

УДК 621.4:378.147

Л.М. МАТЮХИН

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦИОННОМУ ПОДХОДУ К ИЗЛОЖЕНИЮ КУРСА ТЕОРИИ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Традиционно используемые в теории поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) понятия коэффициентов наполнения (η_v) и остаточных газов (γ) не позволяют характеризовать состав рабочей смеси, определяющий все – мощностные, экономические и экологические – показатели двигателя. Упомянутые коэффициенты применяются лишь при расчете поршневых ДВС. При этом основной показатель наполнения цилиндров – коэффициент η_v – характеризует не столько наполнение, сколько его понижение в результате наличия гидравлических сопротивлений и подогрева свежего заряда. В результате коэффициент η_v может возрасти при уменьшении наполнения и уменьшиться при его увеличении, что затрудняет понимание слушателями соответствующих разделов курса. Существенным недостатком известных зависимостей для нахождения коэффициента наполнения является отсутствие учета влияния на наполнение цилиндров двигателя типа используемого топлива, коэффициента избытка воздуха и степени рециркуляции. Кроме того, принципиально невозможно определение численного значения коэффициента η_v , соответствующего полному заполнению цилиндра свежим зарядом и, следовательно, максимальной мощности двигателя. В сравнении с коэффициентом наполнения и остаточных газов существенно более информативными являются общетехнические понятия (объемных) долей. Совокупность долей компонентов рабочей смеси определяет ее состав и значения термодинамических характеристик. По доле свежего заряда (воздуха) можно однозначно судить о степени наполнения им полного объема цилиндра, т.е. о наполнении и о существующих резервах по наполнению. А так как сумма долей равна единице, то при подобном подходе к оценке наполнения отпадает необходимость в отдельном определении доли остаточных газов, поскольку эта доля равна разности между единицей и долей свежего заряда. В результате упрощается структура основных расчетных зависимостей, и их анализ становится более наглядным и понятным. В статье анализируются преимущества изложения курса теории автотракторных двигателей при оценке наполнения долей свежего заряда / воздуха, а состава рабочей смеси – долями ее компонентов.

Ключевые слова: поршневые ДВС, газообмен, наполнение, объемные доли, визуализация.

Мощность двигателя напрямую определяется количеством теплоты, вводимой с топливом в цилиндры двигателя. Это количество, в свою очередь, при прочих равных условиях определяется массой поступившего в цилиндр воздуха, т.е. зависит от наполнения цилиндров. Чем больше в цилиндры подается воздуха, тем больше в нем может быть сожжено топлива, и тем более высокой оказывается мощность двигателя.

Часть курса теории поршневых ДВС, по сути представляющая собой прикладную термодинамику, основана на применении используемых лишь в теории поршневых ДВС понятий коэффициентов наполнения η_v , остаточных газов γ , а также корректирующих коэффициентов дозарядки и очистки. При изложении учебного материала, а также при проведении расчетов наполнение цилиндров традиционно оценивается коэффициентом наполнения η_v , представляющим собой отношение количества воздуха, действительно поступившего в цилиндр, к тому количеству, которое могло бы раз-

меститься в рабочем объеме цилиндра при условиях «на входе в двигатель» [1]. О количестве же остающихся по завершении процессов газообмена в цилиндре продуктов сгорания дает косвенное представление величина коэффициента остаточных газов (ОГ), равного отношению количества молей ОГ к количеству молей поступившего в цилиндр свежего заряда.

Использование сослагательного наклонения в приведенной выше формулировке коэффициента наполнения не способствует пониманию студентами данного определения. В связи с этим приходится пояснять, что характеризующий качество наполнения коэффициент η_v соотносит действительное количество воздуха, поступившего в цилиндр работающего двигателя, с количеством, которое могло бы заполнить объем, освобождаемый при бесконечно медленном перемещении поршня от верхней (ВМТ) к нижней мертвой точке (НМТ) в условиях непрогретого двигателя. Но отсюда следует, что сравнение действительного количества воздуха с тем, ко-

торое находится в рабочем объеме цилиндра неработающего двигателя, позволяет оценить не наполнение как таковое, а лишь его снижение вследствие подогрева свежего заряда в условиях работающего двигателя и потерь давления по причине наличия гидравлических сопротивлений впускного тракта.

