

Научная статья  
УДК 621.43

## Зависимость стехиометрического соотношения от состава рабочей смеси

Леонид Михайлович Матюхин

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, Россия

panaml@mail.ru

**Аннотация.** Для использования известного выражения Стечкина  $p_i = \frac{H_u \eta_i}{I_0 \alpha} \eta_v \rho_v$  применительно к различным топливам необходима подстановка в него величин низшей рабочей теплоты сгорания  $H_u$  и стехиометрического соотношения  $I_0$ , характерных для каждого конкретного топлива. Соответствующие величины определяются химическим составом топлива и приводятся в справочной литературе. Расчет стехиометрического соотношения проводится по формулам окисления в предположении, что объемная доля кислорода в воздухе равна 21%, а массовая – 23%. Однако в цилиндрах поршневых ДВС топливо сгорает не в воздухе, а в его смеси с продуктами сгорания, что должно приводить к отклонению значения доли кислорода от приведенных выше величин и, следовательно, к возрастанию стехиометрического отношения  $I_0$ .

В связи с этим ставится задача учета влияния содержания в рабочей смеси нейтральных продуктов сгорания на величину стехиометрического соотношения. Для ее решения применен термодинамический анализ соотношений парциальных объемов компонентов рабочей смеси.

В статье приводятся полученные в результате анализа зависимости для определения стехиометрического соотношения в зависимости от доли нейтральных продуктов сгорания в рабочей смеси.

**Ключевые слова:** поршневые ДВС, состав рабочей смеси, среднее давление цикла, степень сжатия, степень рециркуляции.

**Для цитирования:** Матюхин Л.М. Зависимость стехиометрического соотношения от состава рабочей смеси // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 1 (43).

Original article

## Dependence of stoichiometric ratio on the composition of the working mixture

Leonid M. Matiukhin

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

panaml@mail.ru

**Abstract.** In order to use the well-known Stechkin's expression  $p_i = \frac{H_u \eta_i}{l_0 \alpha} \eta_v \rho_B$  in relation to different fuels, it is necessary to substitute into it the values of the lowest working calorific value of  $H_u$  and the stoichiometric ratio of  $l_0$ , characteristic for each specific fuel. The corresponding values depend on the chemical composition of the fuel and are given in the reference literature. The calculation of the stoichiometric ratio is carried out according to oxidation formulas, assuming that the volume fraction of oxygen in the air is 21% and the mass fraction is 23%. However, in the cylinders of reciprocating internal combustion engines, the fuel is burned not in the air, but in its mixture with combustion products, which should lead to a deviation in the value of the oxygen fraction from the above-mentioned values and, consequently, to an increase in the stoichiometric ratio of  $l_0$ .

In this regard, the task is to take into account the effect of the content of neutral combustion products in the working mixture on the value of the stoichiometric ratio. To solve it, a thermodynamic analysis of the ratios of partial volumes of the components of the working mixture was used.

The article presents the dependencies obtained as a result of the analysis to determine the stoichiometric ratio depending on the fraction of neutral combustion products in the working mixture.

**Keywords:** piston ICE, composition of the working mixture, average cycle pressure, compression ratio, the degree of recirculation.

**For citation:** Matiukhin L.M. Dependence of stoichiometric ratio on the composition of the working mixture. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. No. 1 (43).

### Введение

Растущий спрос на энергоносители в условиях увеличения автомобильного парка привел к необходимости расширения топливной базы за счет все более широкого использования газообразных топлив, спиртов и эфиров. Различия в химическом составе отдельных топлив определяют широкий спектр их теплоты сгорания и стехиометрических соотношений. И если приводимые в справочниках теплоты сгорания зависят исключительно от химического состава топлива, то стехиометрическое соотношение дополнительно является функцией доли кислорода в рабочей смеси. При этом ее – рабочей смеси – состав зависит от степени рециркуляции [1, 2].

