

Научная статья
УДК 621.43

Термодинамический анализ зависимости среднего давления цикла Отто от способа изменения степени сжатия

Леонид Михайлович Матюхин

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия
panam1@mail.ru

Аннотация. Выводы, базирующиеся на анализе идеальных термодинамических циклов, имеют универсальный характер и позволяют совершенствовать реальные силовые установки, включая и поршневые ДВС.

Так, известная зависимость эффективности термодинамического цикла Отто от степени сжатия ε экспериментально подтверждается повышением индикаторного КПД реальных двигателей с увеличением ε . Влияние степени сжатия на величину среднего давления цикла p_t не столь очевидно. В связи с этим представляет интерес и поиск аналитических выражений, определяющих зависимость среднего давления цикла от способа изменения величины степени сжатия.

Ключевые слова: поршневые ДВС с искровым зажиганием, среднее давление цикла, степень сжатия.

Для цитирования: Матюхин Л.М. Термодинамический анализ зависимости среднего давления цикла ОТТО от способа изменения степени сжатия // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №2 (36).

Original article

Thermodynamic analysis of the dependence of the average pressure of the Otto cycle on the method of changing the compression ratio

Leonid M. Matiukhin

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia
panam1@mail.ru

Abstract. The conclusions, based on the analysis of ideal thermodynamic cycles, are universal and allow to improve real power plants, including piston ICE. Thus, the well-known dependence of the efficiency of the thermodynamic Otto cycle on the compression ratio ε is experimentally confirmed by an increase in the indicator efficiency of real engines with an increase in the ε .

Keywords: piston ICE with spark ignition, average cycle pressure, compression ratio.

For citation: Matiukhin L.M. Thermodynamic analysis of the dependence of the average pressure of the OTTO cycle on the method of changing the compression ratio. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura.* 2023. №2 (36).

Введение

Вопрос экономии топлива в ДВС по-прежнему стоит очень остро. Активно развиваются различные методы улучшения экономичности двигателей, связанные с изменением рабочего объёма, отключением цилиндров и изменением степени сжатия [1]. На практике вопросы, связанные с необходимостью изменения степени сжатия, возникают как при оснащении двигателя (дизеля или, чаще, двигателя с искровым зажиганием) системой наддува, так и на этапе создания новой конструкции силового агрегата. А поскольку новый двигатель никогда не создается с нуля, то этот вопрос обычно решается внесением изменений во взятый за основу базовый вариант конструкции [2, 3]. При этом принимаются в расчет как зависимость эффективности двигателя от степени сжатия, так и влияние последствий изменения ϵ на механический КПД и на экологические характеристики.

Оснащения атмосферного ДсИЗ системой наддува обычно сопровождается необходимостью понижения степени сжатия базового двигателя. Как следует из известной зависимости [3, 4]

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_1} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}, \quad (1)$$

термический КПД термодинамического цикла Отто при неизменном значении показателя адиабаты k в этом случае должен понижаться. Зависимость (1) однозначна, и способ изменения степени сжатия никак не влияет на значение η_t .

Из выражения (1) также следует, что каждому значению степени сжатия ϵ в случае постоянства количества подводимой теплоты q_1 должно соответствовать одно и то же значения работы цикла $l_{ц}$. Действительно,

$$l_{ц} = q_1 \eta_t, \quad (2)$$

и при одинаковых значениях показателя k термический КПД однозначно определяется величиной степени сжатия. Таким образом, для фиксированных значений степени сжатия ε и количества подводимой теплоты q_1 работа цикла $l_{ц}$ остается одинаковой вне зависимости от того, каким образом изменялась величина ε .

Но в соответствии с известной из термодинамики зависимостью [3, 4]

$$p_t = \frac{p_a \eta_t \varepsilon^{(k-1)}}{(\varepsilon-1)(k-1)} (\lambda - 1) \quad (3)$$

значение среднего давления цикла зависит не только от степени сжатия ε и показателя адиабаты k . Как следует из приведенного выражения, величина p_t возрастает или уменьшается также с увеличением или уменьшением начального давления цикла p_a и степени повышения давления λ в изохорном процессе подвода теплоты. Так, на рис. 1 приведено сопоставление трех термодинамических циклов Отто, в которых начальные условия (параметры точки «а») одинаковы.

