазки двигателя [10].

**Цель статьи** – описание разработки подходов к оценке интенсивности влияния картерных газов на изменение эксплуатационных показателей моторных масел.

**Математическая оценка влияния картерных газов на эксплуатационное состояние моторного масла.** Нароботка двигателя  $T$  до ремонта, режим работы двигателя, давление картерных газов влияют на протекание физико-химического взаимодействия жидкой фазы (моторного масла) и газообразной фазы (картерных газов) на границах их разде-

ла. Поэтому представляется важным изменение эксплуатационных показателей, которым уделяется особое внимание при контроле масел в процессе эксплуатации двигателей – кинематической вязкости, щелочному и кислотному числам, температуре вспышки в открытом тигле. Взаимосвязь между параметрами двигателя и показателями масла можно представить системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{100} &= f(T, n, p_e, p_k), \\ N_{al} &= f(T, n, p_e, p_k), \\ N_{as} &= f(T, n, p_e, p_k), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\gamma_{100}$  – кинематическая вязкость;  $T$  – наработка двигателя до очередного ремонта;  $n$  – частота вращения коленчатого вала двигателя;  $p_e$  – нагрузка на двигатель (среднее эффективное давление за цикл);  $p_k$  – давление картерных газов;  $N_{al}$  – щелочное число;  $N_{as}$  – кислотное число.

Из системы уравнений (1) следует, что параметры, выступающие в роли аргументов функции, по совокупности отображения характера протекания рабочих процессов в двигателе и взаимосвязи между собой представляется возможным в формуле (2) выразить в виде безразмерного критерия оценки нагружения моторного масла картерными газами  $\pi_k^m$

$$\pi_k^m = Tn \frac{p_e}{p_k}. \quad (2)$$

В формуле (2) вместо нагрузки на двигатель (среднего эффективного давления за цикл) целесообразно использование величины разрежения на впуске  $p_0$ , которое определяется экспериментально в процессе диагностирования двигателя. Такой подход позволяет опираться на прямо измеренные параметры, в том числе в реальных условиях эксплуатации двигателя [10].

Эксплуатационные показатели моторного масла представляются в виде безразмерного комплексного оценочного критерия  $E_M$ . Тогда система уравнений (1) примет вид (3)

$$E_M = \frac{\gamma_{100}^H N_{al}}{\gamma_{100}^T N_{as}} = f(\pi_k^m), \quad (3)$$

где  $\gamma_{100}^H$  и  $\gamma_{100}^T$  – номинальное и текущее значение кинематической вязкости,  $\text{мм}^2 \text{с}^{-1}$ .

Таким образом, анализ процесса взаимодействия картерных газов с компонентами моторных масел по показателям позволяет получить математическую модель предложенного критерия оценки  $E_M$ , зависящего от наработки двигателя  $T$ . Возможно получить и закономерности “старения” моторных масел, но при этом необходим сбор статистических сведений по наработке двигателей, имеющий большую трудоемкость.

Необходимый результат возможно получить с меньшей трудоемкостью при физическом моделировании в лабораторных условиях. При этом моделирование будет заключаться в имитации насыщения моторного масла картерными газами. Тогда характеристикой прогнозируемой наработки масла будет время его насыщения картерными газами  $t$ , которое представляет собой величину ускорения моделируемого физического процесса в реальном двигателе. Вследствие этого формулу (3) можно преобразовать в формулу

$$E_M = f\left(\frac{tnp_0}{p_k}\right). \quad (4)$$

Для вычисления критерия  $E_M$  согласно формуле (4) с учетом реальной работы автомобильного двигателя необходимо: 1) получить образцы масел, взаимодействующих с

картерными газами реального двигателя на соответствующих режимах его работы; 2) провести исследование параметров моторных масел и определить величины  $E_M$ ; 3) определить коэффициенты функциональной зависимости, которой будут графически аппроксимироваться полученные статистические данные.

