

## **РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА МАСЛА НА УГАР ДЛЯ ДИЗЕЛЕЙ**

### **SKAIČIUOJAMASIS DYZELINIŲ VARIKLIŲ SUDEGINTOS ALYVOS NUSTATYMO METODAS**

Алексей Рэмович Кульчицкий

Владимирский Государственный университет, г. Владимир, Россия,  
*ark6975@mail.ru.*

*Gauta 2012-04- 30, pateikta spaudai 2012-09-07*

Одним из показателей технического состояния двигателя является расход масла “на угар”. Однако экспериментальная оценка этой величины, особенно на современных двигателях, отличающихся высоким совершенством конструкции и стабильностью показателей, затруднительна. Указанное обстоятельство объясняется, в первую очередь, длительностью необходимой процедуры, поскольку сокращение времени испытаний приведет к увеличению погрешности измерений. Выходом из положения может быть расчетная оценка указанного параметра по косвенным, экспериментально определяемым, показателям – концентрации суммарных углеводородов в отработавших газах. Это позволит своевременно и целенаправленно предпринимать меры по восстановлению регламентированных характеристик двигателя, а также сокращать негативные последствия загрязнения окружающей среды.

Описана методика расчетного определения расхода масла на угар для дизелей на основании экспериментальных данных о концентрации суммарных углеводородов в отработавших газах.

*Дизель, угар масла, суммарные углеводороды, расчет*

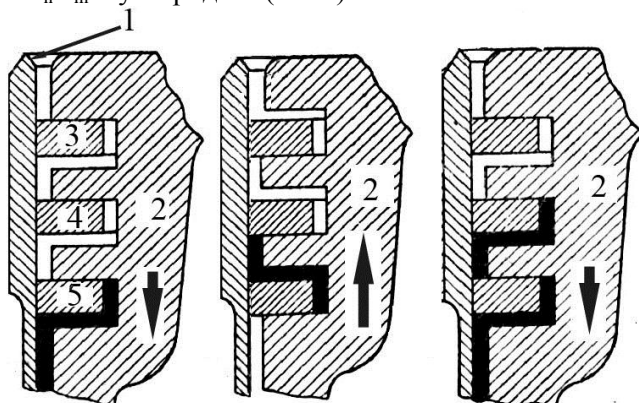
### **Введение**

Одним из показателей технического состояния двигателя является расход масла “на угар”. Однако экспериментальная оценка этой величины, особенно на современных двигателях, отличающихся высоким совершенством конструкции, а соответственно, и крайне малым расходом масла на угар, затруднительна.

### **Состояние вопроса**

При работе поршневого двигателя некоторое количество смазочного масла, обеспечивающего смазку и герметизацию пар трения “поршень-

цилиндр” (рис.1) и “впускные и выпускные клапаны головки цилиндра-направляющие клапанов”, попадает в камеру сгорания. Там оно подвергается воздействию высоких температур и сгорает с образованием как продуктов полного сгорания – диоксида углерода  $\text{CO}_2$  и воды  $\text{H}_2\text{O}$ , так и неполного – углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_m$  и углерода  $\text{C}$  (сажи).



**Рис.1.** Схема насосного действия поршневых колец.

Обозначение: 1- стенка цилиндра, 2 – поршень, 3, 4 и 5 – поршневые кольца; стрелкой указано направление движения поршня

**1 pav.** Žymėjimas: 1 – cilindro sienelė. 2 – stūmoklis, 3, 4 ir 5 – stūmoklio žiedai, rodykle nurodyta stūmoklio judėjimo kryptis

Указанное количество масла представляет собой безвозвратные потери – т.н. расход масла “на угар” ( $\Delta G_m$ ). Оценка значения  $\Delta G_m$  позволяет контролировать техническое состояние двигателя, поскольку резкий рост этой величины указывает, в первую очередь, на ухудшение функционирования поршневых колец. В условиях эксплуатации не всегда удается своевременно выявить подобный факт, поскольку по абсолютному значению величина  $G_m$  по сравнению с расходом топлива незначительна (от долей до нескольких процентов) и может привлечь на себя внимание только через несколько тысяч километров пробега. Поэтому разработка расчетного метода по косвенным показателям позволила бы сократить затраты времени на необходимую процедуру и своевременно предпринять меры устранению дефектов и обеспечению надежности двигателя.

