

ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 621.43.013.2; 662.767

ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ ТОПЛИВА НА НАПОЛНЕНИЕ И ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Матюхин Л.М.

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
МАДИ, Ленинградский проспект, 64, Москва, 125319, Россия
e-mail: panam1@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 13.12.2018

Исследование влияния на показатели двигателя величины (кажущейся) молекулярной массы применяемого топлива становится возможным при анализе результатов процессов газообмена на базе соотношений парциальных объемов компонентов рабочей смеси, что позволяет оценить состав рабочей смеси, определяющий все – мощностные, экономические и экологические – показатели двигателя. При использовании объемной доли воздуха в рабочей смеси в качестве основной характеристики качества наполнения появляется возможность получить зависимости, учитывающие влияние на наполнение и основные расчетные характеристики рабочего цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания (ПДВС) молекулярной массы используемого топлива, а также степени рециркуляции отработавших газов. Предлагаемый подход особенно важен при анализе рабочих циклов двигателей, работающих на газообразных топливах, и в частности на водороде. В статье рассматриваются преимущества оценки наполнения долями воздуха и / или свежего заряда, а также приводятся зависимости для оценки индикаторных показателей поршневых ДВС, работающих на любых типах топлива при наличии или отсутствии рециркуляции.

Ключевые слова: поршневые ДВС, газообмен, наполнение, коэффициент наполнения, объемные доли компонентов рабочей смеси, молекулярная масса, газообразные топлива, стехиометрическое соотношение, водород.

Введение

В первой половине XX века автомобильная промышленность в целом и двигателестроение в частности активно заимствовали разработанные и опробованные в авиации технические решения (в первую очередь, для двигателей форсированных спортивных автомобилей). Испытанные в экстремальных условиях спортивных трасс, эти новации

с течением времени стали нормой и для серийных двигателей (это касается, например, наддува и системам впрыска бензина). Но в применении газообразных топлив автомобилестроение намного опередило авиацию. Так, уже в годы Второй мировой войны в Германии насчитывалось 350, во Франции 110, в СССР и Японии – по 100 тысяч

газогенераторных двигателей. После войны на смену генераторному газу пришли природный, а также промышленные компримированные и сжижаемые газомоторные топлива (ГМТ), использованию которых в условиях обладающей огромными запасами газа и нефти России уделялось и уделяется особое внимание. Благодаря меньшей в сравнении с бензинами и авиационными керосинами цене, а также более высокому октановому числу и ряду других благоприятных для использования в ДВС характеристик, газомоторные топлива находят на транспорте все большее распространение. Можно констатировать, что, помимо общих для всех технических устройств требований к надежности и долговечности, существуют и специфические проблемы, возникающие при совершенствовании любых типов двигателей внутреннего сгорания — поршневых, роторно-поршневых, газотурбинных и реактивных. В частности, можно говорить о вопросах повышения мощности [1], снижения шума [2, 3], гомогенизации горючей смеси [4, 5] и об использовании альтернативных топлив [6–11].

Построенный и испытанный в апреле 1988 года самолет Ту-155Б с питанием сжиженным водородом экспериментальных двигателей НК-88 даже совершил несколько международных перелетов (в Братиславу, Ниццу и Ганновер), доказав возможность использования в авиации криогенных емкостей для хранения сжиженных газов. В нулевых годах был осуществлен трехчасовой перелет широкофюзеляжного А-380 из британского Фултона в Тулузу (Франция). Один из двигателей этого самолета использовал GTL (Gas To Liquids) — синтетическое жидкое топливо на основе природного газа.

Но помимо пассажирских и транспортных самолетов во всем мире существует и легкомоторная авиация, использующая в качестве силовых установок поршневые ДВС (достаточно вспомнить разработанный для многоцелевых самолетов «Ан» легендарный двигатель М-14П). В них, как и прежде, в качестве топлив традиционно используются жидкие топлива, цена на которые с каждым годом неуклонно повышается. При этом газомоторное топливо с 2014 г. подорожало всего на 11%, в то время как дизельное, бензин и электроэнергия — более чем на 20%. Можно утверждать, что перспектива использования газов и их смесей (пропан-бутановой) или авиационного сконденсированного топлива (АСКТ), а также охлажденного до минус 163°С природного газа актуальна не только для наземного и водного, но и для воздушного транспорта.

Как известно из опыта [10], перевод поршневых ДВС на питание газообразным топливом приводит к снижению наполнения. Неизбежность снижения наполнения можно видеть, рассматривая объемный состав образующейся в конце процесса наполнения рабочей смеси.

По завершении процессов газообмена в цилиндре поршневого ДВС находится рабочая смесь (РС), образованная в результате смешения остаточных газов (ОГ) и свежего заряда (СЗ), в общем случае состоящего из топливо-воздушной горючей смеси (ГС) и рециркуляционных газов (РГ). Чем больше в цилиндрах воздуха, тем большее количество топлива при одинаковых значениях коэффициента избытка воздуха α может быть подано в цилиндры в целях повышения мощности двигателя. Указанное увеличение наполнения может быть достигнуто как в результате увеличения плотности подаваемого в цилиндры СЗ, так и путем лучшей очистки — удаления возможно большего количества остаточных газов [10, 13].