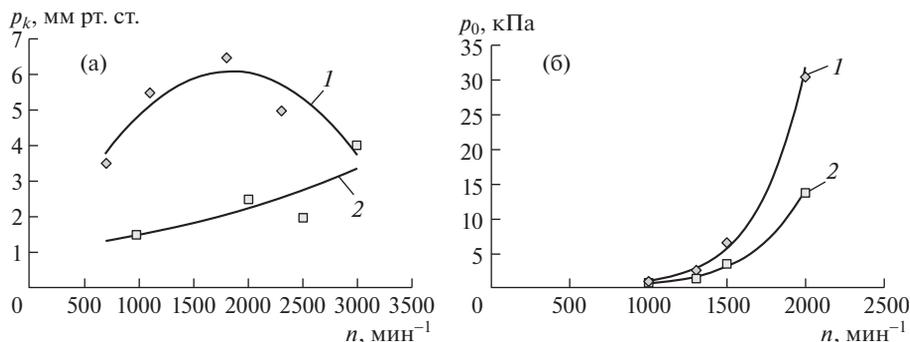
Графоаналитические модели целесообразно определять для моторных масел, взаимодействующих с картерными газами с соответствующей динамикой. Динамика взаимодействия масел с картерными газами зависит от длительности и интенсивности насыщения свежего масла картерными газами двигателя с учетом износа пары трения “кольцо—цилиндр”. Полученные модели позволят, например, определить время эксплуатации двигателя, момент целесообразного управляющего воздействия на какую-либо систему двигателя (к примеру, на систему вентиляции картера). Таким образом появляется возможность прогнозирования эксплуатационных показателей масел с учетом изнашивания цилиндропоршневой группы и управления эффективностью системы вентиляции картера двигателя. Но при этом необходимо использование вместо времени моделирования  $t$  величины текущей наработки  $T$  [10].

Взаимодействие компонентов жидкой и газообразных фаз может протекать, как по поверхностям отдельно взятых мелкодисперсных частиц — молекулах, так и в их средоточениях — объемах. Важным является то, какие по строению и массе углеводороды представляют основу моторного масла — минеральные, полусинтетические или же синтетические смазочные композиции с соответствующими присадками, от которых зависит назначение масел и их эксплуатационные режимы работы.

Важным критерием является установление закономерностей влияния интенсивности старения моторного масла по параметру  $E_M$  на интенсивность протекания процессов коррозионно-механического изнашивания материалов трибосопряжений, лимитирующих ресурс двигателя. К таким трибосопряжениям относятся “шейка вала—вкладыш” коленчатого, распределительного вала, “кольцо—цилиндр (гильза цилиндра)” цилиндропоршневой группы двигателя. Поэтому необходимо уделять внимание этому вопросу, моделируя контактное взаимодействие материалов на малогабаритных образцах в лабораторных условиях. Например, предлагается использовать схему трения “диск—колодка” и трибологические системы материалов “40X-(15W-40 и картерные газы)-АО20-1”, “сталь 45-(15W-40 и картерные газы)-АО20-1”, “ВЧ800-(10W-40 и картерные газы)-АО20-1”, “КЧ50-(5W-30 и картерные газы)-АО20-1” и другие.

**Экспериментальная оценка влияния картерных газов на эксплуатационное состояние моторного масла.** С целью предварительной оценки изменения эксплуатационных свойств моторных масел при принудительном обогащении картерными газами были проведены натурные испытания. Методика испытаний заключалась в следующем. Отводящий патрубок системы вентиляции двигателя, прогретого до рабочей температуры, помещался в стеклянный сосуд с полусинтетическим маслом Wolf 10W-40. Расход ресурса двигателя составлял более 85%, пробег автомобиля 130 тыс. км. Объем моторного масла составлял 200 мл. При этом время насыщения составляло  $t_1 = 1$  мин и  $t_1 = 3$  мин при  $n_1 = 975$  мин<sup>-1</sup> и сменными режимами  $n_2 = 1000$ –3500 мин<sup>-1</sup> в течение  $t_2 = 35$  с. Во время обогащения мерных объемов масла производились замеры давлений пульсирующего истечения картерных газов через патрубок вентиляции. Для этого в патрубке было выполнено отверстие соответствующего диаметра. Давление  $p_k$  измеряли манометром MediTech, которое на прогревом двигателе при  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup> составляло от 0.2 до 0.3 кПа, а при  $n = 3000$  мин<sup>-1</sup> величина  $p_k$  составляла от 0.53 до 0.59 кПа.

Отмечено, что чем ниже частота вращения коленчатого вала, тем выше амплитуда колебаний давлений картерных газов. При этом характер изменения давлений газов при увеличении частоты вращения холостого хода по мере прогрева двигателя неоднозначный (рис. 1а). При температуре от 25 до 35°С и  $n = 2200$  мин<sup>-1</sup> фиксировалось дав-



**Рис. 1.** Результаты эксперимента: (а) – зависимость давления газов от частоты вращения коленчатого вала: 1 – при прогреве двигателя от 40 до 70°C; 2 – при установившейся температуре от 85 до 90°C; (б) – зависимость разрежения на впуске (1) и  $p_0/p_k$  (2) от частоты вращения коленчатого вала при установившейся температуре от 85 до 90°C.