Оценка величины расхода масла на угар производится в течение либо длительных испытаний (например, на основании 10-часового цикла испытаний двигателя согласно ГОСТ 18509-88 “Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний”), либо постоянно в ходе испытаний двигателя с помощью расходомеров масла (позволяющих производить оценку убыли масла в поддоне двигателя). Однако, во-первых, при длительных испытаниях невозможно получать данные оперативно. А во-вторых, погрешность измерения зависит от величины убыли масла, и чем меньше расход масла на угар, тем больше погрешность его оценки, поскольку

□  $G_m$  определяется как разница двух больших величин. Последнее обстоятельство определяет повышенную погрешность и в случае применения расходомеров масла для постоянного отслеживания указанной величины.

Продукты сгорания масла, также как и топлива, обуславливают уровень концентрации несгоревших (т.н. суммарных) углеводородов  $C_nH_m$  в отработавших газах (ОГ) двигателя. Указанная концентрация определяется экспериментально с помощью газоанализаторов. Дифференцировав эти два источника, можно оценить и расход масла на угар, и неполноту сгорания топлива. В принципе, это можно выполнить, добавив в масло изотопы какого-либо радиоактивного элемента, по концентрации которых (пропорциональной степени радиоактивности ОГ) можно найти искомую величину. Но подобный метод приемлем только в исследовательских целях, поскольку достаточно трудоемкий. На уровне же химического анализа  $C_nH_m$  разделить источники их происхождения невозможно: распад углеводородов как топлива, так и масла под воздействием высоких температур в камере сгорания – процесс достаточно вероятностный; к тому же и топливо и масло – это продукт переработки одного и того же продукта – нефти. Таким образом, хроматографический анализ углеводородов, находящихся в ОГ, также вряд ли даст ответ на искомый вопрос.

Однако возможно разделение указанных источников несгоревших углеводородов – топлива и масла – на уровне физической модели, учитывающей отличие факторов, определяющих неполноту сгорания исходных углеводородов топлива и масла.

### **Цель исследований**

Разработка физической и расчетной моделей определения концентрации в отработавших газах несгоревших углеводородов, источников которых является масло.

### **Методики испытаний и использованные средства измерений**

Методики испытаний определяются требованиями ГОСТ 18509-88 “Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний”.

Основные средства измерений: газоанализатор DiCom-4000/NOx (AVL DiTest GmbH, Австрия), Дымомер 415S (AVL DiTest GmbH, Австрия), расходомер топлива 730 (AVL DiTest GmbH, Австрия), расходомер воздуха PG-400 (Россия), измеритель крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала двигателя в составе стенда SAK-H-670 (ГДР).

### **Основные результаты и обсуждение**

Оценить концентрацию несгоревших углеводородов, источников которых является масло, возможно либо непосредственно, либо путем

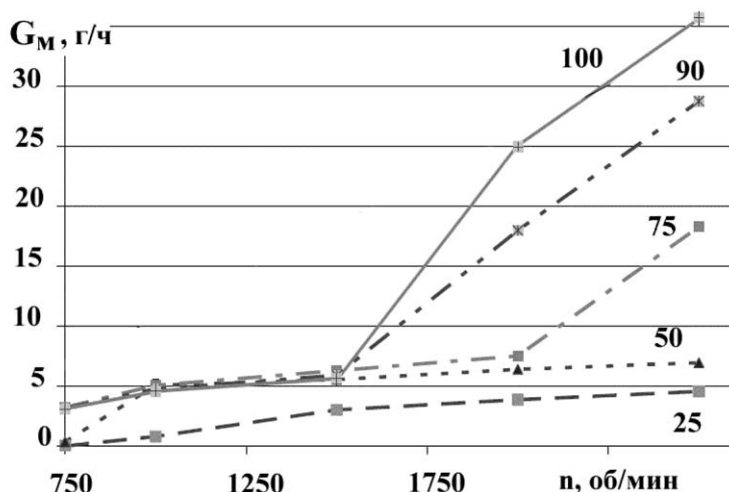
вычитания из концентрации суммарных углеводородов концентрации несгоревших углеводородов, источников которых является топливо.