Традиционно качество наполнения оценивается коэффициентом наполнения η_v , представляющим собой отношение количества свежего заряда, в действительности поступившего в цилиндр двигателя, к некоему виртуальному «теоретическому» его количеству, которое могло бы разместиться в рабочем объеме цилиндра V_h (рис. 1) при условиях на входе в двигатель [1, 12–15]

$$\eta_v = \frac{G_B^u}{G_B^{\text{теор}}} = \frac{G_B^u}{V_h \rho_k}$$

Как следует из приведенного выражения, одному и тому же цикловому расходу воздуха G_B^u при изменяющихся значениях плотности воздуха ρ_k на входе в цилиндры двигателя может соответствовать бесконечно большое количество значений коэффициента наполнения. При этом увеличение массового наполнения цилиндров в зимний период даже может сопровождаться уменьшением коэффициента η_v , что является следствием более интенсивного теплообмена свежего заряда со стенками впускного тракта. Немаловажно и то, что невозможно назвать то предельное значение η_v , к которому следует стремиться для достижения максимального наполнения при отсутствии потерь свежего заряда в результате продувки. Несвершенство коэффициента η_v в качестве оценочно-

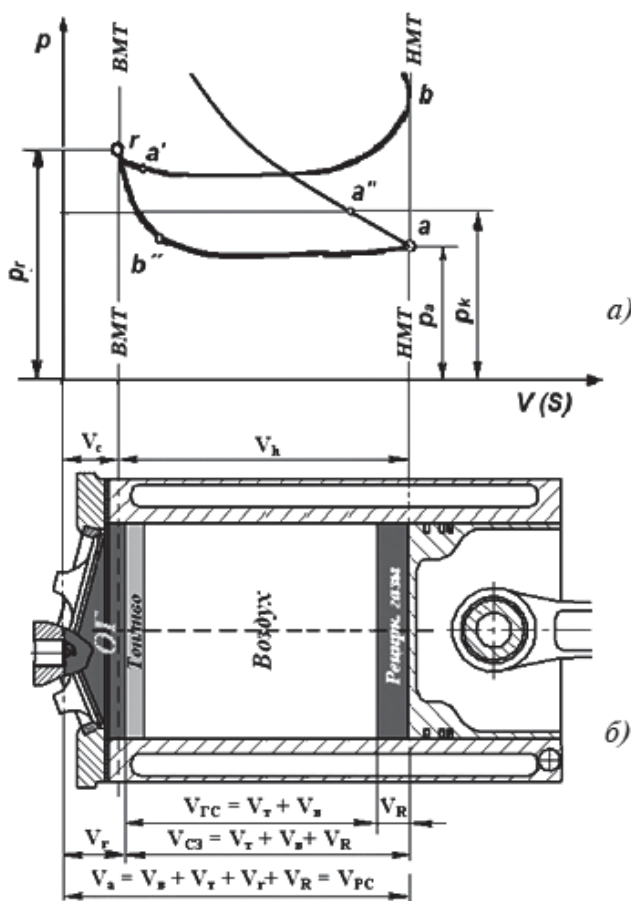


Рис. 1. Протекание (а) и анализ (б) результатов процессов газообмена. Точки на рис. 1,а характеризуют параметры рабочего тела: *BMT* – верхняя мертвая точка; *HMT* – нижняя мертвая точка; *a* – соответствует параметрам РС и *HMT*; *a''* – открытие впускного клапана; *a''* – закрытие впускного клапана; *b* – соответствует параметрам отработавших газов в *HMT*; *b''* – закрытие выпускного клапана; *r* – в *BMT*; *S* – ход поршня; рис. 1,б – состав рабочей смеси как сумма парциальных объемов ее компонентов (обозначения объемов: V_c – камеры сгорания; V_h – рабочий; V_b – воздуха; V_t – топлива; V_r – остаточных газов; V_R – рециркуляционных газов; $V_{GC} = V_b + V_t$ – горючей смеси; $V_{C3} = V_b + V_t + V_r$ – свежего заряда; $V_{PC} = V_b + V_t + V_r + V_R$ – рабочей смеси, равный объему V_a)

го критерия качества наполнения отмечалось многими авторами [16, 17].

Альтернативой используемым лишь двигателями коэффициентам наполнения и остаточных газов γ_r могут служить **общетехнические** понятия объемных долей компонентов рабочей смеси [18–20].

Основная часть

Как следует из рис. 1, равный полному объему цилиндра V_a объем рабочей смеси может быть представлен суммой парциальных объемов ее компонентов, т. е. [19, 20]

$$V_a = V_r + V_{C3} = V_r + V_{GC} + V_R = V_r + V_b + V_t + V_R = V_{PC}$$

Здесь и далее V_{C3} , V_{GC} , V_r , V_b , V_t , V_R – парциальные объемы свежего заряда, горючей смеси, остаточных газов, воздуха, топлива и газов рециркуляционных соответственно.

Деление приведенного равенства на полный объем цилиндра (объем рабочей смеси при параметрах точки «а» индикаторной диаграммы) дает в итоге равную единице сумму объемных/мольных долей компонентов рабочей смеси:

$$\sigma_r + \sigma_b + \sigma_m + \sigma_R = 1.$$

Зависимости для определения парциальных объемов компонентов и соответствующих им объемных долей приведены в таблице, где нижние индексы параметров относятся к соответствующим точкам приведенной на рис. 1,а диаграммы;

$$R'_c = \frac{N_R}{N_R + N_{GC}} \text{ — степень рециркуляции, вы-}$$

раженная через количества киломолей свежего заряда, представляющая собой мольную/объемную долю рециркуляционных газов в свежем заряде;

A – коэффициент вытеснения [19, 20],

$$A = \frac{\mu_t \alpha L_0}{\mu_t \alpha L_0 + 1} \tag{1}$$

Коэффициент *A* может быть получен и из выражения для определения коэффициента избытка воздуха $\alpha = \frac{G_b}{l_0 G_t}$, если массы воздуха и топлива представить в виде произведения количества их киломолей на соответствующие молекулярные массы:

$$\alpha = \frac{\mu_b N_b}{l_0 \mu_t N_t}$$

После деления числителя и знаменателя на суммарное количество киломолей горючей смеси *N* получаем

$$\alpha = \frac{\mu_b \sigma_b''}{l_0 \mu_t \sigma_t''} = \frac{\sigma_b''}{L_0 \mu_t \sigma_t''} = \frac{\sigma_b''}{L_0 \mu_t (1 - \sigma_b'')},$$