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , определяемый с использованием табличных значений стехиометрического соотношения  $l_0$ , необходим для

оценки и поддержания требуемого состава топливоздушной горючей смеси [2...4]. Соотношение абсолютных количеств окислителя и топлива остается неизменным и после разбавления горючей смеси рециркуляционными и остаточными газами (РГ и ОГ) при образовании свежего заряда (СЗ) и рабочей смеси (РС). Однако при этом доля кислорода в РС будет отличаться от таковой в воздухе. Даже при отсутствии рециркуляции наличие в рабочей смеси ОГ неизбежно приводит к снижению в ней долей кислорода, а также и азота, в сравнении с их содержанием в воздухе, что должно сказываться на реальном значении стехиометрического соотношения  $l'_0$  (или  $L'_0$ ). Таким образом, процесс горения топлива происходит в условиях, когда доля кислорода в смеси, состоящей из кислорода, азота и нейтральных продуктов сгорания (НПС), будет меньше, чем его доля в воздухе. Это происходит за счет «эффекта вытеснения» воздуха [5...7] из цилиндра продуктами сгорания (рис. 1). Действительно, при неизменном значении давления рабочей смеси увеличение доли нейтральных продуктов сгорания может происходить лишь вследствие снижения доли воздуха.

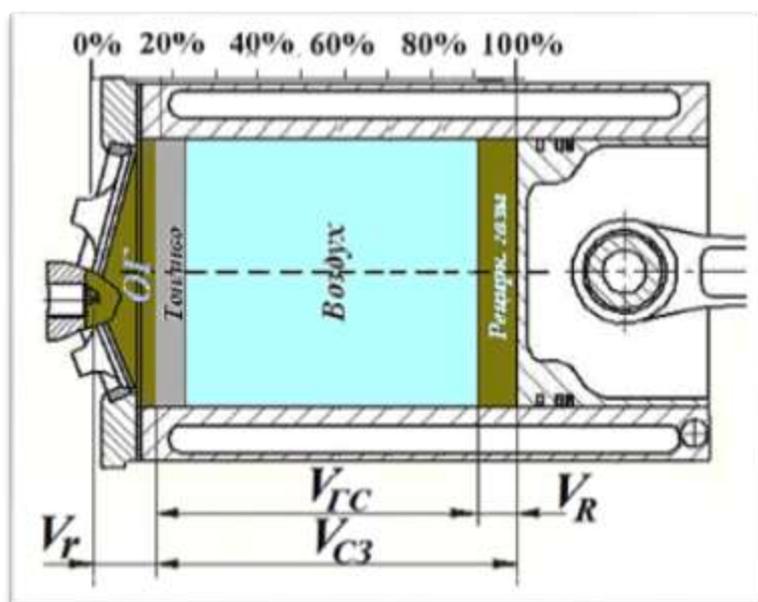


Рис.1. Объем рабочей смеси как сумма парциальных объемов ее компонентов

Следовательно, возрастание доли НПС в рабочей смеси должно сопровождаться снижением долей воздуха и содержащегося в нем кислорода

при соответствующем повышении реального значения стехиометрического соотношения  $l'_0$  (или  $L'_0$ ) [7].

Для большинства применяемых на колесном транспорте жидких и газообразных топлив, включая спирты, отношение  $H_u/l_0$  колеблется от 2,9 до 3, то есть практически неизменно (исключение составляет лишь водород, у которого это отношение равно 3,7). В связи с этим отношение приводимых в справочной литературе величин  $H_u/l_0$  можно считать постоянным и в грубом приближении равным 29,5. Однако при нахождении среднего индикаторного давления, определяемого зависимостью Стечкина

$p_i = \frac{H_u \eta_i}{l_0 \alpha} \eta_v$ , необходимо учитывать зависимость реального значения  $l'_0$  от степени разбавления РС нейтральными продуктами сгорания – от степени рециркуляции  $R'_c$  или от суммарной доли продуктов сгорания  $\sigma_r^\Sigma$  в рабочей смеси [7], учитывающей содержание в смеси отработавших газов.