На недогорание топлива оказывает влияние (не говоря о свойствах самого топлива) множество самых разнообразных факторов: характеристики топливоподачи (геометрия и количество топливных факелов, мелкость распыливания топлива и др.), характер движения воздушного заряда (интенсивность вихря, направленность, турбулентность, температура, плотность), соотношение количеств топлива, сгорающих по кинетическому и диффузионному режимам, момент начала впрыскивания топлива относительно верхней мертвой точки, продолжительность впрыскивания, изменение температуры продуктов сгорания в цилиндре в ходе сгорания-расширения, теплоотдача в стенки цилиндра, головки и поршня и т.д. Поэтому расчетным методом определить концентрацию несгоревших углеводородов  $CH_{fuel}$ , источником которых является топливо, в ОГ невозможно, соответственно, отправной точкой должны быть экспериментальные данные.

То же касается и оценки расхода масла на угар - указанная величина также зависит от множества факторов: состояния поверхностей поршня и цилиндра (качества обработки и степени износа), плотности прилегания поршневых колец к зеркалу цилиндра и поршню, зазоров в паре “втулки клапанов-направляющие”, испаряемости масла, температурного режима деталей двигателя, скоростного и нагрузочного режимов и т.д. Соответственно, так же как и в случае с углеводородами топлива, расчетным методом определить концентрацию несгоревших углеводородов масла  $CH_{oil}$  в ОГ невозможно; в данном случае исходными данными также должны быть результаты экспериментальных измерений.

Характерная зависимость концентрации суммарных углеводородов в ОГ дизелей отличается повышенными значениями  $C_nH_m$  на режимах низких и высоких нагрузок по сравнению с аналогичными данными на средних нагрузках независимо от скоростного режима. Это объясняется сочетанием характера топливоподачи и состояния воздушного заряда: при низких нагрузках продукты сгорания переохлаждены, а при высоких начинает сказываться недостаток времени на догорание углеводородов. В обоих случаях увеличивается неполнота сгорания топлива. Качественная же зависимость массового расхода масла на угар  $\Delta G_m$  имеет сложную зависимость от скоростного режима и нагрузки. Например, данные, полученные фирмой Cummins на двигателе ISB-300 с турбонаддувом, системой топливоподачи типа Common Rail и рециркуляцией ОГ (рис.2).

Подобная зависимость  $\Delta G_m$ , скорее всего, определяется температурным режимом в камере сгорания: чем выше нагрузка, тем выше температура в пристеночных слоях камеры сгорания, и тем большее количество масла выгорает. Однако подобная зависимость  $\Delta G_m$  от нагрузки может быть достаточно индивидуальна (в отличие от характера выгорания топлива).



**Рис.2.** Характерная зависимость массового расхода масла на угар  $\Delta G_M$  от скоростного  $n$  и нагрузочного режимов [1].

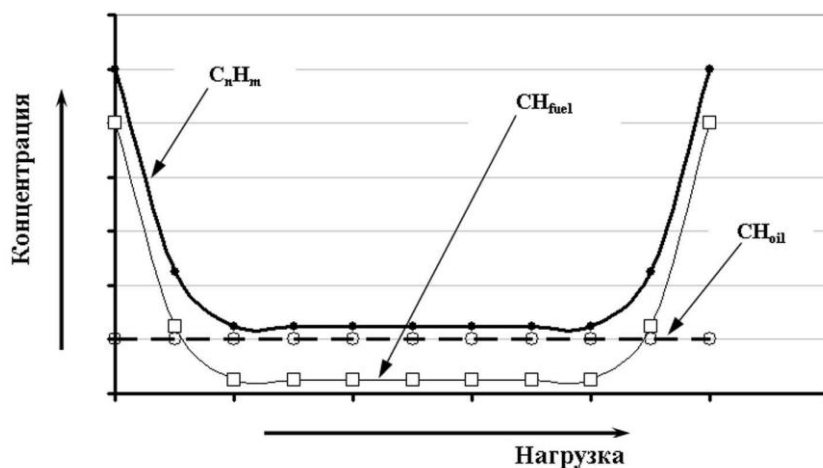
Обозначения: числа около кривых – процент нагрузки двигателя от полной.