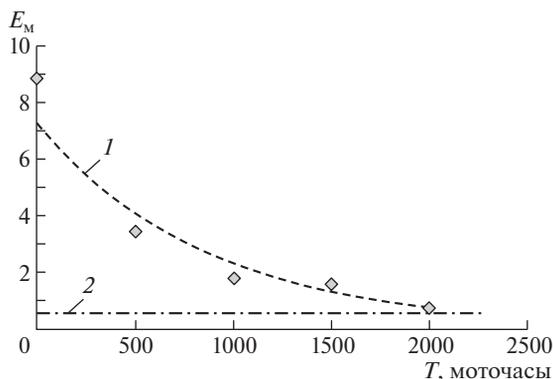
ление  $p_k = 1.07$  кПа. При прогреве двигателя от 40 до 70°C аппроксимация полученных данных выражается полиномиальной зависимостью с достоверностью  $R^2 = 0.82$  и с максимумом давлений газов в диапазоне  $n = 1500\text{--}2000$   $\text{min}^{-1}$ . При установившейся нормальной температуре двигателя от 85 до 90°C аппроксимация полученных данных выражается экспоненциальной зависимостью с достоверностью  $R^2 = 0.72$ . Также определены значения разрежений на впуске, которые измерялись в задрессельном пространстве карбюратора при прогревом двигателя и прикрытии воздушной заслонки (рис. 1б). Аппроксимация полученных данных выражается экспоненциальной зависимостью с достоверностью  $R^2 = 0.99$ . Аппроксимация отношения  $p_0/p_k$  также выражается экспоненциальной зависимостью с достоверностью  $R^2 = 0.99$ .

Для сравнительной оценки показателей моторного масла использовались его пробы, взятые из картера двигателя с присадкой “Ремол-2” в начале периода эксплуатации масла, и при его окончании.

Все образцы моторного масла исследовались в специализированной лаборатории. Определялись следующие показатели: кинематическая вязкость  $\gamma$  при 100 и 40°C,  $\text{мм}^2 \text{с}^{-1}$ ; щелочное число  $N_{al}$ , мг КОН/г; кислотное число  $N_{as}$ , мг КОН/г; концентрации химических элементов Zn, P, S, Ba, Ca.

Анализ полученных данных указывает на следующее. В целом направленность протекания процесса взаимодействия картерных газов с маслом совпадает с характером уменьшения кинематической вязкости. Это свидетельствует в первую очередь о разбавлении масла продуктами несгоревшего топлива, содержащегося в картерных газах. При этом протекание процессов термического разрушения маловероятно.

Динамика уменьшения щелочного числа – от 0.2 до 3.9%. Однако увеличения кислотного числа не наблюдается. Но с одной из проб масла ситуация иная. Здесь имеет место потеря эксплуатационных свойств моторного масла по рассматриваемым показателям: вязкость уменьшилась на 41%, щелочное число уменьшилось на 17%, кислотное число увеличилось на 2%. Отмечено, что добавление присадки “Ремол-2” обуславливает снижение вязкости на 12%, что выше критического уровня. Уменьшение щелочного числа при этом составляет 6%, и снижение кислотного числа на 24%. Таким образом, на фоне значимого влияния ускоренного обогащения “свежего” моторного масла картерными газами, проявление свойств присадки “Ремол-2” на срабаты-



**Рис. 2.** Зависимость критерия  $E_M$  от наработки газопоршневых двигателей: 1 – текущие значения; 2 – критическое значение.

вание пакета основных присадок неоднозначное. Это вызвано ограниченностью экспериментальных данных. Что касается изменений в концентрации химических элементов, то она примерно пропорциональна изменению щелочного числа.

Если произвести оценку критерия, то его значения в соответствии с выражением (3) для образцов масел составят: № 1 – 2.33; № 2 – 2.45; № 3 – 3.11; № 4 – 3.27; № 5 – 3.17. Предварительно, оценивая только образцы № 1–3, следует считать, что чем меньше значение критерия  $E_M$ , тем выше его функциональность эксплуатационных свойств.

Оценив критерий  $E_M$  для масла GProfi PSN 40 при обработке результатов исследований [9], нами получены другие результаты (рис. 2), показывающие, что критерий  $E_M$  с увеличением наработки двигателей  $T$  по экспоненциальной зависимости (при достоверности аппроксимации данных  $R^2 = 0.95$ )

$$E_M = ae^{bT}, \quad (5)$$

где  $T$  – наработка двигателя, мото­часы;  $a = 7.23$ ,  $b = -0.001$  – коэффициенты экспоненциальной зависимости для моторного масла GProfi PSN 40.