Таким образом, в знаменатель выражения  $p_i = \frac{H_u \eta_i}{l_0 \alpha} \eta_v p_v$  вместо  $l_0$  следует подставлять его действительное значение, определяемое выражением

$l'_0 = \frac{\frac{8}{3}C + 8H - O_T}{g'_{O_2}}$ , учитывающем реальную величину массовой доли кислорода

$g'_{O_2}$  в смеси воздуха с нейтральными ПС – остаточными и рециркуляционными газами. В этом выражении штрих показывает, что речь идет о смеси кислорода с азотом воздуха и с нейтральными продуктами сгорания. При этом отличие величин  $l'_0$  и  $l_0$  определяется разницей долей кислорода в воздухе  $g_{O_2}$  и в рабочей смеси  $g'_{O_2}$ .

Поскольку тепловой расчет ПДВС обычно базируется на количествах киломолей компонентов рабочей смеси, при оценке их соотношений удобно использовать значения объемных долей  $\sigma_i = (N_i/N) = (V_i/V_a)$ . Здесь  $N$  – суммарное количество киломолей РС, занимающей полный объем цилиндра  $V_a$ , а подстрочный индекс “i” соответствует значениям количеств

киломолей или парциальных объемов компонентов в композиции «кислород–азот–нейтральные продукты сгорания», в которой сгорает топливо.

### Влияние разбавления горючей смеси нейтральными продуктами сгорания на стехиометрическое соотношение

Нахождение объемной доли кислорода в смеси воздуха и нейтральных продуктов сгорания (НСМ)  $\sigma'_{O_2^{CM}}$  упрощается при рассмотрении общего количества киломолей РС как суммы количеств киломолей ее компонентов  $N_B + N_R + N_r + N_T = N$  [7, 8]. Здесь нижний индекс «r» относится к ОГ, а индекс «R» – к рециркуляционным газам. Равенство можно переписать и как  $N_B + N_{ПС} + N_T = N$ , где  $N_{ПС} = (N_R + N_r)$  – суммарное количество киломолей нейтральных продуктов сгорания (ПС). При отсутствии рециркуляции  $N_{ПС} = N_r$ .

Из приведенного равенства следует, что количество киломолей  $N^{CM}$  нейтральных ПС в их смеси с воздухом определяется равенством

$$N^{CM} = N_B + N_R + N_r = N - N_T,$$

Поле деления этого выражения на общее количество киломолей *рабочей смеси*  $N$  можно найти зависимость для определения доли воздуха  $\sigma_B^{CM}$  в его смеси с нейтральными продуктами сгорания

$$\sigma_B^{CM} = \frac{N_B}{N_B + N_R + N_r} = \frac{N_B}{N - N_T} = \frac{\sigma_B}{1 - \sigma_T}. \quad (1)$$

Стоящая в знаменателе разность  $(1 - \sigma_T)$  представляет собой долю воздуха и НПС *в рабочей смеси*, то есть  $\sigma_{CM} = \sigma_B + \sigma_{ПС}$ . Соотношения объемных долей компонентов в рабочей смеси и в смеси воздуха с НПС может быть найдена из следующих соображений.

Парциальный объем воздуха определяется посредством доли воздуха выражениями  $V_B = V_a \sigma_B$  и  $V_B = V^{CM} \sigma_B^{CM}$  (или, что то же самое, через количества киломолей:  $N_B = N \sigma_B = N^{CM} \sigma_B^{CM}$ ). Здесь обозначения  $V^{CM}$  и  $N^{CM}$  относятся к смеси кислорода с нейтральными продуктами сгорания (к композиции «кислород–азот–нейтральные продукты сгорания»). Поле

деления на  $V_a$  (или, соответственно, на общее количество киломолей рабочей смеси  $N$ ) имеем

$$\sigma_B = \sigma_{CM} \sigma_B^{CM},$$

откуда доля воздуха в его смеси с НПС равна

$$\sigma_B^{CM} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{CM}}. \quad (1a)$$

Аналогично из равенства  $V_a \sigma_{ПС} = V_{ПС}^{CM} \sigma_{ПС}^{CM}$  имеем соотношения

$$\sigma_{ПС} = \sigma_{CM} \sigma_{ПС}^{CM} \quad \text{и} \quad \sigma_{ПС}^{CM} = \frac{\sigma_{ПС}}{\sigma_{CM}},$$

в которых  $\sigma_{CM} = \sigma_B + \sigma_{ПС}$  – доля смеси воздуха и НПС *в рабочей смеси*.