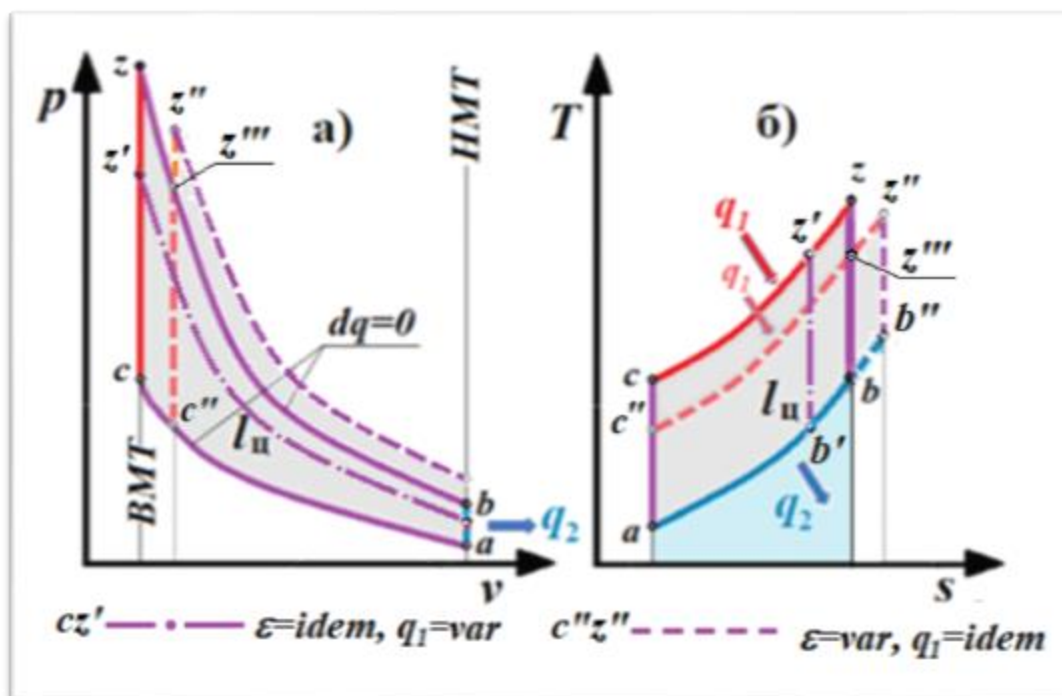


Рис. 1. Сопоставление циклов Отто при одинаковых исходных параметрах для различных степеней сжатия и степеней повышения давления:

а) в $p-v$ -координатах; б) в $T-s$ -координатах

Исходный цикл изображается сплошными линиями. Уменьшение количества подводимой теплоты в изохорном процессе cz сопровождается падением температуры T_z в конце процесса теплоподвода до значения $T_{z'}$. В этом случае при остающейся постоянной величине термического КПД уменьшается работа цикла $l_{ц}$, пропорциональная его площади. Следовательно, в рассматриваемом случае $(v_a - v_c) = idem$ должна снижаться и определяемая выражением

$$p_t = \frac{l_{ц}}{(v_a - v_c)}, \quad (4)$$

величина среднего давления. В реальном двигателе стоящая в знаменателе разность $(v_a - v_c)$ соответствует рабочему объему V_h , а потому значение среднего давления цикла p_t является функцией как работы цикла $L_{ц}$, так и объема V_h .

Понижение степени сжатия в случае поддержания постоянным значения степени повышения давления ($\lambda = idem$) должно сопровождаться уменьшением количества подводимой теплоты q_1 . Теплоподводу в этом случае соответствует изохора $c''z'''$. Как следует из рис. 1, б), если подводимая теплота в исходном варианте определяется площадью по линии cz , то при снижении ε значение q_1 пропорционально уже меньшей площади под линией $c''z'''$.

