

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ВНУТРЕННЕЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ

Шаган Анастасия, студент,

МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, panaml@mail.ru

Сафронов Павел Владимирович, канд. техн. наук, доц.,

МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, pavel_safronov@mail.ru

Матюхин Леонид Михайлович, канд. техн. наук, проф.,

МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, panaml@mail.ru

Аннотация. Учитывая становящиеся все более актуальными вопросы охраны окружающей среды, в настоящее время особенно важны мероприятия, направленные на снижение токсичности отработавших газов поршневых ДВС при одновременном увеличении надежности, а также уменьшении металлоемкости и стоимости последних. Конструкции современных двигателей с переменными фазами газораспределения позволяют добиться повышения доли нейтральных продуктов сгорания в рабочей смеси без использования сложной и дорогостоящей системы внешней рециркуляции. Но в этом случае требуется некий объективный показатель для оценки степени внутренней рециркуляции. В качестве такового предлагается использование доли остаточных газов в рабочей смеси. Для ее нахождения необходимо проведение анализа процессов газообмена (а следовательно – и расчет рабочего цикла двигателя) на основе соотношений парциальных объемов компонентов рабочей смеси. В статье излагаются основы предлагаемого подхода и приводятся результаты впервые проведенного экспериментального определения степени внутренней рециркуляции.

Ключевые слова: газообмен, остаточные газы, коэффициент вытеснения, рециркуляция, доли компонентов смеси.

METHODOLOGY OF DETERMINING THE DEGREE OF INTERNAL RECIRCULATION

Shagan Anastacia, student,

MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, panaml@mail.ru

Safronov Pavel V., Ph.D., associate professor,

MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, pavel_safronov@mail.ru

Matiukhin Leonid M., Ph. D., professor,

MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, panaml@mail.ru

Abstract. Taking into account the increasingly urgent issues of environmental protection, measures aimed at reducing the toxicity of exhaust gases of piston engines while increasing reliability, as well as reducing the metal intensity and their cost, are especially important. The designs of modern engines with variable valve distribution phases make it possible to increase the proportion of neutral combustion products in the working mixture without using an external recirculation system. But in this case, is required some objective indicator to assess the degree of internal recirculation. As such, the use of the proportion of residual gases in the working mixture is proposed. To find it, it is necessary to analyze the processes of gas exchange (and therefore to calculate the duty cycle of the engine) basing on the ratios of the partial volumes of the components of the working mixture.

The article outlines the basics of the proposed approach and presents the results of the first experimental determination of the degree of internal recirculation.

Key words: gas exchange, residual gases, coefficient of displacement, recirculation, fractions of the components of the air-fuel-residual gases mixture.

Введение

Все без исключения характеристики двигателя определяются мощностными и экономическими параметрами и составом рабочей смеси (РС), а также массовым наполнением цилиндров свежим зарядом. Результаты процессов газообмена принято оценивать коэффициентами наполнения и остаточных газов [1-5]. Но эти характеристики используются лишь при расчете поршневых ДВС и не характеризуют ни наполнение как таковое, ни влияние на него различных факторов [6-8].

В отличие от используемых лишь двигателями понятий коэффициентов наполнения и остаточных газов понятия долей являются общетехническими. Объемные доли компонентов рабочей смеси (РС) не только определяют ее состав, но и позволяют количественно оценивать содержание каждого из компонентов, включая воздух, в цилиндре. При этом доля остаточных газов (ОГ) является основной характеристикой внутренней рециркуляции [8, 9].

Учитывая усложнение двигателя при его оборудовании системой внешней рециркуляции в целях снижения выбросов оксидов азота с

отработавшими газами, представляется целесообразным использовать рециркуляцию внутреннюю – то есть изменять содержание нейтральных продуктов сгорания в рабочей смеси, влияя на долю остаточных газов в рабочей смеси.