**2 pav.** Charakteringa masinių sudegintos alyvos sąnaudų  $\Delta G_M$  priklausomybė nuo greitinio ir apkrovos režimų [1].

Žymėjimai: skaičiai šalia kreivių – procentinė variklio apkrova skaičiuojant nuo visos

На основании приведенных данных можно предложить следующий характерный вид зависимости концентрации углеводородов топлива  $CH_{fuel}$  и углеводородов масла  $CH_{oil}$  от нагрузки: для первых минимум значения лежит в зоне средних нагрузок, а значения вторых ( в первом приближении) неизменны во всем диапазоне нагрузок. Концентрации суммарных углеводородов  $C_nH_m$  в ОГ – это, естественно, сумма  $CH_{fuel}$  и  $CH_{oil}$  (рис.3).

Таким образом, в случае полного сгорания топлива концентрация суммарных углеводородов в ОГ полностью определяется концентрацией углеводородов масла. Для определения этого, минимального значения концентрации углеводородов в ОГ на каком-либо режиме, возможны разные варианты. Например, проведение испытаний в различной комплектации: разные топливные насосы высокого давления, форсунки (в том числе – разные регулировки форсунок), распылители, турбокомпрессоры и т.п. Все эти действия обусловят изменение характера протекания рабочего процесса, соответственно и концентрацию углеводородов в ОГ. Но угар масла при этом не изменится (или же изменится незначительно по абсолютной величине). Таким образом, минимальная концентрация углеводородов в ОГ – это концентрация, определяемая углеводородами масла  $CH_{oil}$ . И эта величина определяет расход масла на угар на этом режиме.



**Рис. 3.** Упрощенная зависимость концентрации углеводородов топлива  $CH_{fuel}$  и масла, а также суммарных углеводородов  $C_nH_m$  в отработавших газах от нагрузки дизеля

**3 pav.** Supaprastinta degalų  $CH_{fuel}$  ir alyvos  $CH_{oil}$  kilmės angliavandenilių koncentracijos priklausomybė, o taip suminių angliavandenilių kiekio  $C_nH_m$  deginuose kitimas priklausomai nuo variklio apkrovos

Для условий стендовых испытаний двигателя подобная методика оценки расхода масла на угар вполне приемлема, поскольку время испытаний например с двумя комплектами форсунок меньше, чем 10-часовые испытания согласно ГОСТ 18509-88. Однако оперативность намного не изменится, а в условиях эксплуатации – вряд ли приемлемо. Для решения остающихся проблем возможен другой подход – снятие нагрузочной характеристики двигателя (т.е. без изменения его комплектации). Но для этого необходимо принять ряд следующих допущений:

- продукты сгорания масла представлены только углеводородами  $C_nH_m$ ; продукты полного сгорания – диоксид углерода и вода – отсутствуют. Подобное предположение вполне оправдано, поскольку масло испаряется с поверхностей, температура которых гораздо ниже, чем в зоне горения, и, к тому же, не имеет возможности для качественного перемешивания с окислителем. Т.е. концентрацией продуктов полного сгорания можно пренебречь. Это позволяет учесть все масло, которое безвозвратно потеряно вследствие сгорания посредством измерения концентрации углеводородов в ОГ.
- концентрация углеводородов масла  $CH_{oil}$  в ОГ зависит только от скоростного режима и не зависит от нагрузки. В этом случае при снятии нагрузочной характеристики минимальное значение концентрации углеводородов будет обусловлено только маслом. Это позволит оценить неполноту сгорания топлива при других нагрузках