откуда окончательно

$$\sigma_b'' = \frac{\alpha \mu_t L_0}{\alpha \mu_t L_0 + 1} = A = \frac{\alpha L_0}{\left(\alpha L_0 + \frac{1}{\mu_t} \right)}$$

Зависимости для определения парциальных объемов и объемных долей компонентов рабочей смеси [20]

| Компоненты | Парциальный объем | Объемная доля |
|------------------------|---|--|
| Воздух | $V_B = V_c \frac{\epsilon p_a T_r - p_r T_a \Phi_s}{p_a T_r} A \cdot (1 - R'_c)$ | $\sigma_B = \frac{\epsilon p_a T_r - p_r T_a \Phi_s}{\epsilon p_a T_r} A (1 - R'_c)$ |
| Топливо (газообразное) | $V_T = V_c \frac{\epsilon p_a T_r - p_r T_a \Phi_s}{p_a T_r} \frac{A}{\mu_T \alpha L_0} (1 - R'_c)$ | $\sigma_T = \frac{\epsilon p_a T_r - p_r T_a \Phi_s}{\epsilon p_a T_r} \frac{(1 - R'_c)}{(\mu_T \alpha L_0 + 1)}$ |
| ГС | $V_{ГС} = V_c \frac{(\epsilon p_a T_r - p_r T_a \Phi_s)}{p_a T_r} (1 - R'_c)$ | $\sigma_{ГС} = \frac{\epsilon p_a T_r - p_r T_a \Phi_s}{\epsilon p_a T_r} (1 - R'_c)$ |
| СЗ | $V_{СЗ} = V_c \frac{\epsilon p_a T_r - p_r T_a \Phi_s}{p_a T_r}$ | $\sigma_{СЗ} = \frac{\epsilon p_a T_r - p_r T_a \Phi_s}{\epsilon p_a T_r}$ |
| ОГ | $V_r = V_c \frac{p_r T_a}{p_a T_r} \Phi_s$ | $\sigma_r = \frac{p_r T_a \Phi_s}{\epsilon p_a T_r}$ |
| РГ | $V_R = V_c \frac{R'_c (\epsilon p_a T_r - p_r T_a \Phi_s)}{p_a T_r}$ | $\sigma_R = \frac{R'_c (\epsilon p_a T_r - p_r T_a \Phi_s)}{\epsilon p_a T_r}$ или $\sigma_R = \frac{R'_c \sigma_\theta}{A(1 - R'_c)}$ |
| ОГ + РГ | $V_r^\Sigma = V_c \frac{p_r T_a \Phi_s (1 - R'_c) + R'_c \epsilon p_a T_r}{p_a T_r}$ | $\sigma_r^\Sigma = \frac{p_r T_a \Phi_s (1 - R'_c) + R'_c \epsilon p_a T_r}{\epsilon p_a T_r}$ |

Два штриха в индексации указывают на то, что речь идет о долях компонентов *горючей топливо-воздушной смеси*.

Как следует из последнего равенства, коэффициент вытеснения представляет собой объемную долю воздуха в горючей смеси, поскольку αL_0 –

количество киломолей воздуха, а $\frac{1}{\mu_T}$ – количество

киломолей одного килограмма топлива. Значение коэффициента вытеснения уменьшается при обогащении смеси и в случае перевода двигателя на более «легкие» сорта топлив (рис. 2).

Нетрудно подсчитать, что перевод двигателя с бензина на водород сопровождается возрастанием количества киломолей топлива в смеси более чем в 55 раз! И увеличение объема возросшего количества топлива в его смеси с воздухом может происходить лишь в результате соответствующего уменьшения объема воздуха. Из представленной на рис. 2 зависимости следует, что для бензинового двигателя даже в случае полного испарения топлива значение коэффициента вытесне-

ния не опускается ниже 0,98. В связи с этим при оценке наполнения бензиновых ДВС коэффициентом вытеснения можно пренебречь. Игнорирование же эффекта вытеснения при расчетах газовых (и особенно – водородных!) двигателей неизбежно приводит к ошибкам [21–24].

При подаче в цилиндр большего количества газообразного топлива обогащение смеси является следствием не только увеличения массы поступающего в цилиндр топлива, но также и результатом уменьшения массы воздуха, частично «вытес-

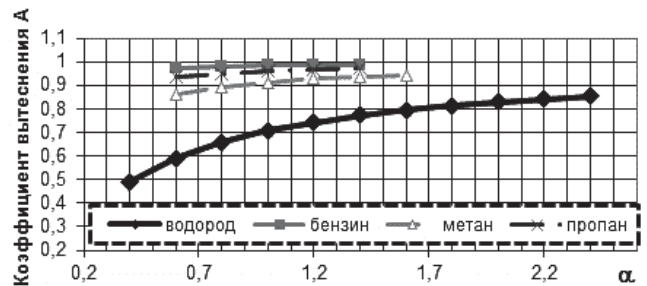


Рис. 2. Зависимость коэффициента вытеснения от коэффициента избытка воздуха

няемого» из цилиндра поступающим в него топливом.

При использовании долей качество наполнения оценивается степенью заполнения цилиндра свежим зарядом σ_{C3} или воздухом σ_B . В отличие

от η_v состав смеси не зависит ни от давления, ни от температуры РС, и при оценке наполнения долями компонентов смеси отпадает необходимость в применении коэффициента остаточных газов γ_r , так как их доля определяется разностью

$\sigma_r = (1 - \sigma_{C3})$, что позволяет упростить используемые расчетные зависимости [20–26]. Так, если свежий заряд занимает 80% полного объема цилиндра, то, следовательно, имеются резервы по наполнению, поскольку остающиеся 20% объема цилиндра заняты остаточными газами. Соответствующий значению $\sigma_{C3} = 80\%$ коэффициент на-

полнения $\eta_v = 0,747$ (при степени сжатия 10, $p_a = 0,98$ бара, $T_a = 350$ К, $p_k = 1$ бар и $T_k = 300$ К) говорит лишь о том, что при рассматриваемых условиях на входе в **полный объем** цилиндра V_a поступило лишь 74,7% того количества свежего заряда (воздуха), которое могло бы разместиться в **рабочем объеме** V_h .