Нетрудно видеть, что сумма долей воздуха и НПС в их смеси равна единице

$$\sigma_B^{CM} + \sigma_{ПС}^{CM} = \frac{\sigma_B + \sigma_{ПС}}{\sigma_{CM}} = 1.$$

Здесь доля смеси воздуха и НПС определяется разностью  $\sigma_{CM} = 1 - \sigma_T$ . В

свою очередь, из зависимости для нахождения коэффициента избытка

воздуха  $\alpha = \frac{N_B \mu_B}{N_T \mu_T l_0}$  после деления числителя и знаменателя на общее

количество киломолей  $N$  воздуха и топлива получаем

$$\sigma_T = \frac{\sigma_B}{\alpha \mu_T L_0}.$$

Таким образом, можно написать  $\sigma_B^{CM} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{CM}} = \frac{\sigma_B}{1 - \sigma_T} = \frac{\sigma_B}{1 - \frac{\sigma_B}{\alpha \mu_T L_0}}$ . Отсюда

$$\sigma_B^{CM} = \frac{\sigma_B \alpha \mu_T L_0}{\alpha \mu_T L_0 - \sigma_B} \quad (16)$$

Аналогично получаем выражение для доли НПС в их смеси с воздухом

$$\sigma_{ПС}^{CM} = \frac{\sigma_{ПС}}{\sigma_{CM}} = \frac{1 - \sigma_T - \sigma_B}{1 - \sigma_T} = \frac{1 - \frac{\sigma_B}{\alpha \mu_T L_0} - \sigma_B}{1 - \frac{\sigma_B}{\alpha \mu_T L_0}}.$$

или

$$\sigma_{ПС}^{CM} = \frac{\alpha \mu_T L_0 - \sigma_B (1 + \alpha \mu_T L_0)}{\alpha \mu_T L_0 - \sigma_B}.$$

В результате доли воздуха и НПС в их смеси определены посредством доли

$\sigma_B$  воздуха в РС. Нетрудно убедиться, что сумма этих долей  $\sigma_B^{CM}$  и  $\sigma_{ПС}^{CM}$  равна единице.

Стоящие же в правой части полученных равенств величины объемных долей оцениваются их значениями *в рабочей смеси*. Подсчет объемных долей воздуха и топлива в РС в общем случае может проводиться с использованием зависимостей [5...8]

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

Принимая во внимание выражение (1 б), и учитывая, что по объему в воздухе содержится 21% кислорода, его доля в смеси воздуха с НПС определится выражением

$$\sigma_{O_2}^{CM} = \frac{0,21 \sigma_B \alpha \mu_T L_0}{\alpha \mu_T L_0 - \sigma_B}.$$

Исходя из известной зависимости [1...3] для определения стехиометрического соотношения в киломолях воздуха на 1 кг топлива,  $L_0 = \frac{C + \frac{H}{4} + \frac{O_T}{32}}{r_{O_2}}$ , для случая горения в смеси воздуха с НПС можно записать

$$L'_0 = \frac{\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O_T}{32}}{\sigma_{O_2}^{CM}} = \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O_T}{32} \right) \frac{(\alpha \mu_T L_0 - \sigma_B)}{0,21 \sigma_B \alpha \mu_T L_0}.$$

Отсюда  $L'_0 = L_0 \frac{(\alpha \mu_T L_0 - \sigma_B)}{\sigma_B \alpha \mu_T L_0}$  или, окончательно,

$$L'_0 = \frac{(\alpha \mu_T L_0 - \sigma_B)}{\sigma_B \alpha \mu_T} \quad \text{и} \quad L'_0 = \frac{L_0}{\sigma_{O_2}^{CM}} \quad (2)$$

Таким образом, разбавление горючей смеси нейтральными продуктами сгорания действительно должно приводить к возрастанию стехиометрического соотношения, и это увеличение обратно пропорционально доле воздуха в его смеси с нейтральными продуктами сгорания – чем меньше доля воздуха и чем больше доля ПС, тем выше значение  $L'_0$ .