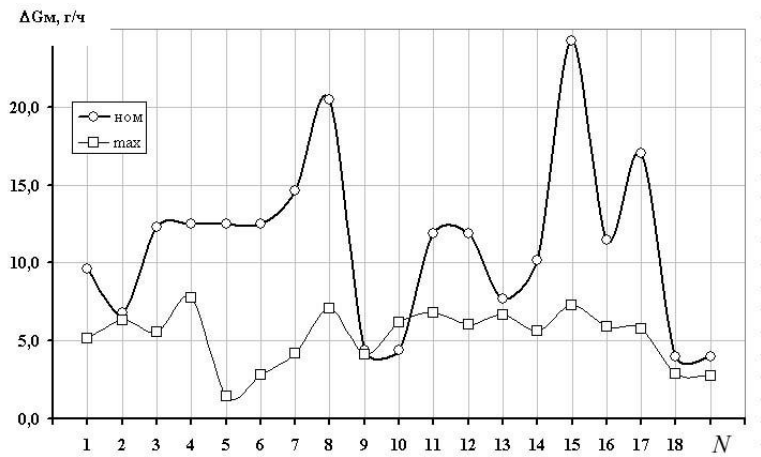
на основании данных о превышении указанного минимального значения.

Уровень неопределенности предлагаемой модели оценки расхода масла на угар связан:

- с неполнотой сгорания топлива при любых нагрузках, что обусловит завышение минимального значения концентрации углеводородов масла, т.е. завышение расчетного значения расхода масла на угар;
- неучетом доли масла, которое переходит в сажу (т.е. в углерод), что, впрочем, для современных дизелей, отличающихся низким уровнем дымности ОГ даже на режимах внешней скоростной характеристики, не создаст повышенной погрешности;
- допущением независимости расхода масла на угар от нагрузки (что может быть устранено в дальнейшем путем оценки искомой величины для конкретного типа двигателя);
- погрешностью экспериментального определения концентрации суммарных углеводородов в ОГ (в данном случае погрешность измерения зависит от погрешности газоанализатора и наличия подогрева газоотборной магистрали; последнее рекомендуется обеспечивать на уровне  $190 \pm 10$  °C с целью недопущения конденсации углеводородов и их оседания в магистрали). Это может привести к занижению измеряемых величин концентраций углеводородов, т.е. к занижению данных о расходе масла на угар.

Предложенная модель позволяет определять величину расхода масла на угар в течение короткого промежутка времени и на разных скоростных режимах, что невозможно как при стандартных 10-часовых испытаниях, так и при использовании расходомера масла. Предлагаемая методика позволяет рассчитать эмиссию углеводородов масла с ОГ дизеля на каждой нагрузке (в г/ч и г/кВтч). Также возможно определение относительного (в % от расхода топлива) расхода масла на угар, в том числе согласно методике ГОСТ 18509-88 (на режиме 90% от номинальной мощности). Кроме того, количество не полностью сгоревшего масла вносит свой вклад в эмиссию дисперсных частиц с ОГ; соответственно, получая информацию о соотношении эмиссии углеводородов, можно оценить вклад, вносимый топливом и маслом, и направить усилия на решение проблем либо рабочего процесса, либо технического состояния двигателя (или же качества его изготовления).

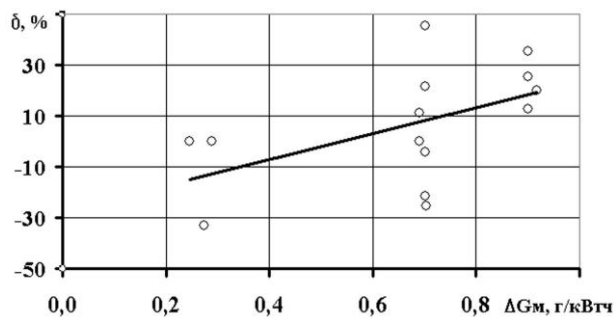
Сопоставление расчетного и экспериментального методов показало, что отклонение не превышало  $\pm 30$  %, при этом в 5 случаях отклонение не превышало  $\pm 10$  % (рис.4 и 5).