Благодаря наглядности и возможности визуализации результатов расчетов предлагаемый подход к анализу наполнения весьма перспективен и в учебном процессе [27].

Из рассмотрения объема цилиндра как суммы парциальных объемов свежего заряда и остаточных газов следует, что увеличение одного из них может происходить лишь в случае соответствующего уменьшения другого. Это обстоятельство позволяет установить связь между коэффициентами очистки φ_s и дозарядки φ_1 [26, 28]:

$$\varphi_1 = \frac{1 - \varphi_s \sigma_r}{\sigma_{C3}} \text{ и } \varphi_s = \frac{1 - \varphi_1 \sigma_{C3}}{1 - \sigma_{C3}}.$$

В случае двигателей с переменной степенью сжатия и с продолженным расширением [28, 29] учет влияния степени сжатия и угла закрытия впускных клапанов также удобнее учитывать через их влияние на долю воздуха в рабочей смеси.

Универсальное – учитывающее тип используемого топлива и степень рециркуляции – выражение для определения коэффициента наполнения имеет вид [20, 24, 26]

$$\eta_v = \frac{1}{\varepsilon - 1} \frac{(\varepsilon p_a T_r - \varphi_s p_r T_a) T_k}{p_k T_r} \frac{T_k}{T_a} A(1 - R_c'). \quad (2)$$

Индексация параметров в приведенной зависимости соответствует точкам индикаторной диаграммы (см. рис. 1).

Если значение коэффициента наполнения, к которому следует стремиться для достижения максимальной мощности, назвать невозможно (величина η_v является функцией постоянно изменяющихся термодинамических условий заряда на входе в цилиндры двигателя), то подобное предельное – без потерь части свежего заряда – значение доли свежего заряда (или – в дизелях – воздуха) всегда составляет $\sigma_{C3} = 1$ (для дизелей – $\sigma_B = 1$).

Важно и то, что доля σ_r остаточных газов в рабочей смеси позволяет оценивать внутреннюю рециркуляцию (т.е. является **единственно возможной** мерой степени внутренней рециркуляции). Суммарная же доля нейтральных продуктов сгорания в рабочей смеси σ_r^Σ при проведении экспериментальных исследований позволяет более полно оценивать их влияние на показатели двигателя.

Из опыта известно, что перевод двигателя на газообразное топливо сопровождается снижением его мощности и улучшением экономических показателей. Однако использование известных зависимостей для оценки соответствующих показателей не учитывает влияния характеристик топлива на показатели двигателя. В качестве примера можно привести известную зависимость академика Б.С. Стечкина для определения среднего индикаторного давления:

$$p_i = \frac{H_u}{l_0} \frac{\eta_i}{\alpha} \eta_v \rho_k.$$

Здесь H_u – низшая рабочая теплота сгорания топлива; l_0 – стехиометрическое соотношение; η_i – индикаторный КПД; ρ_k – плотность воздуха на входе в цилиндры двигателя.

Гораздо больше информации дает выражение, показывающее зависимость p_i от объемной доли воздуха в рабочей смеси [20, 25]:

$$p_i = \frac{L_i}{V_h} = \frac{G_T^u H_u \eta_i}{V_h} = \frac{\sigma_v V_a \rho_a H_u \eta_i}{\alpha l_0 V_h}$$

Здесь L_i – индикаторная работа, совершаемая в результате реализации цикла.

Из последнего равенства получаем

$$p_i = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{H_u}{l_0} \frac{\eta_i}{\alpha} \sigma_v \rho_a \quad (3)$$

Но $\sigma_i = \frac{\varepsilon p_a T_r - p_r T_a}{\varepsilon p_a T_r} A (1 - R'_c)$ (см. таблицу),

и тогда

$$p_i = \frac{\eta_i \rho_a}{\varepsilon - 1} \frac{H_u}{l_0} \frac{(\varepsilon p_a T_r - p_r T_a)}{p_a T_r} \frac{A}{\alpha} (1 - R'_c)$$

С учетом равенства $\rho_a = \rho_k \frac{p_a T_k}{p_k T_a}$ имеем

$$p_i = \frac{\eta_i \rho_k}{\varepsilon - 1} \frac{H_u}{l_0} \frac{\varphi_1 (\varepsilon p_a T_r - p_r T_a)}{p_k T_r} \frac{T_k}{T_a} \frac{A}{\alpha} (1 - R'_c)$$

Выражение в явном виде показывает зависимость p_i от степени сжатия, степени рециркуляции R'_c , параметров РС и ОГ, а также от отношения

$\frac{A}{\alpha}$, характеризующего эффективность качественного регулирования в случае внешнего смесеобразования. Отношение $\frac{A}{\alpha} = \frac{L_0}{\alpha L_0 + \frac{1}{\mu_T}}$ равно *отношению количества киломолей воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания 1 кг топлива, к действительному количеству молей горючей смеси, состоящей из 1 кг топлива и используемого для его сжигания воздуха.*

Числитель и знаменатель дроби $\frac{L_0}{\alpha L_0 + \frac{1}{\mu_T}}$ разнятся тем существеннее, чем «легче» топливо и чем меньше α . При работе двигателя на бензине коэффициент вытеснения A близок к единице, так как количество киломолей топлива $1/\mu_T$ мало. И, коль скоро $A \approx 1$, то при обогащении смеси от стехиометрического состава отношение A/α изменя-

ется существенно, возрастая обратно пропорционально величине коэффициента α . В случае $\alpha = idem$ перевод двигателя на более «легкое» топливо неизбежно означает возрастание числа киломолей топлива $1/\mu_T$, а также и его частичного объема, вследствие чего в цилиндр поступает меньше воздуха и, в результате, с топливом вводится меньшее количество тепловой энергии, что приводит к понижению p_i (рис. 3). Таким образом, использование выражения (2) при оценке p_i позволяет посредством доли воздуха в рабочей смеси учитывать изменение количества окислителя, поступающего в цилиндры двигателя.