При оборудовании реального ПДВС с искровым зажиганием системой наддува ввиду повышения исходных значений давления и температуры (и, следовательно, их значений по завершении процесса сжатия) обычно возникает необходимость в снижении степени сжатия [2, 6-11]. Поскольку изменение начальных параметров может быть различным, но – в любом случае – начальное давление не снижается, приводимый ниже анализ относится к варианту $p_a = item$. В этом случае значение удельного объема v_a определяется температурой T_a .

Однако целью наддува является форсирование двигателя, а потому значение количества подводимой теплоты q_1 (как и p_a) при снижении степени сжатия по крайней мере не уменьшается. Варианту $q_1 = idem$ на

рис. 1 соответствует цикл с подводим теплоты по линии $c''z''$. Из сопоставления этого цикла с вариантом подвода теплоты $\lambda = idem$ (теплота подводится по линии $c''z'''$, а последующее расширение протекает по линии $z'''b$) можно видеть, что в случае $q_1 = idem$ работа цикла (его площадь на графике) превосходит таковую при $\lambda = idem$. Также в этом случае уменьшение степени сжатия сопровождается прогрессирующим возрастанием степени повышения давления λ . Это следует также и из закона Шарля, поскольку в изохорном процессе

$$\lambda = \frac{p_z}{p_c} = \frac{T_z}{T_c},$$

где $T_z = T_c + \frac{q_{cz}}{c_v}$. Следовательно, $\lambda = 1 + \frac{q_{cz}}{c_v T_c} = 1 + \frac{q_{cz}}{c_v T_a \epsilon^{k-1}}$ и при $q_{cz} = idem$ степень повышения давления должна возрасть при уменьшении температуры T_c , вызываемом понижением степени сжатия.

В соответствии с выражением (2) при любом способе изменения степени сжатия в случае неизменного значения количества подводимой теплоты q_1 каждому значению ϵ должно соответствовать одно и то же значение работы цикла $l_{ц} = q_1 \eta_t$. В результате величина среднего давления цикла будет определяться стоящей в знаменателе зависимости (4) разностью $(v_a - v_c)$. Поскольку в общем случае изменение степени сжатия может осуществляться как при неизменной величине рабочего объема, так и при его увеличении/уменьшении, представляется целесообразным оценить характер влияния V_h на среднее давление цикла для разных способов снижения ϵ . С учетом того обстоятельства, что при фиксированных значениях показателя адиабаты, начального давления p_a и степени повышения давления λ величина p_t однозначно определяется степенью сжатия, рассмотрение зависимости $p_t = f(\epsilon)$ при $\lambda = idem$ не представляет интереса. Действительно, в этом случае снижение степени сжатия *всегда*, вне зависимости от того, как именно изменялась величина ϵ , сопровождается уменьшением термического КПД и среднего давления цикла, а повышение ϵ – его увеличением. В связи с этим **все последующие выкладки относятся к анализу влияния способа изменения степени сжатия на среднее давление**

цикла лишь при неизменном значении количества подводимой теплоты q_1 . При этом величина степени повышения давления λ является функцией подводимой теплоты q_1 и степени сжатия [4, 5].

Учитывая, что целое (в рассматриваемом случае полный объем цилиндра – $V_a = V_h + V_c$) представляет собой сумму частей (рабочего объема и объема камеры сгорания), при фиксированном значении одного из объемов увеличение/уменьшение любого из двух оставшихся должно сопровождаться соответствующим уменьшением/увеличением третьего (рис.2). Таким образом, изменять значение степени сжатия, определяемой соотношением полного объема цилиндра и объема камеры сгорания, можно при фиксированном значении одного из трех объемов – V_a , V_h или V_c . Примеры вариантов изменения величины ϵ приведены на рис. 2.