Основная часть

В соответствии с законом Амага [10] объем рабочей смеси, эквивалентный полному объему цилиндра V_a , равен сумме парциальных объемов ее компонентов:

$$V_{PC} = V_a = V_r + V_b + V_t + V_R. \quad (1)$$

В этом равенстве: V_{PC} – парциальный объем рабочей смеси, V_a – полный объем цилиндра, V_i – парциальные объемы соответственно остаточных газов (ОГ), воздуха, топлива и газов рециркуляционных.

Парциальный объем V_r остаточных газов, занимающих при параметрах точки r индикаторной диаграммы объем V_c камеры сгорания, определяется путем его приведения к параметрам PC в точке a индикаторной диаграммы:

$$V_r = V_c \frac{p_r T_a}{p_a T_r} \varphi_s.$$

В этой зависимости φ_s – коэффициент очистки, учитывающий неполноту информации о протекании газообмена.

В результате деления V_r на полный объем цилиндра V_a доля ОГ определяется выражением [8]

$$\sigma_r = \frac{\varphi_s p_r T_a}{\varepsilon p_a T_r}. \quad (2)$$

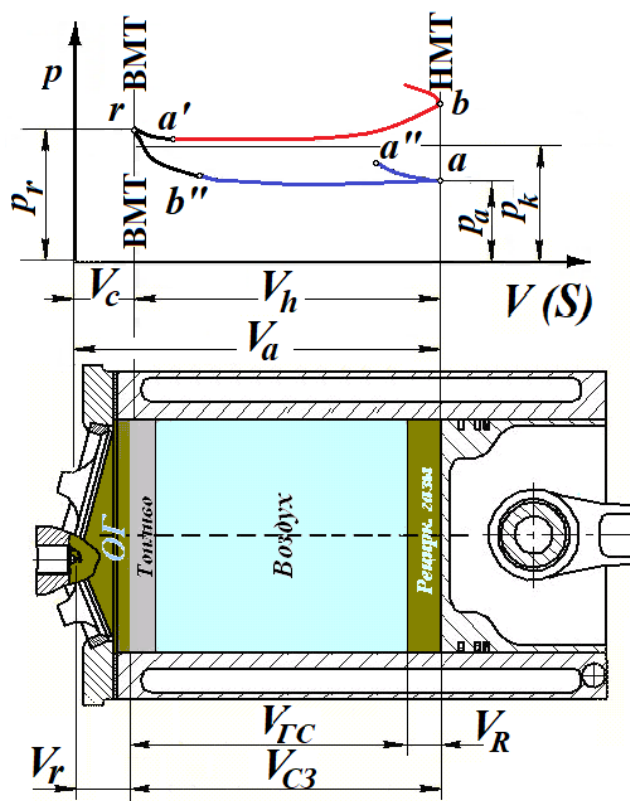


Рис. 1. Полный объем цилиндра как сумма парциальных объемов компонентов рабочей смеси

Действительное значение доли $\sigma_r^д$ в рабочей смеси не равно рассчитываемому по приведенной зависимости, так как в общем случае в период перекрытия клапанов вблизи ВМТ возможен как заброс отработавших газов во впускной тракт с последующим их забросом в цилиндр, так и полное удаление остаточных газов в результате продувки.

Деление равенства (1) на объем V_a позволяет получить объемный состав рабочей смеси:

$$1 = \sigma_r + \sigma_b + \sigma_t + \sigma_R = \sigma_r + \sigma_{СЗ}.$$

Из этого равенства, равно как и из рис. 1, следует, что увеличение наполнения (рост доли свежего заряда $\sigma_{СЗ}$ в результате дозарядки) должно сопровождаться уменьшением доли ОГ (улучшением очистки) и, следовательно, доля σ_r может быть найдена на основании экспериментальных данных как разность

$$\sigma_r = 1 - \sigma_{СЗ}. \quad (3)$$

Отсюда можно сделать вывод, что коэффициенты очистки и дозарядки при проведении теплового расчета не должны задаваться произвольно. Связь между ними выражается зависимостями [9]

$$\varphi_s = \frac{1 - \varphi_1 \sigma_{сз}}{1 - \sigma_{сз}} \quad \text{и} \quad \varphi_1 = \frac{1 - \varphi_s \sigma_r}{1 - \sigma_r}.$$