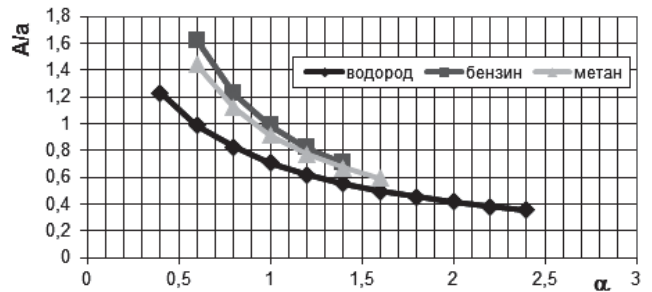


Рис. 3. Зависимости эффективности качественного регулирования мощности при внешнем смесеобразовании для различных топлив

При использовании как зависимости (3), так

и традиционного выражения $p_i = \frac{H_u}{l_0} \frac{\eta_i}{\alpha} \eta_v \rho_k$ влия-

ние рециркуляции на величину p_i удобно анализировать с учетом изменения стехиометрического соотношения l_0 в результате уменьшения доли кислорода в разбавленном рециркуляционными газами свежем заряде в сравнении с содержанием кислорода в воздухе. При этом, как показали последние исследования, состав смеси по высоте гомосферы (до 1000 км) практически неизменен, т. е. постоянна и доля кислорода в воздухе. Введение же в СЗ рециркуляционных газов увеличивает долю нейтральных газов в составе образующейся смеси за счет соответствующего снижения доли кислорода. Таким образом, на показатели двигателя влияет не доля кислорода в воздухе, а плотность воздуха.

Стехиометрическое соотношение l_0 определит-

ся выражением $l'_0 = \frac{8}{3} \frac{C + 8H - O_T}{g'_{O_2}}$, где массовая

доля кислорода в смеси воздуха с рециркуляционными газами может быть подсчитана по зависимости

$$g_{O_2}^{cm} = \frac{G_{O_2}}{G_B + G_R} = \frac{0,23(1 - R'_c)\mu_B}{(1 - R'_c)\mu_B + \mu_r R'_c}.$$

Здесь $(1 - R'_c) = \sigma'_B$ — доля воздуха в СЗ.

Для двигателей с внешним смесеобразованием это выражение принимает вид

$$g_{O_2}^{cm} = \frac{0,23A(1 - R'_c)\mu_B}{A(1 - R'_c)\mu_B + \mu_r R'_c},$$

так как в этом случае доля воздуха в свежем заряде равна $A(1 - R'_c)$.

Массовая доля рециркуляционных газов

$$g_R^{cm} = \frac{R'_c \mu_r}{A(1 - R'_c)\mu_B + \mu_r R'_c}$$

(сумма долей компонентов равна единице — $g_{O_2}^{cm} + g_R^{cm} = 1$).

Таким образом, для двигателей с внешним смесеобразованием стехиометрическое соотношение определится выражением

$$l'_0 = \left(\frac{8}{3}C + 8H - O_T \right) \frac{A(1 - R'_c)\mu_B + \mu_r R'_c}{0,23A(1 - R'_c)\mu_B}$$

или

$$l'_0 = l_0 \frac{A(1 - R'_c)\mu_B + \mu_r R'_c}{A(1 - R'_c)\mu_B}.$$

То есть в общем случае значение l'_0 отличается

от l_0 в $\frac{A(1 - R'_c)\mu_B + \mu_r R'_c}{A(1 - R'_c)\mu_B}$ раз, а потому зависи-

мость (3) и уравнение Стечкина могут быть переписаны следующим образом:

$$p_i = \frac{H_u}{l_0} \frac{\eta_i}{\alpha} \frac{A(1 - R'_c)\mu_B}{A(1 - R'_c)\mu_B + \mu_r R'_c} \eta_v \rho_k$$

и

$$p_i = \frac{H_u}{l_0} \frac{\eta_i}{\alpha} \frac{A(1 - R'_c)\mu_B}{A(1 - R'_c)\mu_B + \mu_r R'_c} \eta_v \rho_k$$

(в этом случае величины σ_B и η_v подсчитываются без учета коэффициента A и степени рециркуляции R'_c).

Отсюда следует, что p_i понижается с переводом двигателя на питание газообразным топливом и в случае увеличения степени рециркуляции.

Значение l'_0 можно найти из выражения

$$l'_0 = \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O_T}{32},$$

где r'_{O_2} — объемная доля кислорода в смеси воздуха и рециркуляционных газов. Для двигателя с внутренним смесеобразованием ее можно определить исходя из выражения

$$r'_{O_2} = \frac{N_{O_2}}{N_{O_2} + N_{N_2} + N_R} = \frac{0,21N_B}{N_B + N_R},$$

которое после деления на количество киломолей свежего заряда принимает вид

$$r'_{O_2} = \frac{0,21\sigma'_B}{\sigma'_B + \sigma'_R} = \frac{0,21A(1 - R'_c)}{A(1 - R'_c) + R'_c}.$$

Здесь штрих в обозначении объемных долей соответствует долям компонентов свежего заряда. Следовательно,

$$l'_0 = \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O_T}{32} \right) \frac{A(1 - R'_c) + R'_c}{0,21A(1 - R'_c)}$$

или

$$l'_0 = l_0 \frac{A(1 - R'_c) + R'_c}{A(1 - R'_c)}.$$

Зависимости стехиометрического соотношения l'_0 и доли кислорода r'_{O_2} в смеси воздуха и рециркуляционных газов от степени рециркуляции приведены на рис. 4.