**Рис. 4.** Результаты расчетного определения расхода масла на угар. Обозначения: ном, max - режимы частоты вращения коленчатого вала, соответствующие номинальной мощности и максимальному крутящему моменту, соответственно.

**4 pav.** Skaičiuojamieji sudegintos alyvos sąnaudų rezultatai.

Žymėjimai: vardiniai, maksimalūs – alkūninio veleno sukimosi dažnio režimai, atitinkantys variklio vardinei galiai ir maksimaliam sukimo momentui, atitinkamai



**Рис.5.** Оценка погрешности расчетного метода определения расхода масла на угар относительно экспериментального метода.

**5 pav.** Skaičiuojamojo sudegintos alyvos sąnaudų nustatymo metodo netikslumų įvertinimas santykinio eksperimentinio metodo atžvilgiu.

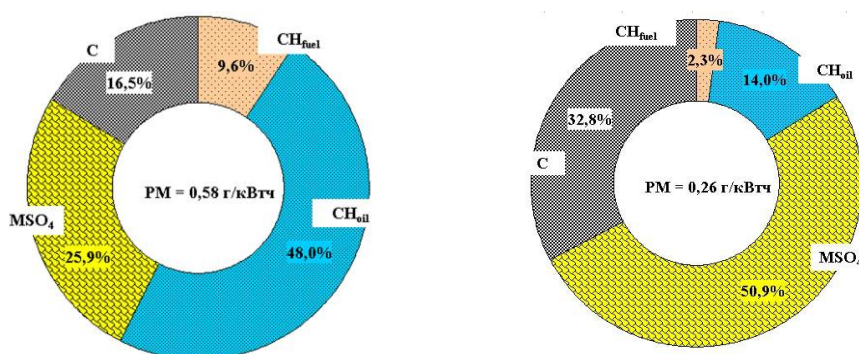
Испытания проведены на девяти тракторных дизелях (как воздушного, так и жидкостного охлаждения; как с наддувом, так и без него; в общей сложности – 14 комплектаций). При этом в ходе 30-часовых испытаний (которые потребовались для проведения 19 циклов испытаний) на режиме номинальной мощности выявлено наличие закономерности, выражающейся в периодическом (приблизительно через каждые 12 ч) изменении величины  $\Delta G_m$  (см. рис. 4). Возможной причиной подобной периодичности изменения расхода масла на угар может быть совпадение



положения замков поршневых колец вследствие их перемещение относительно окружности поршня, что ухудшает уплотнение пары “поршневое кольцо-зеркало цилиндра”.

По стандартной методике проведение 19 циклов испытаний заняло бы 190 ч, но выявить подобную закономерность не удалось бы, поскольку в этом случае имеем усреднение за каждый цикл, т.е. за каждые 10 ч. На режиме максимального крутящего момента (т.е. при меньшей частоте вращения коленчатого вала) значение  $\Delta G_M$  практически постоянно.

В дополнение можно отметить, что получаемые данные по концентрации углеводородов масла  $CH_{oil}$  в ОГ позволяют проводить расчетное определение эмиссии дисперсных частиц с ОГ дизелей, поскольку часть высокомолекулярных углеводородов при конденсации переходит из газообразного состояния в жидкое и твердое, оказывая тем самым вклад в эмиссию дисперсных частиц (рис.6) [2].