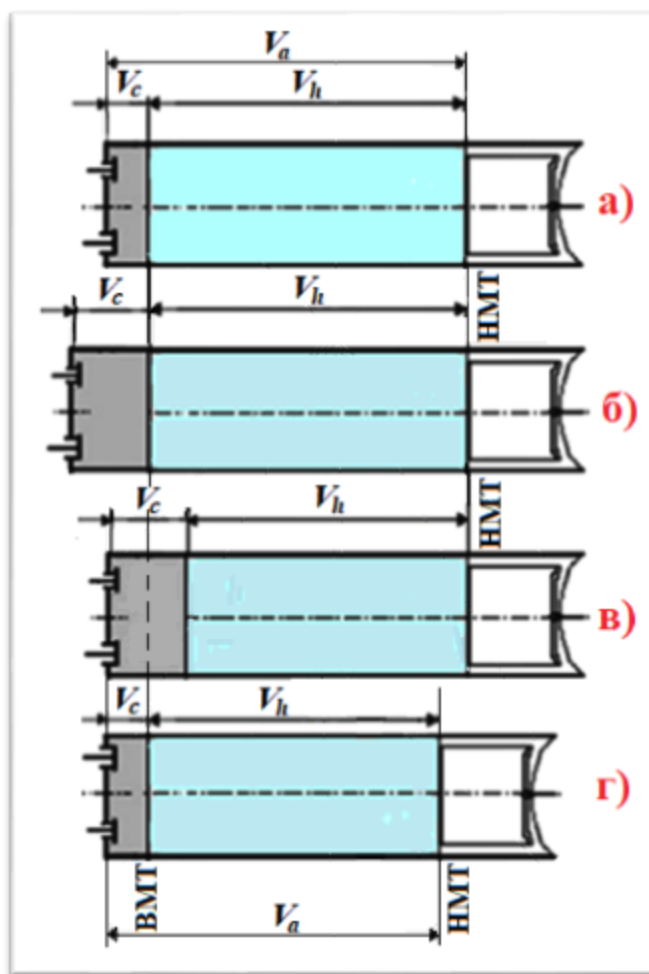


Рис. 2. Примеры понижения степени сжатия: а) базовый вариант, исходная степень сжатия; б) увеличен объем КС при $V_h = idem$ в) увеличен объем КС при $V_a = idem$ г) уменьшен рабочий объем цилиндра при $V_c = idem$

Для нахождения связи между способом изменения степени сжатия и величиной среднего давления цикла воспользуемся соотношением (4) и

подставим в него из (1) $\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$:

$$p_t = \frac{q_1 \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\right)}{v_h}, \text{ где } v_h = v_a - v_c.$$

Окончательно имеем функциональную зависимость среднего давления от степени сжатия при неизменном значении рабочего объема

$$p_t = \frac{q_1 (\varepsilon^{k-1} - 1)}{v_h \varepsilon^{k-1}}.$$

Преобразуя это выражение, можно найти аналогичные зависимости p_t от ε для постоянного значения объема КС ($v_c = idem$)

$$p_t = \frac{q_1 (\varepsilon^{k-1} - 1)}{(v_a - v_c) \varepsilon^{k-1}} = \frac{q_1 (\varepsilon^{k-1} - 1)}{v_c (\varepsilon^k - \varepsilon^{k-1})}$$

и варианта $v_a = idem$

$$p_t = \frac{q_1 (\varepsilon^{k-1} - 1)}{v_a \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) \varepsilon^{k-1}} = \frac{q_1 (\varepsilon^{k-1} - 1)}{v_a (\varepsilon^{k-1} - \varepsilon^{k-2})}.$$

Графическое представление искомого влияния степени сжатия на величину среднего давления цикла при фиксированном значении одного из объемов приведено на рис. 3.