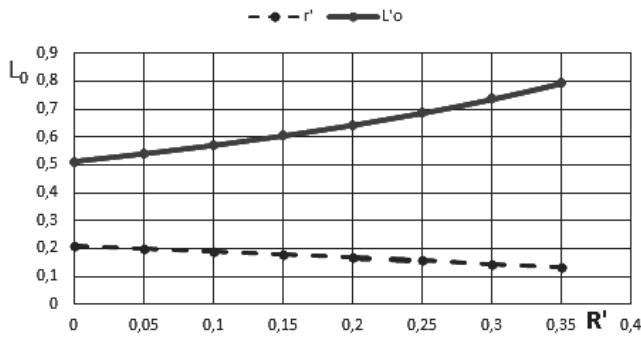


Рис. 4. Зависимость от степени рециркуляции стехиометрического соотношения L'_0 и доли кислорода r'_0 в смеси воздуха и рециркуляционных газов

Удельный индикаторный расход топлива определяется отношением

$$g_i = \frac{G_T^{\text{ц}}}{L_i},$$

где $G_T^{\text{ц}} = \frac{G_B^{\text{ц}}}{\alpha l_0} = \frac{V_a \sigma_B \rho_B}{\alpha l_0}$ — цикловой заряд топлива;

L_i — индикаторная работа, совершаемая рабочим телом за цикл.

В этом случае $g_i = \frac{V_a \sigma_B \rho_B}{\alpha l_0 L_i} = \frac{V_a \sigma_B \rho_B}{\alpha l_0 p_i V_h}$ или окончательно

$$g_i = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{\sigma_B \rho_B}{\alpha l_0 p_i}.$$

Отсюда следует, что при переводе двигателя с бензина на легкое газообразное топливо в случае поддержания неизменными величин p_i и α значение g_i должно понизиться ввиду уменьшения доли воздуха σ_B в рабочей смеси, а также вследствие возрастания стехиометрического соотношения l_0 (для метана оно равно 17,24, а для водорода — почти 35!).

Влияние рециркуляционных газов на экономические показатели двигателя удобнее анализировать посредством анализа изменения величины стехиометрического соотношения l'_0 .

По аналогии с обеднением горючей смеси можно говорить об обеднении смеси рабочей — в результате ее разбавления продуктами сгорания концентрация топлива и кислорода в РС снижается. При $\frac{G_B}{G_T} = idem$ увеличение степени рецирку-

ляции от нуля сопровождается возрастанием действительного значения стехиометрического соотношения l'_0 , что в соответствии со структурой приведенной выше зависимости должно приводить к наблюдаемому на практике снижению g_i за счет улучшения условия смесеобразования и большей гомогенизации смеси. Более существенное (превосходящее 10...15%) увеличение R'_c имеет следствием ухудшение экономических характеристик двигателя ввиду все более значительного уменьшения концентрации молекул топлива и окислителя в рабочей смеси вследствие ее разбавления рециркуляционными газами.

Пользуясь соотношением $g_i = \frac{1}{H_u \eta_i}$, получаем

выражение для определения индикаторного КПД двигателя:

$$\eta_i = \frac{(\varepsilon - 1) \alpha l_0 p_i}{\varepsilon \sigma_B H_u \rho_a}.$$

При замене бензина на газообразные топлива как уменьшение σ_B и возрастание l_0 , так и увеличение действительного значения l'_0 в случае использования рециркуляции — при введении во впускной тракт продуктов сгорания — приводят к повышению индикаторного КПД η_i .

Выводы

Анализ результатов наполнения на базе парциальных объемов компонентов рабочей смеси позволяет оценить степень заполнения цилиндра свежим зарядом и отдельными его компонентами. Соотношение объемных долей компонентов рабочей смеси характеризует ее состав, от которого зависят все показатели двигателя. При этом значение доли остаточных газов σ_r позволяет оценивать степень внутренней рециркуляции. В сравнении со степенью рециркуляции R'_c суммарная доля продуктов сгорания σ_r^{Σ} позволяет более объективно судить о влиянии нейтральных продуктов сгорания на показатели двигателя. Полученные зависимости индикаторных показателей двигателя с внешним смесеобразованием от доли воздуха в рабочей смеси имеют универсальный характер — они справедливы как для двигателей авиационных, так и для силовых установок судов,

тепловозов, тракторов и автомобилей. Они отражают влияние типа используемого топлива на мощностные и экономические показатели двигателя. Ввиду сокращения числа переменных использование в современных прикладных программах расчета ДВС в качестве базы долей компонентов рабочей смеси могло бы привести к сокращению времени расчета.