Как известно из опыта, все показатели ДВС зависят от состава рабочей смеси, образующейся в результате смешения свежего заряда и остаточных газов (ОГ) – продуктов сгорания, остающихся в камере сгорания цилиндра по завершении процесса выпуска. В общем случае свежий заряд состоит из воздуха, (паров) топлива и рециркуляционных газов (РГ), подаваемых во впускной тракт для улучшения экологических характеристик двигателя. Поступая в цилиндр, свежий заряд (СЗ) смешивается с остающимися в нем продуктами сгорания и образует рабочую смесь (РС).

Состав рабочей смеси традиционно оценивается коэффициентами наполнения η_v , остаточных газов γ и избытка воздуха α . Однако в отличие от понятия коэффициента избытка воздуха α , широко используемого в различных разделах техники, коэффициенты наполнения и остаточных газов применяются лишь двигателями для косвенной характеристики состава рабочей смеси. В связи с этим у студентов возникает ряд вопросов, в первую очередь касающихся коэффициента наполнения. Так, их интересует, например, почему при оценке наполнения коэффициентом η_v реальный цикловой расход воздуха соотносится с виртуальной величиной массы воздуха, которая могла бы содержаться в рабочем объеме цилиндра при параметрах окружающей среды. Каково максимальное значение η_v ? Должно ли оно равняться единице? К какому значению η_v следует стремиться и каким должно быть численное значение коэффициента наполнения для достижения двигателем максимальной мощности? Превышение каких численных значений коэффициента η_v свидетельствует о потерях части свежего заряда в

период перекрытия клапанов? Однозначного ответа на эти вопросы не существует. К тому же при одном и том же массовом наполнении коэффициент η_v не остается постоянным при изменении атмосферных условий и характеризуется различными численными значениями. Более того, при увеличении наполнения в связи с понижением температуры окружающей среды коэффициент η_v может снижаться. Все это затрудняет понимание студентами излагаемого материала и свидетельствует о недостаточной информативности коэффициента η_v .

Гораздо более понятными и информативными являются применяемые во всех областях науки и техники универсальные понятия (объемных) долей. Применительно к рабочей смеси речь идет о долях воздуха, свежего заряда, топлива, газов остаточных и рециркуляционных. Эти доли представляют собой отношения парциальных объемов компонентов рабочей смеси к объему смеси, т.е. к полному объему вмещающего их цилиндра V_a . Таким образом,

объемная доля есть отношение $\sigma_i = \frac{V_i}{V_a}$. А поскольку сумма парциальных объемов компонентов смеси равна объему смеси, то можно записать:

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

Здесь подстрочные индексы v , t , r и R соответствуют воздуху, топливу, остаточным газам и газам рециркуляционным (рис. 1).

Равенство (1) может быть записано и как $V_{PC} = V_a = V_{CЗ} + V_t$, где $V_{CЗ} = V_v + V_r + V_R$ – парциальный объем свежего заряда, в общем случае состоящего из воздуха (паров), топлива и рециркуляционных газов, относительное количество которых в свежем заряде определяется степенью рециркуляции R' .

Подстановка в правую часть равенства (1) парциальных объемов топлива $V_t = V_v \frac{1}{\alpha L_0 \mu_t}$ и рециркуляционных

- Объем:**
- V_c – камеры сгорания
 - V_k – рабочий
 - V_a – полный
 - V_v – воздуха
 - V_t – топлива
 - V_r – остаточных газов
 - $V_{РГ}$ – рециркуляционных газов
 - $V_{ГС} = V_v + V_t$ – горючей смеси
 - $V_{ПСГ} = V_{РГ} + V_r$ – продуктов сгорания
 - $V_{СЗ} = V_v + V_t + V_{РГ}$ – свежего заряда
 - $V_{РС}$ – рабочей смеси
 - $V_{РС} = V_t + V_v + V_{ОГ} + V_{РГ} = V_a$