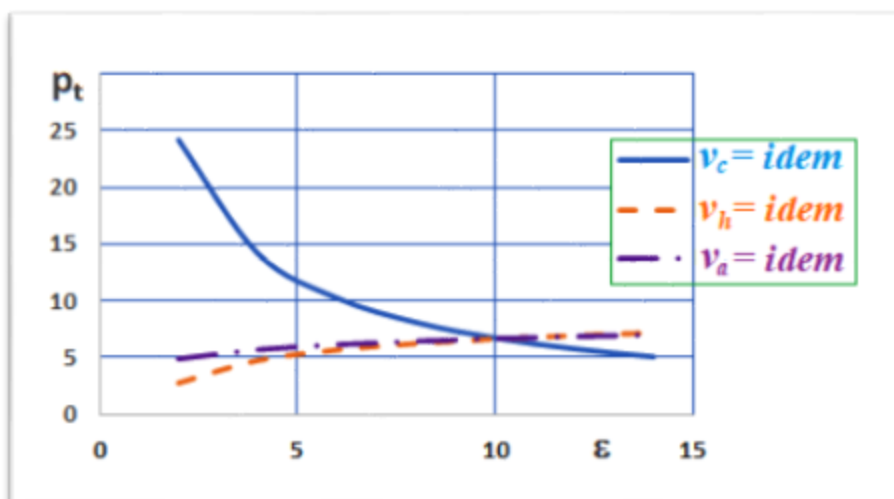


Рис. 3. Зависимость среднего давления цикла Отто от способа изменения степени сжатия

Как следует из приведенных графиков, сохранение неизменным хода поршня ($v_h = idem$) при увеличении объемов КС и, следовательно, полного объема цилиндра v_a (вариант б) на рис. 2), при снижении степени сжатия сопровождается снижением среднего давления цикла Отто, а при повышении ε среднее давление цикла возрастает.

Если же зафиксирован полный объем цилиндра, а степень сжатия изменяется в результате варьирования величины v_h (вариант в) на рис. 2), то при сохранении характера зависимости $p_t = f(\varepsilon)$ влияние степени сжатия на среднее давление цикла оказывается менее существенным.

В случае постоянного значения объема КС и изменения ε варьированием объема v_h (и, как это следует из рис. 2г, также и полного объема v_a) характер зависимости $p_t = f(\varepsilon)$ кардинально изменяется. В этом случае снижение степени сжатия при постоянном значении v_c приводит к резкому увеличению среднего давления цикла, а повышение ε сопровождается падением p_t . Причина – в постоянной для каждого значения ε величине числителя в выражении

$$p_t = \frac{l_{\text{ц}}}{v_h} = \frac{q_1 \eta_t}{v_h}$$

и в изменении рабочего объема v_h .

Чрезмерное повышение среднего давления цикла сопровождается ростом механических потерь, а потому нежелательно. В связи с этим выбор способа изменения степени сжатия должен производиться исходя из конкретных условий с учетом допустимых значений механических потерь [12, 13].

Представляя собой соотношение полного объема цилиндра и объема камеры сгорания, степень сжатия является величиной, обратной доле объема КС в полном объеме цилиндра.

Изменение соотношения объемов V_c и V_h в полном объеме цилиндра не может не сказываться на наполнении и составе рабочей смеси.

Парциальный объем остающихся в КС продуктов сгорания в рабочей смеси определяется выражением [14] $V_r = V_c \frac{p_r T_a}{p_a T_r} \varphi_s$, а их доля – $\sigma_r = \frac{\varphi_s p_r T_a}{\varepsilon p_a T_r}$,

где φ_s – коэффициент очистки.

Как следует из этих зависимостей и из рис. 2, с возрастанием доли объема КС в полном объеме цилиндра (и при уменьшении степени сжатия ε) парциальный объем V_r остаточных газов и их доля σ_r в рабочей смеси при сопоставимых условиях возрастают. Одновременно увеличивается и коэффициент ОГ

$$\gamma_r = \frac{p_r T_a \varphi_s}{(\varepsilon p_a T_r - p_r T_a \varphi_s)}.$$

Увеличение доли ОГ сопровождается снижением доли свежего заряда в заполняющей полный объем цилиндра рабочей смеси

$$\sigma_{сз} = \left(\frac{\varepsilon p_a T_r - \varphi_s p_r T_a}{\varepsilon p_a T_r} \right)$$

и его парциального объема $V_{сз} = V_c \left(\frac{\varepsilon p_a T_r - \varphi_s p_r T_a}{p_a T_r} \right)$, то есть – снижением наполнения. В условиях реального двигателя это обстоятельство, в свою очередь, должно приводить к уменьшению среднего индикаторного давления.