Библиографический список

1. *Масленников М.М., Рапипорт М.С.* Авиационные поршневые двигатели: Учебное пособие. — М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1951. — 847 с.
2. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Экспериментальное определение роли поршневого двигателя в суммарном шуме силовой установки легкого винтового самолета // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 50-61.
3. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Интегральная модель шума силовой установки легкого винтового самолета // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 36-44.
4. *Силуянова М.В., Челябин О.Г.* Пневматический способ подготовки равномерной смеси жидкого топлива с воздухом в камере сгорания ГТД // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 86-94.
5. *Силуянова М.В., Челябин О.Г.* Применение альтернативных топлив в авиационных газотурбинных двигателях // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69695>
6. *Ребров С.Г., Голубев В.А., Лозино-Лозинская И.Г., Позвонков Д.М.* Лазерное воспламенение топлива кислород-метан в камере сгорания с осевым вводом лазерного излучения // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=96934>
7. *Финогенов С.Л., Коломенцев А.И.* Солнечный тепловой ракетный двигатель с оксид-бериллиевым фазопереходным тепловым аккумулятором и дожиганием водорода // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 107-115.
8. *Калугин К.С., Сухов А.В.* Особенности использования метана в качестве горючего для жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 120-132.
9. *Ерохов В.И., Карунин А.Л.* Газодизельные автомобили: Конструкция, расчет, эксплуатация. — М.: Граф-Пресс, 2005. — 560 с.
10. *Ter-Mkrtychyan G.G., Saikin A.M., Karpukhin K.E., Terenchenko A.S., Ter-mkrtychyan Yu.G.* Diesel-to-natural gas engine conversion with lower compression ratio // Pollution Research. 2017. Vol. 36. No. 3, pp. 678-683.
11. *Григорьев Е.Г., Колубаев Б.Д., Ерохов В.И.* и др. Газобаллонные автомобили. — М.: Машиностроение, 1989. — 216 с.
12. *Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В.* Двигатели внутреннего сгорания: Теория, моделирование и расчет процессов. — Челябинск: ЮУрГУ, 2004. — 344 с.
13. *Ленин И.М.* Теория автомобильных и тракторных двигателей: Учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 1969. — 367 с.
14. *Тареев В.М.* Справочник по тепловому расчету рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания. — Л.: Речной транспорт, 1961. — 415 с.
15. *Volkmar Küntscher.* Kraftfahrzeugmotoren. — VEB, Verlag Technik, Berlin, 1989, pp. 503, 558 (719 p).
16. *Ковылов Ю.Л., Угланов Д.А.* Влияние различных факторов на коэффициент наполнения поршневого двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им С.П. Королева. 2007. № 2. С. 114-117.
17. *Шароглазов Б.А., Поваляев В.А.* Расчетная оценка качества наполнения свежим зарядом цилиндров поршневого двигателя на стадии проектирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2008. № 23(123). С. 20-25.
18. *Матюхин Л.М.* Альтернатива коэффициенту наполнения // Двигатель-2007: Сборник научных трудов по материалам Международной конференции, посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. С. 80-85.
19. *Matyujin L.* Análisis de los procesos de intercambio de gases en los motores de cuatro tiempos. — Panamá. UTR. 2001. Vol. 5, IX, pp. 10-13.
20. *Матюхин Л.М.* Анализ наполнения и тепловой расчет ДВС на базе состава рабочей смеси. — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. — 170 p.
21. *Матюхин Л.М.* Анализ процессов газообмена и состава рабочей смеси газового двигателя с внешним смесеобразованием // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2007. № 4(11). С. 5-7.
22. *Фучкин С.* Опыт и перспективы перевода на газомоторное топливо карбюраторных и дизельных двигателей большегрузных и легковых автомобилей // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2003. № 4(10). С. 28-33.
23. *Матюхин Л.М.* Особенности использования коэффициентов наполнения «по воздуху» и «по смеси» для оценки результатов газообмена в газовых двигателях // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 4(40). С. 38-46.
24. *Матюхин Л.М.* Универсальная формула коэффициента наполнения четырехтактного двигателя внутреннего сгорания // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2010. № 3(22). С. 39-43.
25. *Матюхин Л.М.* Оценка наполнения и индикаторных показателей газовых ДВС // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2012. № 1(61). С. 15-18.

26. *Matyukhin L.M.* The alternative method of the estimate of the quality of gas–exchange processes in the internal–combustion engine (El método alternative de la evaluación de calidad de los resultados del intercambio de gases en los motores de combustión interna) – *Revista Ingenieria UC*. 2018. Vol. 25. No 1, pp. 31–43.
27. *Матюхин Л.М.* Альтернатива традиционному подходу к изложению курса теории автотракторных двигателей // *Вестник Московского Государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина*. 2015. № 4(68). С. 56–59.
28. *Матюхин Л.М., Тер-Мкртчян Г.Г.* Термодинамические основы расчета рабочего цикла двигателей с укороченным впуском или укороченным сжатием на основе анализа состава рабочей смеси // *Труды НАМИ*. 2015. № 263. С. 35–44.
29. *Тер-Мкртчян Г.Г.* Манипулирование коэффициентом наполнения и фактической степенью сжатия за счет вариации фаз газораспределения в двигателях с количественным регулированием мощности // *Труды НАМИ*. 2014. № 258. С. 144–176.

THE FUEL MOLAR WEIGHT IMPACT ON FILLING, AND INDICATOR INDICES OF A PISTON COMBUSTION ENGINE

Matiukhin L.M.

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,
MADI, 64, Leningradskiy prospekt, Moscow, 125319, Russia
e-mail: panam1@mail.ru*

Abstract

The problems arising while improvement of any type of the internal combustion engine (ICE), such as reciprocating, rotary-piston, gas turbine or jet engines, are common for all of them.

The notions of the volumetric efficiency (η_v) and residual gases (γ_r) traditionally used in the theory of piston internal-combustion engines do not allow characterize the air-fuel mixture composition, which defines the all power, economic and ecological indices of the engines. All the above-mentioned coefficients are applied only while the reciprocating ICE design. With this, the main indicator of pistons filling, namely volumetric efficiency, characterizes not so much the cylinders' filling as its downgrade due to the presence of hydraulic resistances and incoming charge warming up. The essential drawback of all known equations for the volumetric efficiency determination is ignoring the impact of the fuel type, excess-air coefficient and recirculation's degree on the cylinders filling. The general-technical concepts of (volume) fractions are far more informative. The aggregate of air-fuel mixture fractions determines its composition and thermodynamic characteristics values. The incoming charge (air) fraction allows unambiguous judgment on the degree of filling the whole cylinder volume, i.e. on the existing reserves of filling. Using the air or mixture volumetric fraction as the main filling indicator while piston ICE cycle computing allows accounting for the fuel molar weight and recirculation impact on the engine indices. As the result of the analysis, in order

to account for the fuel impact on the filling the so-called “displacement coefficient” was proposed. Power and economic indices of the engine depend on this coefficient value. The value of this coefficient determines the degree of qualitative power regulation efficiency. Together with the recirculation degree, this coefficient determines the value of stoichiometric relationships and, thus, affects the indicator and effective indices of the engine.