При определении коэффициента избытка воздуха удобнее использовать значение стехиометрического соотношения  $L_0$  в [кг воздуха / килограмм

топлива]. Поскольку  $\sigma_{O_2}^{CM} < \sigma_{O_2}^B$ , то и массовая доля кислорода  $g_{O_2}^{CM}$  в смеси нейтральных ПС с воздухом должна быть меньше массовой доли кислорода в воздухе ( $g_{O_2}'^{CM} < g_{O_2}^B$ ).

В смеси воздуха с нейтральными продуктами сгорания ее масса находится как  $M^{CM} = M_B + M_R + M_r = M - M_T$ . По аналогии с приведенным выше выводом выражений для определения объемных долей компонентов смеси воздуха с НПС

$$g_B^{CM} = \frac{M_B}{M_B + M_R + M_r} = \frac{M_B}{M - M_T} = \frac{g_B}{1 - g_T}.$$

Из выражения для определения коэффициента  $\alpha$  следует  $M_T = \frac{M_B}{\alpha l_0}$ , откуда после деления на суммарную массу  $M$

$$g_T = \frac{g_B}{\alpha l_0}.$$

Поскольку  $M_B = M g_B = M^{CM} g_B^{CM}$ , то  $g_B^{CM} = \frac{g_B}{g_{CM}}$  и, по аналогии,

$$g_{ПС}^{CM} = \frac{g_{ПС}}{g_{CM}}. \text{ Следовательно, } g_B^{CM} = \frac{g_B}{1 - g_T} = \frac{g_B}{1 - \frac{g_B}{\alpha l_0}} \text{ ИЛИ}$$

$$g_B^{CM} = \frac{g_B \alpha l_0}{\alpha l_0 - g_B}. \quad (3)$$

Аналогично, массовая доля НПС определяется как:

$$g_{ПС}^{CM} = \frac{M_{ПС}}{M_{CM}} = \frac{g_{ПС}}{g_{CM}} = \frac{1 - g_T - g_B}{1 - g_T} = \frac{1 - \frac{g_B}{\alpha l_0} - g_B}{1 - \frac{g_B}{\alpha l_0}} = \frac{\alpha l_0 - g_B - \alpha l_0 g_B}{\alpha l_0 - g_B},$$

что дает в результате

$$g_{ПС}^{CM} = \frac{\alpha l_0 - (1 + \alpha l_0) g_B}{\alpha l_0 - g_B}.$$

Сумма массовых долей воздуха и продуктов сгорания в их смеси равна единице

$$g_B^{CM} + g_{ПС}^{CM} = \frac{g_B \alpha l_0 + \alpha l_0 - g_B - \alpha l_0 g_B}{\alpha l_0 - g_B} = 1$$

Доля кислорода при использовании зависимости (3):

$$g_{O_2}^{CM} = \frac{0,23 g_B \alpha l_0}{\alpha l_0 - g_B}.$$

$$\text{Но } l'_0 = \frac{\frac{8}{3}C + 8H - O_T}{g_{O_2}^{CM}} = \left( \frac{8}{3}C + 8H - O_T \right) \frac{\alpha l_0 - g_B}{0,23 g_B \alpha l_0}.$$

Значение  $l'_0$  при заданной величине  $\alpha$  в горючей смеси определится как

$$l'_0 = l_0 \frac{\alpha l_0 - g_B}{g_B \alpha l_0} = \frac{\alpha l_0 - g_B}{g_B \alpha}. \quad (4)$$

Чем больше степень рециркуляции – тем меньше в цилиндре остается воздуха [7, 8] и тем меньше его доля  $g_B$ .