Результаты исследований (рис. 2) показывают, что: 1) критерий  $E_M$  отражает динамику изменения показателей масла по наработке двигателей; 2) для более точного определения закона изменения  $E_M$  необходимы более обширная статистика; 3) для конкретно рассматриваемого класса моторного масла коэффициенты  $a$  и  $b$  формулы (5) будут иметь свои конкретные значения.

Таким образом, складываются предпосылки к получению массива данных по предложенному критерию. При этом появляется возможность прогнозировать эксплуатационные свойства моторных масел по наработке двигателя, работающего на соответствующих режимах [10].

Из выражения (5) следует, что развернутый эксплуатационный ресурс  $T$ , на котором проявляются свойства моторного масла в соответствии с выражением (4) может определяться моделируемым временем  $t$  взаимодействия свежего объема моторного масла с картерными газами. Логичным представляется и то, что это время может рассматриваться как свернутый моделируемый ресурс с учетом масштабного коэффициента (коэффициента ускорения нагружения моторного масла картерными газами).

**Выводы.** Учет предложенных в статье критериев позволяет выполнять оценку влияния картерных газов на эксплуатационное состояние моторного масла по мере расхо-

дования двигателем своего ресурса. Для определения более точных количественных характеристик конкретных сортов масел необходимо проведение более обширных статистических исследований. Предложенные подходы с учетом результатов экспериментальных исследований применимы и для других сортов масел, а также типов и моделей двигателей внутреннего сгорания.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны за помощь в техническом редактировании, редактировании перевода статьи Патрику Ван Рименанту, доценту факультета инженерных технологий, руководителю отдела обучения кафедры сварочного оборудования Левенского Католического университета, Кампус Де Найер, Синт-Кателейне-Вавер, Ян де Найерлаан 5, Бельгия, 2860, e-mail: patrick.vanrimentant@kuleuven.be.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриянов С.М., Никишин В.Н., Куликов А.С. Анализ и разработка маслоотделителя системы вентиляции картера высокофорсированного автомобильного двигателя // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 10. С. 20. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30291178>.
2. Парфенов Ю.А. Устройство вентиляции картерных газов. Патент РФ на изобретение № 2509220. Опубликовано 10.03.2014. Бюллетень № 7.
3. Ponomarev I.A., Kopylov K.A. Reducing the Level of Engine Oil Reflux into the Crankcase Ventilation System of a V-engine // The History of Land Transport. 2018. № 4 (1). С. 26. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36984570>.
4. Дунаев А.В. Разработка методов контроля и управления техническим состоянием самоходных машин в агропромышленном комплексе. Дисс. ... д.т.н. М.: Российский государственный аграрный университет. МСХА имени К.А. Тимирязева, 2016. 397 с.
5. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки: электронный научный журнал. 2018. № 3 (48). С. 67. <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/5651>
6. Агровиченко Д.В., Ковальский Б.И., Безбородов Ю.Н. Количественная оценка влияния доливов на термоокислительную стабильность частично синтетических моторных масел // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 3 (21). С. 46. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43126942>
7. Ковальский Б.И., Шрам В.Г., Петров О.Н., Сокольников А.Н., Иванова С.И. Исследование влияния процессов окисления на вязкостно-температурные свойства моторных масел // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Выпуск 7. Часть 2. С. 182. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27157058>
8. Кравцова Е.Г., Верещагин В.И., Ковальский Б.И., Лысянникова Н.Н., Шрам В.Г. Контроль состояния моторного масла Ravenol VSI 5W-40 SM/CF по концентрации продуктов старения и противоизносным свойствам // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Выпуск 7. Часть 1. С. 214. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25070436>
9. Корнеев С.В., Пашукевич С.В., Тришкин А.О., Буравкин Р.В. Изменение характеристик моторных масел в газопоршневых двигателях большой мощности // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. Выпуск 4–5 (56–57). С. 36. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30046079>
10. Кубич В.И., Чернета О.Г. Комплексный критерий оценки эксплуатационного состояния моторного масла // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обслуговування для їх обслуговування: СЕУТТОО-2020. Матеріали ІІ між нар. наук.-практ. конфер., 8–10 вересня 2019 року. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2020. С. 46. [http://kma.ks.ua/ua/images/fs/keseu/konferentsii/seutto\\_\\_2020.pdf](http://kma.ks.ua/ua/images/fs/keseu/konferentsii/seutto__2020.pdf)