Как известно из опыта и показано в [8], в двигателях с внешним смесеобразованием наполнение зависит от типа используемого топлива, определяемого его молекулярной массой μ_r , и стехиометрическим соотношением L_0 [(кмоль воздуха) / (кг топлива)], а также от коэффициента избытка воздуха. Эта зависимость математически характеризуется величиной так называемого коэффициента вытеснения [8, 9]:

$$A = \frac{\alpha L_0 \mu_r}{\alpha L_0 \mu_r + 1}.$$

Этот коэффициент численно равен объемной/мольной доле топлива в горючей смеси. С его увеличением наполнение воздуха улучшается, а при уменьшении A – падает. При известных параметрах рабочего тела в точках r и a индикаторной диаграммы доля воздуха в РС может быть найдена с использованием зависимости [8]:

$$\sigma_B = \frac{\varepsilon p_a T_r - p_r T_a \varphi_s A (1 - R'_c)}{\varepsilon p_a T_r} \quad (4)$$

Здесь R'_c – степень внешней рециркуляции [11, 12], представляющая собой долю рециркуляционных газов в свежем заряде, то есть отношение количеств киломолей N_R (или парциального объема V_R) рециркуляционных газов к общему количеству киломолей (парциального объема) свежего заряда:

$$R'_c = \frac{N_R}{N_{ГС} + N_R} = \frac{V_R}{V_{ГС} + V_R} = \sigma'_{R}.$$

При экспериментально найденном значении объемного расхода V_B , величина его объемной доли определяется выражением:

$$\sigma_B^д = \frac{V_B}{0,03 n i V_a} \frac{p_k T_a}{p_a T_k},$$

а доля свежего заряда – зависимостью:

$$\sigma_{СЗ}^д = \frac{V_B}{0,03AniV_a} \frac{p_k T_a}{p_a T_k'}$$

что с использованием (3) позволяет определить долю остаточных газов $\sigma_r^д$, характеризующую степень внутренней рециркуляции.

В связи с тем, что в период перекрытия клапанов может происходить как продувка камеры сгорания свежим зарядом, так и заброс во впускной трубопровод остаточных газов из выпускного трубопровода [8, 9], значение σ_r , определяемое по (2), в общем случае не равно действительной величине доли ОГ в рабочей смеси, то есть:

$$\sigma_r^д = \frac{V_r^д}{V_a} \neq \frac{p_r T_a}{\varepsilon p_a T_r}$$

С характерными для современных двигателей высокими степенями сжатия практически невозможно добиться сколь-нибудь существенного роста доли σ_r повышением противодавления в момент нахождения поршня в ВМТ. В связи с этим для реализации внутренней рециркуляции необходимо организовать перетекание отработавших газов из выпускного трубопровода во впускной в период перекрытия клапанов.

В запланированном эксперименте исследовалось влияние фаз газораспределения на долю $\sigma_r^д$, характеризующую степень внутренней рециркуляции. Эксперимент проводился на двигателе ВАЗ-21176 ($iV_h=1,8$ л, $N_e=90$ кВт) при 23% открытия дроссельной заслонки и при $n=2500$ мин⁻¹. Двигатель установлен на стенде с индукторной тормозной установкой HORIBA. Он оборудован системой CVVT (Continuous Variable Valve Timing) непрерывного регулирования фаз газораспределения, позволяющей влиять на длительность периода перекрытия клапанов изменением угла начала открытия впускного клапана. Моменты открытия/закрытия выпускных клапанов оставались неизменными. Программно-аппаратный комплекс OSIRIS фиксировал давления в цилиндре с шагом 1° ПКВ.