Подобное изменение состава рабочей смеси, сопровождающееся увеличением доли ОГ в рабочей смеси в условиях реального двигателя должно сопровождаться снижением максимальных температур цикла и улучшением его экологических характеристик [3, 15].

Выводы

1. При сохранении постоянным количества подводимой теплоты q_1 каждому значению ε вне зависимости от способа изменения степени сжатия соответствует свое собственное значение среднего давления цикла.
2. Не влияя на термический КПД и работу цикла Отто, способ изменения степени сжатия при $q_1 = idem$ сказывается на значении среднего давления цикла.

3. Снижение степени сжатия при сохранении неизменным объема КС при оснащении двигателя системой наддува может сопровождаться увеличением среднего давления цикла, что приведет к росту механических потерь.

4. С учетом увеличения количества подводимой теплоты q_1 при оснащении реального двигателя системой наддува во избежание нежелательного возрастания механических потерь целесообразно снижение ε при сохранении неизменными значения объема V_h (рис. 2б) или V_a (рис. 2в).

Список источников

1. Патрахальцев, Н.Н. Возможности повышения экономичности режимов малых нагрузок двигателя ВАЗ-2118 / Н.Н. Патрахальцев, И.А. Петруня, Р.О. Камышников, Э.А. Савастенко // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 4. – С. 9-10.
2. Патрахальцев, Н.Н. Форсирование двигателей внутреннего сгорания наддувом / Н.Н. Патрахальцев, А.А. Савастенко. – Москва: Легион-Автодата, 2019. – 170 с.
3. Автомобильные двигатели: учебник / М.Г. Шатров К.А. Морозов, Алексеев И.В. и др.; под ред. М.Г. Шатрова. – Москва: Издательский центр "Академия", 2010. – 464 с. – ISBN 978-5-7695-5408-6.
4. Матюхин, Л.М. Теплотехника и теплотехнические устройства автомобиля: учебник / Л.М. Матюхин. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "КноРус", 2022. – 360 с. – ISBN 978-5-406-08464-9.
5. Теплотехника: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям направления подготовки "Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования" / М. Г. Шатров, И. Е. Иванов, С. А. Пришвин [и др.]. – Москва: Издательский центр "Академия", 2011. – 288 с. – ISBN 978-5-7695-6860-2.
6. Кутенев, В.Ф. О регулировании рабочего объема и степени сжатия в дизеле / В.Ф. Кутенев, Г.Г. Тер-Мкртичян // Труды НАМИ. – 1998. – № 5. – С. 57-72.
7. Тер-Мкртичян, Г.Г. Сравнение термодинамических циклов поршневых двигателей / Г.Г. Тер-Мкртичян // Труды НАМИ. – 1978. – № 172. – С. 31-36.
8. Матюхин, Л.М. Современные энергетические технологии: учебник / Л.М. Матюхин, Г.Г. Тер-Мкртичян. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "КноРус", 2023. – 398 с. – ISBN 978-5-406-10676-1.
9. Зленко, М.А. Некоторые вопросы создания бензинового двигателя с регулируемой степенью сжатия / М.А. Зленко, В.Ф. Кутенев, Г.Г. Тер-Мкртичян // Труды НАМИ. – 1999. – № 224. – С. 21-38.