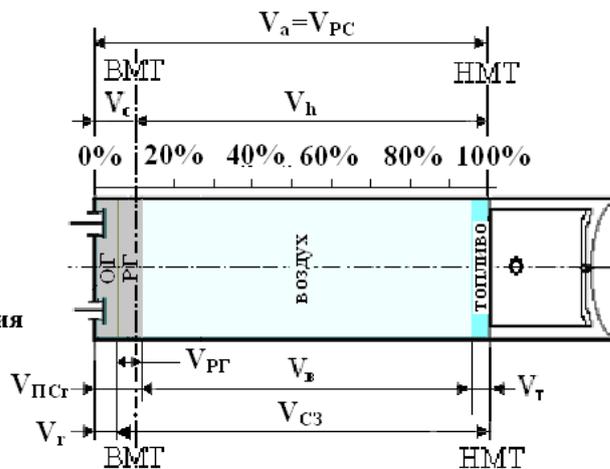


Рис. 1. Состав рабочей смеси как сумма парциальных объемов ее компонентов

куляционных газов $V_R = V_b \frac{1}{1-R'_c}$, выраженных через парциальный объем воздуха V_b , позволяет найти его значение [2, 3, 4]:

$$V_b = V_{C3} A (1 - R'_c). \quad (2)$$

В этом выражении фигурирует коэффициент вытеснения $A = \frac{\mu_t \alpha L_0}{(\mu_t \alpha L_0 + 1)}$. Можно показать [3, 4],

что этот коэффициент численно равен объемной доле воздуха в горючей смеси ($V_{TC} = V_b + V_t$). Введение коэффициента вытеснения позволило учитывать влияние на наполнение и, следовательно, на мощность и экономические показатели двигателя типа используемого топлива (через его молекулярную массу и стехиометрическое соотношение L_0) и значения коэффициента избытка воздуха α [4, 5]. Как следует из (2), наполнение (парциальный объем воздуха) изменяется прямо пропорционально коэффициенту вытеснения A . Характер изменения коэффициента вытеснения в зависимости от коэффициента избытка воздуха (от соотношения в горючей смеси воздуха и топлива) показан на рисунке 2. Как следует из него, с переходом на более «легкие» виды топлива (например, с метана на водород) коэффициент вытеснения уменьшается. Также он становится меньше и при уменьшении α , т.е. при обогащении смеси. Соответственно должна понижаться и мощность двигателя.

В свою очередь разность $(1 - R'_c)$ представляет собой объемную долю горючей топливоздушной смеси в свежем заряде, состоящем из воздуха, топлива и рециркуляционных газов. С увеличением степени рециркуляции R'_c доля горючей смеси (а следовательно, и воздуха) в свежем заряде уменьшается в результате замещения его части вводимы-

ми во впускной трубопровод нейтральными продуктами сгорания.

После деления равенства (1) на объем смеси (цилиндра) V_a получаем равную единице сумму долей:

$$\sigma_b + \sigma_t + \sigma_r + \sigma_R = 1. \quad (3)$$

При полном объеме цилиндра $V_a = 1$ равенство (1) превращается в зависимость (3), что удобно для визуализации результатов проводимых расчетов при проведении их анализа.

Доли отдельных компонентов рабочей смеси определяются зависимостями [3, 4, 5]. Учтя, что сумма долей равна единице, это равенство можно переписать в виде $\sigma_{C3} + \sigma_r = 1$, где $\sigma_b + \sigma_t + \sigma_r = \sigma_{C3}$ есть доля свежего заряда. Так как значения долей топлива и рециркуляционных газов могут быть представлены в виде функций от доли воздуха [4], то в результате отпадает необходимость в нахождении необходимой для проведения теплового расчета двигателя доли остаточных газов, поскольку она определяется разностью $\sigma_r = 1 - \sigma_{C3}$. Таким образом, вместо коэффициента наполнения используется более наглядная и информативная величина доли воздуха, а вместо коэффициента остаточных газов γ – выражаемая через долю воздуха σ_b разность $(1 - \sigma_{C3})$.