В табл. 1 приведены значения объемных и массовых долей компонентов рабочей смеси, а также стехиометрического соотношения в киломолях и килограммах воздуха на килограмм топлива.

Таблица 1

Зависимость состава рабочей смеси и стехиометрического соотношения от степени рециркуляции (топливо – бензин)

$R'_c$	$S_B$	$\sigma_R^\Sigma$	$S_T$	$g_B$	$g_R^\Sigma$	$g_T$	$L'_0$	$l'_0$
<b>0</b>	<b>0,940</b>	<b>0,043</b> 7	<b>0,015</b> 9	<b>0,898</b> 5	<b>0,041</b> 4	<b>0,060</b> 1	<b>0,541</b> 4	<b>15,58</b> 7
<b>0,025</b>	0,917	0,067 6	0,015 5	0,877 4	0,063 9	0,058 7	0,555 5	<b>15,98</b> 5
<b>0,05</b>	0,893	0,091 6	0,015 1	0,856 5	0,086 3	0,057 3	0,570 4	<b>16,40</b> 0
<b>0,075</b>	0,870	0,115 5	0,014 7	0,835 6	0,108 5	0,055 9	0,586 0	<b>16,83</b> 5
<b>0,1</b>	0,846	0,139 4	0,014 3	0,814 9	0,130 6	0,054 5	0,602 6	<b>17,28</b> 9
<b>0,125</b>	0,823	0,163 3	0,013	0,794 2	0,152 7	0,053 1	0,620 1	<b>17,76</b> 5
<b>0,2</b>	<b>0,752</b>	<b>0,235</b> 0	<b>0,012</b> 7	<b>0,732</b> 4	<b>0,218</b> 6	<b>0,049</b> 0	<b>0,679</b> 0	<b>19,34</b> 8

Характер зависимости стехиометрического соотношения от степени рециркуляции показан на рис. 2.