**Рис.6.** Характерные значения относительной эмиссии углеводородов топлива  $CH_{fuel}$  и масла  $CH_{oil}$ , сажи C и твердых сульфатов  $MSO_4$  с отработавшими газами дизеля

**6 pav.** Santykinės angliavandenilių emisijos degalų  $CH_{fuel}$  ir alyvos  $CH_{oil}$  kilmės, suodžių C ir kietųjų sulfatų  $MSO_4$  charakteringos reikšmės dyzelinio variklio deginiuose

## Выводы

1. Сопоставление погрешностей предложенного расчетного метода определения расхода масла на угар в дизелях по данным измерения суммарных углеводородов в отработавших газах двигателей, с одной стороны, и экспериментального метода по ГОСТ 18509-88, с другой стороны, показало удовлетворительное совпадение (в пределах  $\pm 30\%$ ).
2. Проведенные исследования выявили наличие закономерности, выражающейся в периодическом (приблизительно, через каждые 12 ч работы двигателя) изменении величины массового расхода масла на

- угар. С увеличением скоростного режима эта закономерность проявляется более четко.
3. Косвенная оценка расхода масла на угар в дизелях по данным измерения суммарных углеводородов в отработавших газах позволяет сократить затраты топлива и времени при проведении соответствующих испытаний и повысить оперативность оценки технического состояния двигателя, что особенно важно для крупногабаритных двигателей.

### Библиографический список

1. Plumley M. Lubricant Formulation and Consumption Effect on Diesel Exhaust Ash Emission: Measurement and Sample Analyses from a HD Diesel Engines / 11-th DEER Conference, August 25, 2005 / Massachusetts Institute of Technology, Chicago, Illinois, USA. – 2005.
2. Кульчицкий А.Р. Метод оперативного контроля эмиссии дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей / Lithuanian University of Agriculture, Research paper 42(2-3), Akademija, 2010. – p. 127–140

A.R. Kulchitskiy

## SKAIČIUOJAMASIS DYZELINIŲ VARIKLIŲ SUDEGINTOS ALYVOS NUSTATYMO METODAS

### SANTRAUKA

Variklinės alyvos sąnaudos nustatomos pagal angliavandenilių kiekį deginiuose yra vienas iš rodiklių, naudojamų variklio techninei būklei įvertinti. Tačiau eksperimentinis su deginiais išmetamų angliavandenilių kiekio vertinimas, ypač naudojant modernius tobulus variklius, yra pakankamai sudėtingas. Tai paaiškinama matavimo procedūrai reikiamo laiko trukme, nes, visų pirma, bandymų laiko sumažėjimas gali sąlygoti dideles matavimo klaidas. Šią problemą galima išspręsti netiesiogiai nustatant sudegintos alyvos sąnaudas apskaičiavimo metodu, pavyzdžiui, pagal visų nesudegusių angliavandenilių koncentraciją išmetamosiose deginiuose. Tai leistų akimirksniu ir tinkamai priimti reikiamas priemones variklio reglamentuojamoms savybėms atkurti ir tokiu būdu sumažinti neigiamus poveikį aplinkos taršai.

Pateiktas variklio sudeginamos alyvos sąnaudų nustatymo skaičiuojamasis metodas, kuris paremtas visų nesudegusių angliavandenilių koncentracijos išmetamosiose deginiuose eksperimentiniais matavimų duomenimis.

*Dyzelinis variklis, aliejus, bendras nesudegusių angliavandenilių kiekis, skaičiavimo metodas*

A.R. Kulchitskiy

CALCULATION METHOD FOR DETERMINATION OF DIESEL OIL  
CONSUMPTION

Abstract

The oil consumption determined as the amount of carbons is one of the indexes used for evaluation of the engine technical state. However, the experimental evaluation of hydrocarbons quantity, especially in the case of using modern engines, having high perfection of structure and stability of indicators, is difficult. This fact is explained first of all by the duration of the necessary procedure; the decrease in the testing time may lead to high measuring errors. This problem can be solved by the estimation of the oil consumption by using indirect experimentally defined parameter such as the concentration of the total unburned hydrocarbons in the exhaust gaseous. This will allow to use the instantaneously and singly-minded measures for restoring the regulated characteristics of the engines, and this way decrease the negative results of the environmental pollutions.

The calculation method for determining of diesel oil consumption that has been described is based on the experimental data showing the concentration of the total unburned hydrocarbons in the exhaust gaseous.

*Diesel engine, oil, total unburned hydrocarbons, calculation*