10. Тер-Мкртчян, Г.Г. Конвертация дизеля в газовый двигатель с уменьшением фактической степени сжатия / Г.Г. Тер-Мкртчян // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 211.
11. Тер-Мкртчян, Г.Г. Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными рабочими циклами: учебное пособие / Г.Г. Тер-Мкртчян. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2015. – 80 с. – ISBN 978-5-7962-0202-9.
12. Тер-Мкртчян, Г.Г. Экспериментально-аналитическое исследование механических потерь в двигателе внутреннего сгорания / Г.Г. Тер-Мкртчян // Труды НАМИ. – 2002. – № 230. – С. 86-98.
13. Тер-Мкртчян, Г.Г. Даунсайзинг в двигателях ВАЗ с продолженным расширением рабочего тела / Г.Г. Тер-Мкртчян // Автомобильная промышленность. – 2015. – № 11. – С. 12-16.
14. Матюхин, Л.М. Теория поршневых ДВС: прикладная термодинамика / Л.М. Матюхин. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "КноРус", 2021. – 284 с. – ISBN 978-5-406-02041-8.
15. Морозов, К.А. Токсичность автомобильных двигателей / К.А. Морозов – Москва: Легион-Автodata, 2001. – 80 с.

References

1. Patrakhaltsev N.N., Petrunya I.A., Kamyshnikov R.O., Savastenko E.A. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2014, no. 4, pp. 9-10.
2. Patrakhaltsev N.N., Savastenko A.A. *Forsirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Forcing internal combustion engines by supercharging), Moscow, Legion-Avtodata, 2019, 170 p.
3. Shatrov M.G., Morozov K.A., Alexeev I.V. and etc.; ed. M.G. Shatrov. *Avtotraktorniye dvigateli* (Automobile engines), Moscow, Izdatel'skiy tsentr "Akademiya", 2010, 464 p.
4. Matiukhin L.M. *Teplotekhnika i teplotekhnicheskie ustroystva avtomobilya* (Heat engineering and heat engineering devices of the car), Moscow, Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Izdatel'stvo "KnoRus", 2021, 360 p.
5. Shatrov M.G. Ivanov I.E., Prishvin S.A. and oth. *Teplotekhnika* (Heat engineering), Moscow, Izdatel'skiy tsentr "Akademiya", 2011, 288 p.
6. Kutenev V.F., Ter-Mkrtych'yan G.G. *Trudy NAMI*, 1998, no. 5, pp.57-72.
7. Ter-Mkrtych'yan G.G. *Trudy NAMI*, 1978, no. 172, pp. 31-36.
8. Matiukhin L.M., Ter-Mkrtych'yan G.G. *Sovremennyye energeticheskie ustanovki* (Modern energy technologies), Moscow, Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Izdatel'stvo "KnoRus", 2023, 398 p.

9. Zlenko M.A., Kuteneov V.F., Ter-Mkrtich'yan G.G., *Trudy NAMI*, 1999, no. 224, pp. 21-38.
10. Ter-Mkrtich'yan G.G. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 5, pp. 211..
11. Ter-Mkrtich'yan G.G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya s netraditsionnymi rabochimi tsiklami* (Internal combustion engines with non-radion operating cycles), Moscow, Moskovskiy avtomobil'no-dorozhnyy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet (MADI), 2015, 80 p.
12. Ter-Mkrtich'yan G.G. *Trudy NAMI*, 2002, no. 230, pp. 86-98.
13. Ter-Mkrtich'yan G.G. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, no. 11, 2015, pp. 12-16.
14. Matiukhin L.M. *Teoriya porshnevykh DVS: prikladnaya termodinamika* (Theory of piston internal combustion engines: applied thermodynamics), Moscow, Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Izdatel'stvo "KnoRus", 2021, 284 p.
15. Morozov K.A. *Toksichnost' avtomobil'nykh dvigateley* (Toxicity of automobile engines), Moscow, Legion-Avtodata, 2019, 80 p.

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

Информация об авторе

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

Information about the authors

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

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена после рецензирования 25.04.2023; принята к публикации 15.05.2023.

The article was submitted 18.04.2023; approved after reviewing 25.04.2023; accepted for publication 15.05.2023.