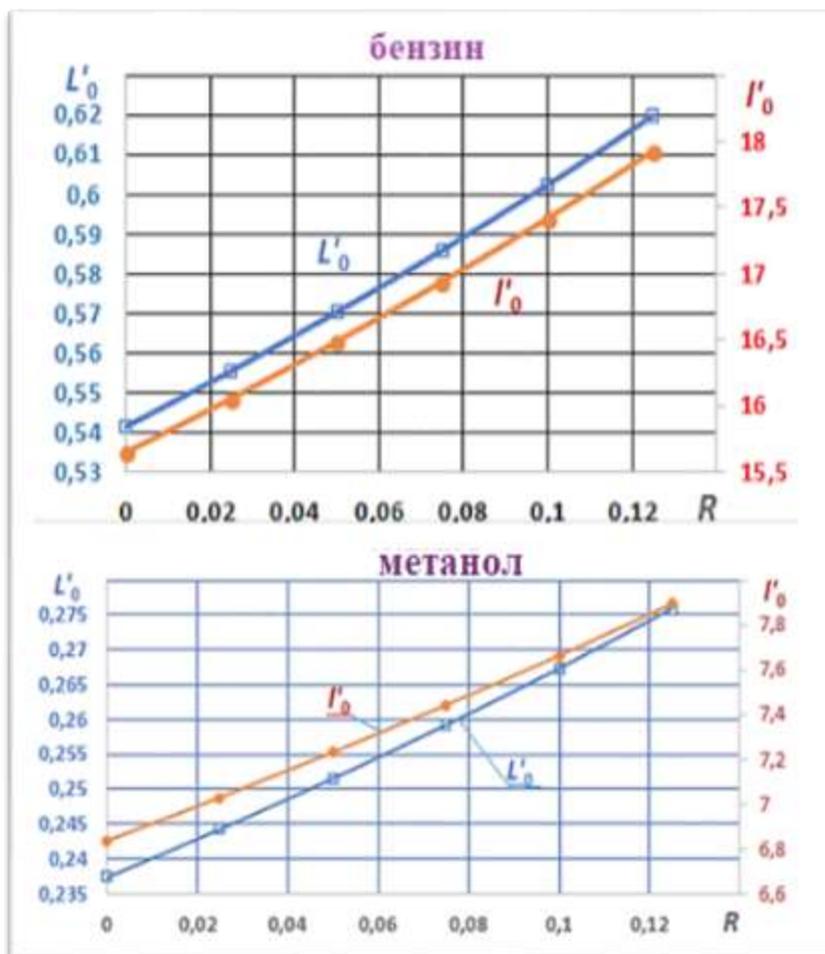


Рис. 2. Зависимость стехиометрического соотношения от степени рециркуляции

Рис. 3. позволяет оценить степень влияния изменяющейся величины стехиометрического соотношения на среднее индикаторное давление.

Расчет велся с использованием зависимости [6...8]  $p_i = \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \frac{H_u \eta_i}{l_0 \alpha} \sigma_B \rho_B^a$  при неизменных значениях  $\frac{\eta_i}{\alpha}$  и плотности воздуха  $\rho_B^a$ .

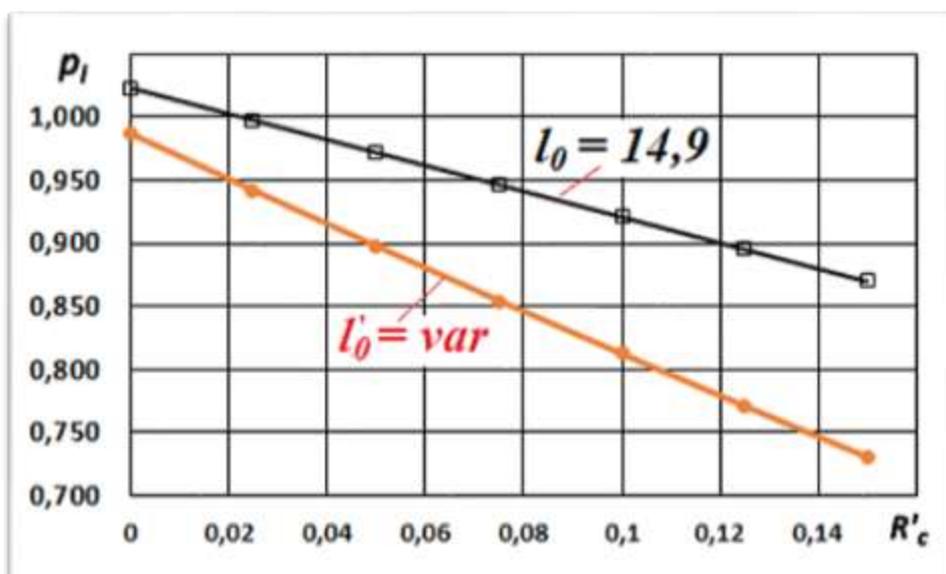


Рис. 3. Влияние учета степени рециркуляции на величину среднего индикаторного давления (топливо – бензин)

## Выводы

Сгорание топлива в условиях изменяющейся степени разбавления горючей смеси нейтральными продуктами сгорания сопровождается увеличением стехиометрического соотношения. Следствием уменьшения количества воздуха, частично вытесняемого из цилиндра нейтральными продуктами сгорания, является повышение минимального количества его смеси с нейтральными продуктами сгорания, необходимого для полного сгорания топлива, то есть – возрастание величины  $l_0$ . В свою очередь, увеличение  $l_0$  приводит к снижению отношения  $H_u/l_0$  в уравнении Стечкина и соответствующему понижению среднего индикаторного давления.

## Список источников

1. Матюхин, Л. М. Современные энергетические технологии : учебник / Л. М. Матюхин, Г. Г. Тер-Мкртчян. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "КноРус", 2023. – 398 с. – ISBN 978-5-406-10676-1. – EDN IZORIG.
2. Морозов, К.А. Токсичность автомобильных двигателей / К.А. Морозов. – Москва : «Легион-Автодата», 2001. – 80 с.