По полученным в результате проведения эксперимента значениям параметров свежего заряда и его циклового расхода G_B^H [г/цикл] проводились расчеты доли остаточных газов как разности $\sigma_r^D = 1 - \sigma_{C3}^D$.

При известном значении массового циклового расхода воздуха G_B^H объемный расход воздуха на цикл при параметрах точки “а” индикаторной диаграммы будет равен:

$$V_B^H = v_a G_B^H, \text{ где } v_a = v_k \frac{p_k T_a}{p_a T_k}.$$

После деления выражения $V_B^H = G_B^H v_k \frac{p_k T_a}{p_a T_k}$ на объем рабочей смеси V_a действительное значение объемной доли воздуха определится зависимостью:

$$\sigma_B^D = \frac{G_B^H}{V_a} v_k \frac{p_k T_a}{p_a T_k}.$$

Используя коэффициент вытеснения A [8, 9], получаем выражение для расчета доли свежего заряда:

$$\sigma_{C3}^D = \frac{G_B^H}{AV_a} v_k \frac{p_k T_a}{p_a T_k}.$$

В соответствии с (3) доля ОГ находится как:

$$\sigma_r^D = \frac{AV_a p_a T_k - G_B^H v_k p_k T_a}{AV_a p_a T_k}.$$

Из баланса энтальпий топлива и движущегося по трубопроводу воздуха можно найти зависимость для определения температуры горючей смеси:

$$T_{ГC} = A \left[(T_0 + \Delta T) + \frac{T_r}{\alpha L_0 \mu_r} \right]$$

(если пренебречь различием теплоемкостей воздуха, топлива и их смеси). В этом случае необходимая для нахождения долей σ_{C3}^D и σ_r^D температура T_a рабочей смеси в точке “а” индикаторной диаграммы подсчитывается по зависимости:

$$T_a = (T_{ГC} + \Delta T) + [T_r - (T_{ГC} + \Delta T)] \sigma_r^D,$$

также получаемой в предположении равенства теплоемкостей компонентов рабочей смеси.

Поскольку для вычисления температуры T_a необходимо знать искомую долю остаточных газов σ_r^d , эта доля определяется методом последовательных приближений.

По результатам предварительно проведенного эксперимента значение доли ОГ на рассматриваемом режиме оказалось равным $\sigma_r^d = 6,28\%$.

Выводы

- Доля ОГ в рабочей смеси является единственным показателем величины степени внутренней рециркуляции;
- Проведение анализа процессов газообмена на основе парциальных объемов компонентов рабочей смеси позволяет определять ее объемный состав, включая, в том числе, доли воздуха σ_{C3}^d и свежего заряда σ_{C3}^d ;
- Поскольку сумма долей компонентов смеси равна единице, доля остаточных газов (степень внутренней рециркуляции σ_r^d) может быть найдена по результатам экспериментального определения расхода воздуха как разность $\sigma_r^d = 1 - \sigma_{C3}^d$;
- Проведенный эксперимент подтвердил возможность оценки доли остаточных газов в рабочей смеси на основе предлагаемой методики, что в дальнейшем должно позволить провести анализ влияния фаз газораспределения на степень внутренней рециркуляции