As the sum of the fractions equals to the one, there is no necessity with the suggested approach in separate determining the fraction of the residue gases, since this fraction is equal to the difference between the one and the incoming charge fraction. The suggested approach is of prime importance while analyzing operating cycles of the engines operating on gaseous fuels, and on hydrogen in particular. As a result, the structure of the main calculation dependencies is simplified, and their analysis becomes more clearly evident and easy-to-understand. The possibility of the computing results visualization facilitates their analysis and is a great advantage of the suggested approach in terms of didactics.

Employing the ICE computation as a base of the air-fuel mixture fractions in modern applied programs might have led to the labor intensity reduction and execution time cutting due to the number of variables reduction.

Keywords: piston internal combustion engine, gas exchange, filling, volumetric efficiency, volumetric fractions of air-fuel-residual mixture, molar weight, gaseous fuels, stoichiometric relationships, hydrogen.

References

1. Maslennikov M.M., Rapiport M.S. *Aviatsionnye porshnevyye dvigateli* (Aviation piston engines), Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoi promyshlennosti, 1951, 847 p.
2. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Experimental determination of piston engine share in the light propeller aircraft power plant total noise. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 50-61.
3. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Propeller-driven light aircraft power plant noise Integral model. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 36-44.
4. Siluyanov M.V., Chelebyan O.G. Pneumatic method for uniform air-fuel mixture preparation in GTE combustor. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 86-94.
5. Siluyanov M.V., Chelebyan O.G. *Trudy MAI*, 2016, no. 87. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69695>
6. Rebrov S.G., Golubev V.A., Lozino-Lozinskaya I.G., Pozvonkov D.M. *Trudy MAI*, 2018, no 101. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=96934>
7. Finogenov S.L., Kolomentsev A.I. Solar thermal rocket engine with beryllium-oxide phase-transition latent heat energy storage and hydrogen afterburning. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 107-115.
8. Kalugin K.S., Sukhov A.V. Methane application specifics as a fuel for liquid rocket engines. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 120-132.
9. Erokhov V.I., Karunin A.L. *Gazodizel'nye avtomobili: Konstruktsiya, raschet, ekspluatatsiya* (Gas-Diesel cars: Structure, design, operation). Moscow, Graf-Press, 2005, 560 p.
10. Ter-Mkrtichyan G.G., Saikin A.M., Karpukhin K.E., Terenchenko A.S., Ter-Mkrtichyan Yu.G. Diesel-to-natural gas engine conversion with lower compression ratio. *Pollution Research*, 2017, vol. 36, no. 3, pp. 678-683.
11. Grigor'ev E.G., Kolubaev B.D., Erokhov V.I. et al. *Gazoballonnye avtomobili* (Compressed gas vehicles), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 216 p.
12. Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klement'ev V.V. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya, modelirovanie i raschet protsessov* (Internal combustion Engines: Theory, modeling and calculation of processes), Chelyabinsk, YuUrGU, 2004, 344 p.
13. Lenin I.M. *Teoriya avtomobil'nykh i traktornykh dvigatelei* (Theory of automobile and tractor engines), Moscow, Mashinostroenie, 1969, 367 p.
14. Tareev V.M. *Spravochnik po teplovomu raschetu rabocheho protsessa dvigatelei vnutrennego sgoraniya* (Handbook of thermal calculation of internal combustion engines working process), Leningrad, Rechnoi transport, 1961, 415 p.
15. Volkmar Küntscher. *Kraftfahrzeugmotoren*. VEB, Verlag Technik, Berlin, 1989, pp. 503, 558 (719 p).
16. Kovylov Yu.L., Uglanov D.A. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im S.P. Koroleva*, 2007, no. 2, pp. 114-117.
17. Sharoglazov B.A., Povalyaev V.A. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Mashinostroenie*, 2008, no. 23(123), pp. 20-25.
18. Matyukhin L.M. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi konferentsii Dvigatel'-2007, posvyashchennoi 100-letiyu shkoly dvigatelestroeniya MGTU im. N.E.Baumana*. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2007, pp. 80-85.
19. Matyujin L. *Análisis de los procesos de intercambio de gases en los motores de cuatro tiempos*. Panamá, UTP, 2001, vol. 5, IX, pp. 10-13.
20. Matyukhin L.M. *Analiz napolneniya i teplovoi raschet DVS na baze sostava rabochei smesi* (Filling analysis and thermal design of internal combustion engine based on the working mixture composition). Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011, 170 p.
21. Matyukhin L.M. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, no. 4(11), pp. 5-7.
22. Fuchkin S. *AvtoGazoZapravochnyi kompleks + Al'ternativnoe toplivo*, 2003, no. 4(10), pp. 28-33.
23. Matyukhin L.M. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2014, no. 4(40), pp. 38-46.
24. Matyukhin L.M. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 3(22), pp. 39-43.
25. Matyukhin L.M. *AvtoGazoZapravochnyi kompleks + Al'ternativnoe toplivo*, 2012, no. 1(61), pp. 15-18.
26. Matyukhin L.M. *El método alternative de la evaluaciyn de calidad de los resultados del intercómbo de gases en los motores de combustiyn interna*. Revista Ingenieria UC, 2018, vol. 25, no 1, pp. 31-43.
27. Matyukhin L.M. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta im. V.P.Goryachkina*, 2015, no. 4(68), pp. 56-59.
28. Matyukhin L.M., Ter-Mkrtich'yan G.G. *Trudy NAMI*, 2015, no. 263, pp. 35-44.
29. Ter-Mkrtich'yan G.G. *Trudy NAMI*, 2014, no. 258, pp. 144-176.