3. Lexikon Motorentechnik: Der Verbrennungsmotor von A–Z (ATZ-MTZ Fachbuch). – Germany: Vieweg+Teubner Verlag; SIEMENS, 2006. – 1096 p.
4. Двигатели внутреннего сгорания : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Автомобили и автомобильное хозяйство" направления подготовки дипломированных специалистов "Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования" : [в 3 кн.] / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина, М. Г. Шatroва. Том 1. – Издание 3-е, переработанное и исправленное. – Москва : Издательство "Высшая Школа", 2007. – 479 с. – ISBN 978-5-06-004142-2. – EDN QMJLNN.
5. Матюхин, Л. М. Влияние состава топлива и способа смесеобразования на показатели двигателя / Л. М. Матюхин // Труды НАМИ. – 2024. – № 4(299). – С. 36-44. – DOI 10.51187/0135-3152-2024-4-36-44. – EDN ECQMYR.
6. Matiukhin, L. Estimation of the degree of internal recirculation in Internal Combustion Engines / L. Matiukhin // Revista Facultad de Ingenieria. – 2023. – DOI 10.17533/udea.redin.20230213. – EDN GUQUTJ.
7. Матюхин, Л. М. Теория поршневых ДВС: прикладная термодинамика / Л. М. Матюхин. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "КноРус", 2021. – 284 с. – (Бакалавриат, магистратура). – ISBN 978-5-406-02041-8. – EDN FKYVWD.
8. Матюхин, Л. М. Влияние химического состава топлива на показатели поршневых ДВС / Л. М. Матюхин // Автомобильная промышленность. – 2024. – № 1. – С. 15-21. – EDN SNUAKZ.

### References

1. Matiukhin L.M., Ter-Mkrtichyan G.G. *Sovremennyye energeticheskiye tekhnologii* (Modern energy technologies), Moscow, Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Izdatel'stvo "KnoRus", 2023. 398 p.
2. Morozov K.A. *Toksichnost' avtomobil'nykh dvigateley* (Toxicity of automobile engines) Moscow, Legion-Autodata, 2001, 80 p.
3. Lexikon Motorentechnik: Der Verbrennungsmotor von A–Z (ATZ-MTZ Fachbuch), Germany, Vieweg+Teubner Verlag, SIEMENS, 2006, 1096 p
4. Lukanin V.N., Morozov K.A., Khachiyani A.S., Alekseev I.V., Golubkov L.N., Chernyak B.Ya., Trusov V.I., Kamfer G.M., Makhov V.Z., Prishvin S.A., Sinyavsky V.V., Matyukhin L.M., Nazarov N.I., Shatrov M.G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* (Internal Combustion Engines), Moscow, Vysshaya Shkola, Moscow. 2007, 479 p.
5. Matiukhin L.M. *Trudy NAMI*, 2024, no. 4(299), pp. 36-44.
6. Matiukhin L.M. *Revista Facultad de Ingenieria*, 2023, DOI 10.17533/udea.redin.20230213.

7. Matiukhin L.M. *Teoriya porshnevykh DVS: prikladnaya termodinamika* (Theory of piston internal combustion engines: applied thermodynamics), Moscow, otvetstvennost'yu "Izdatel'stvo "KnoRus", 2021, 284 p.
8. Matiukhin L.M. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2024, no. 1, pp. 15-21.

Рецензент: А.Ю. Дунин, д-р техн. наук, доц., МАДИ

### *Информация об авторе*

**Матюхин Леонид Михайлович**, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

### *Information about the author*

**Matiukhin Leonid M.**, Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

*Статья поступила в редакцию 19.02.2025; одобрена после рецензирования 03.03.2025; принята к публикации 25.03.2025.*

*The article was submitted 19.02.2025; approved after reviewing 03.03.2025; accepted for publication 25.03.2025.*