Список литературы

1. Шатров, М. Г. Автомобильные двигатели / М. Г. Шатров и др.; под ред. М. Г. Шатрова. — Москва: «Академия», 2010. — 462 с.
2. Дьяченко, Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания / Н.Х. Дьяченко, А.К. Костин, Г.В. Мельников и др.; под ред. Н.Х. Дьяченко. — Москва- Ленинград, 1965. — 460 с.
3. Lexikon Motorentchnik. „Der Verbrennungsmotor von A–Z“. Germany, SIEMENS V D O Automotive, 2., ATZ-MTZ Fachbuch, 1096 S.
4. Автомобильные двигатели: учебник для вузов / под ред. М. С. Ховаха. — М.: «Машиностроение», 1977. — 578 с.
5. Двигатели внутреннего сгорания / под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. — Москва; «Машиностроение», 1983, 376 с.
6. Ковылов, Ю.Л. Влияние различных факторов на коэффициент наполнения поршневого двигателя / Ю.Л. Ковылов, Д.А. Угланов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им С. П. Королева. — 2007. — Вып. 2. — С. 114—117.
7. Шароглазов, Б.А. Оценка качества наполнения свежим зарядом цилиндров поршневого двигателя на стадии проектирования / Б.А. Шароглазов, В.А. Поваляев // Вестник национального исследовательского Южно-Уральского государственного университета. — 2008. — № 23. — С. 20—24.
8. Матюхин, Л.М. Анализ наполнения и тепловой расчет ДВС на базе состава рабочей смеси / Л.М. Матюхин. — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. — 170 p.
9. Матюхин, Л.М. Термодинамические основы альтернативной оценки наполнения и анализа циклов поршневых ДВС / Л.М. Матюхин // Грузовик. — 2018. — №4. — С. 24—33.
10. Christian Walter. „Technische Wärmelehre“, Band 1, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Germany, Leipzig, 1966, 278 p.
11. Морозов, К.А. Токсичность автомобильных двигателей / К.А. Морозов. — М.: «Легион-Автодата», 2001. — 80 С.
12. Van Basshuysen / Schäfer (Hrsg.), „Handbuch Verbrennungsmotoren Grundlagen, Komponenten, Systemen, Perspektiven“, Germany, SIEMENS VDO Automotive, 2. verbesserte Auflage, — Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 2002, 888 S.

Reference

1. Shatrov M.G. and others, *Avtomobil'nyye dvigateli* (Automobile Engines), Moscow, Akademiya, 2010, 462 p.
2. Dyachenko N.Kh., Kostin A.K., Melnikov G.V. and others, *Teoriya dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Theory of internal combustion engines), Moscow-Leningrad, Mashinostroenie, 1965, 460 p.
3. Lexikon Motorentchnik. „Der Verbrennungsmotor von A–Z“. Germany, SIEMENS V D O Automotive, 2., ATZ-MTZ Fachbuch, 1096 S.
4. Edited by Khovakh M.S., *Avtomobil'nyye dvigateli* (Motor Vehicle Engines), Moscow, Vysshaya Shkola, 1977; 578 p.
5. Edited by Orlin A.S., Kruglov M.G., *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* (Internal Combustion Engines), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 376 p.
6. Kovylov Yu.L., Uglanov D.A., *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im S. P. Koroleva*, 2007, vol. 2, pp.114-117.
7. Sharoglazov B.A., Povalyayev V.A., *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2008, no. 23, pp. 20-24.
8. Matiukhin L.M., *Analiz napolneniya i teplovoy raschet DVS na baze sostava rabochey smesi* (Analysis of filling and thermal calculation of ICE based on the composition of the working mix), Germany, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011, 170 p.
9. Matyukhin, L.M., *Gruzovik*, 2018, no. 4, pp. 24–33.
10. Christian Walter. Technische Wärmelehre, Band 1, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Germany, Leipzig, 1966, 278 p.
11. Morozov K.A., *Toksichnost' avtomobil'nykh dvigateley* (Toxicity of automobile engines), Moscow, Legion-Autodata, 2001, 90 p.
12. Van Basshuysen / Schäfer (Hrsg.), „Handbuch Verbrennungsmotoren Grundlagen, Komponenten, Systemen, Perspektiven“, Germany, SIEMENS VDO Automotive, 2. verbesserte Ausgabe, – Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 2002, 888 S.

Рецензент: А.Ю. Дунин, канд. техн. наук, доц., МАДИ