Из анализа процессов газообмена следует, что наполнение, обуславливающее мощностные показатели двигателя, определяется долей воздуха σ_b и параметрами рабочей смеси в конце процесса впуска. В двигателях с внешним смесеобразованием – бензиновых и газовых – максимально достижимая мощность соответствует отсутствию в рабочей смеси остаточных газов ($\sigma_r = 0$). Это возможно лишь при полном заполнении цилиндра свежим зарядом, т.е. при $\sigma_{C3} = 1$. Значения $\sigma_{C3} < 1$ свидетельствуют о наличии резервов по наполнению (и, следовательно, по мощности). В случае, когда $\sigma_{C3} > 1$, это неравен-

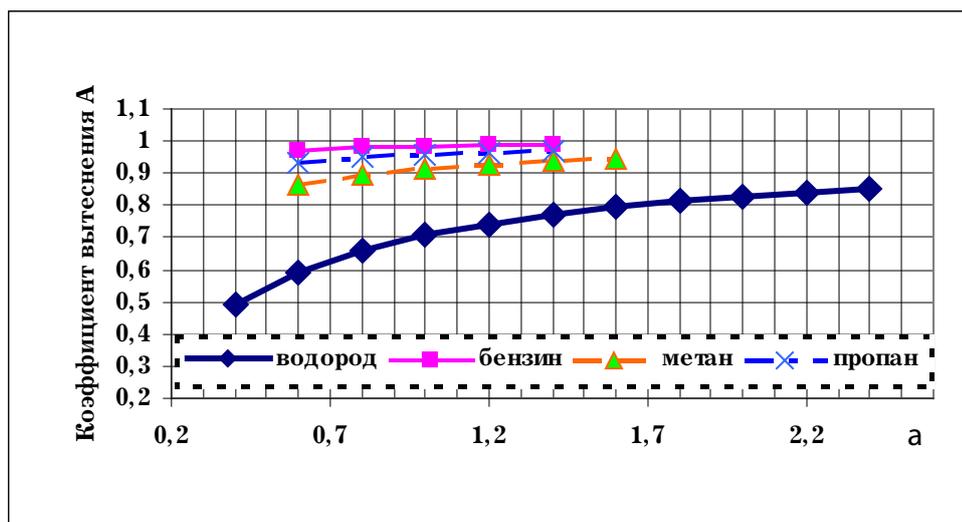


Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха на величину коэффициента вытеснения A

ство свидетельствует о превышении парциальным объемом свежего заряда полного объема цилиндра V_a , т.е. о потерях части свежего заряда, которые в условиях двигателей с внешним смесеобразованием неизбежно приводят к ухудшению экономических показателей автомобиля. Необходимо подчеркнуть, что по численным значениям коэффициента наполнения η_v делать какие-либо выводы о резервах по наполнению или о потерях части свежего заряда невозможно в принципе.

Важно и то, что для анализа влияния на показатели двигателя (в первую очередь экологические) оказывается весьма удобной возможностью определения суммарной доли нейтральных продуктов сгорания – газов остаточных и рециркуляционных. А поскольку доля остаточных газов σ_r характеризует степень внутренней рециркуляции, то по ее значению можно судить об относительном количестве ОГ в рабочей смеси. Благодаря этому появляется дополнительная возможность анализа влияния степени внутренней рециркуляции на показатели двигателя. Провести подобный анализ, основываясь на традиционно используемых коэффициентах остаточных газов и наполнения, практически невозможно.

Благодаря возможности визуализации результатов газообмена изложение курса теории ДВС на основе соотношений парциальных объемов компонентов рабочей смеси существенно облегчает понимание студентами излагаемого материала. Работа со слушателями магистратуры со всей очевидностью показала, что оценка результатов газообмена составом рабочей смеси делает более наглядным и доступным анализ влияния на наполнение и основные показатели двигателя определяющих их факторов. Расчет рабочего цикла ДВС на основе состава рабочей смеси позволяет уточнить влияние на наполнение и показатели двигателя типа топлива, степени рециркуляции и коэффициента избытка

воздуха. Характеризуя степень заполнения полного объема цилиндра свежим зарядом/воздухом, соответствующие доли объективно характеризуют наполнение цилиндра, что дает более наглядное и полное представление о результатах процессов газообмена в сравнении с традиционной оценкой наполнения коэффициентами η_v и γ .

Переход от используемых лишь двигателями коэффициентов наполнения и очистки к общетехническим понятиям долей позволяет также уменьшить количество используемых в расчетах коэффициентов, упростить расчетные зависимости и создать универсальные термодинамические основы методики расчета рабочего цикла любых поршневых ДВС. Благодаря этому появляются новые возможности для изучения протекающих в двигателях процессов.

Библиографический список

1. Автомобильные двигатели: Учебник / Под ред. М.Г. Шатрова. М.: Академия, 2010. С. 59, 119.
2. Матюхин Л.М. Анализ процессов газообмена и состава рабочей смеси газового двигателя с внешним смесеобразованием / Л.М. Матюхин // Вестн. МАДИ (ГТУ). 2007. Вып. 4 (11). С. 5–7.
3. Матюхин Л.М. Альтернатива коэффициенту наполнения / Л.М. Матюхин // Двигатель-2007: Сб. науч. тр. М., 2007. С. 80–85.
4. 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 с.
5. Матюхин Л.М. Оценка наполнения и индикаторных показателей газовых ДВС / Л.М. Матюхин // Международный научно-технический журнал «Автогазо-заправочный комплекс + Альтернативное топливо». М. 2012. Вып. 1 (61), С. 15–18.

Матюхин Леонид Михайлович – профессор, доцент Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета; 125319, Москва, Ленинградский Проспект, 64; тел.: 8-499-155-04-61; e-mail: panam1@mail.ru.

Статья поступила 02.07.2015

THE ALTERNATIVE TO THE TRADITIONAL APPROACH TO THE EXPOSITION OF THE COURSE OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINES

L.M. MATYUKHIN

Moscow Automobile and Road Construction University – MADI

Traditionally used in the theory of the internal combustion engines (ICE) notions of volumetric efficiency (η_v) and coefficient of residual gases (γ) do not permit describing the composition of air-fuel-residual gases mixture. This mixture composition determines all the characteristics of the ICE – the power, economic and ecological

parameters. Volumetric efficiency and coefficient of residual gases can be used only for the calculation of piston ICE. The principal characteristic of the loading (volumetric efficiency) describes not the loading proper, but its reduction by the hydraulic resistance and heating of the fresh charge. As a result the volumetric efficiency η_v can grow with the reduction of loading and decrease with its increase. That makes some difficulties in understanding of the course material for the student audience. One of the main disadvantages of the equations used for calculation of volumetric efficiency is that they ignore the influence of fuel type on the loading of engine cylinder; air excess coefficient and recycle rate. Besides, to determine a numerical value of the coefficient η_v that corresponds to the full filling of cylinders with fresh charge and to the engine maximum power is impossible in principle. Current notions of volumetric ratios of components in the air-fuel-residual gases-mixture are critically more informative in comparison with volumetric efficiency and coefficient of residual gases. The complex of volumetric ratios of components in the air-fuel-residual gases-mixture defines its composition and values of thermodynamic characteristics. Volumetric ratio of fresh charge (air) allows estimating the state of cylinder fullness. In other words volumetric ratio of fresh charge (air) evaluates the loading and potential reserves for its increase. As far as the sum of volumetric ratios is equal to a unit, when such approach is used it is not necessary to determine the ratio of residual gases, since its ratio is equal to the difference between the unit and the fresh charge ratio. As a result the structure of the basic calculated equations is simplified and their analysis becomes more clear and comprehensible.

Key words: piston internal combustion engine, interchange of gases, volumetric efficiency, volumetric ratios of components in the air-fuel-residual gases-mixture, visualization

References

1. Automobile engines: manual [for Universities] / Edited by M.G. Shatrov. M.: Academy, 2010. Pp. 59, 119.
2. Matyukhin L.M. The analysis of the gas exchange and calculation of the composition of the air-fuel-residual gases-mixture in the gas engines, Bulletin of MADI (STU). 2007. № 4. Pp. 5–7.
3. Matyukhin L.M. The alternative of the volumetric efficiency, Collected articles «Engine 2007», M., 2007. Pp. 80–85.
4. Matyukhin L.M. The analysis of the loading and the thermal calculations of the engine on the basis of composition of the air-fuel-residual gases-mixture, Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG, 2011. 170 p.
5. Matyukhin L.M. The estimation of a engine filling and indicator factors, International scientific and technical magazine «AutoGas Filling Complex + Alternative fuel». M., 2012. Vol. 1 (61). Pp. 15–18.

Matyukhin Leonid Mikhailovich – Professor, Moscow Automobile and Road Construction University – MADI; 125319, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64; tel.: 8-499-155-04-61; e-mail: panam1@mail.ru.

Received 2 July 2015