ISSN 1992-6502 (Print) Вестник УГАТУ ISSN 2225-2789 (Online)
2014. Т. 18, № 2 (63). С. 19–24 http://journal.ugatu.ac.ru

УДК 621.43.038.12

РАЦИОНАЛЬНАЯ СТЕПЕНЬ СЖАТИЯ ДВИГАТЕЛЯ С УНИФИЦИРОВАННЫМ РАБОЧИМ ПРОЦЕССОМ

М. Д. Гарипов[1], Р. Ю. Сакулин[2], П. Б. Яковлев[3]

[1] garry76@mail.ru, [2] laminar_burn@mail.ru, [3] yak21@live.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 29.08.2013

Аннотация. Приведены результаты расчетного исследования влияния степени сжатия на эффективные показатели четырехтактного дизеля YANMAR L-100C. Определено значение наиболее приемлемой для исследуемого двигателя степени сжатия.

Ключевые слова: степень сжатия; поршневой ДВС; эффективный КПД; коэффициент избытка воздуха.

Степень сжатия является определяющей характеристикой для обоих современных типов поршневых двигателей: как бензиновых, так и дизелей. Верхняя граница диапазона используемых степеней сжатия для двигателей с принудительным воспламенением соответствует ≈ 12, нижняя граница для двигателей с воспламенением от сжатия в безнаддувном варианте ≈ 16.

В двигателях с принудительным воспламенением ограничение максимальной степени сжатия продиктовано тем, что к моменту воспламенения в цилиндре находится уже подготовленная гомогенная смесь, в которой при повышенных степенях сжатия возникает детонация.

Двигатели с воспламенением от сжатия, наоборот, вынуждены использовать высокие степени сжатия для обеспечения воспламенения топлива. Это приводит к повышению максимального давления, что в свою очередь ведет к увеличению нагрузки на детали цилиндропоршневой группы и КШМ. В итоге такая организация рабочего процесса приводит к повышению механических потерь и увеличению массы двигателя.

Таким образом, как бензиновые двигатели, так и дизели вынуждены работать в нерациональных (с точки зрения совмещения высокого эффективного КПД и низкой удельной массы) диапазонах степеней сжатия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рабочий процесс, позволяющий в широком диапазоне степеней сжатия организовать эффективное бездетонационное сгорание различных топлив, в том числе низкооктановых (дизельное топливо, керосин, низкооктановые бензины), разработан на кафедре ДВС Уфимского государственного авиационного технического университета [1]. Еще одним преимуществом этого рабочего процесса является качественное регулирование нагрузки.

В основе этого рабочего процесса, называемого унифицированным, лежит принцип искрового воспламенения богатой топливовоздушной струи, впрыскиваемой вблизи верхней мертвой точки. В результате сгорания части топливовоздушной смеси, подожженной искрой, в камере сгорания повышаются давление и температура. Это ведет к тому, что в несгоревшей части происходит (в случае применения низкооктановых топлив) многоочаговое воспламенение и сгорание, характерное для рабочего процесса дизельного двигателя. Управление унифицированным рабочим процессом возможно за счет изменения угла опережения впрыска и момента подачи искры [1].

Поскольку в унифицированном рабочем процессе устраняются ограничения по степени сжатия, возникает возможность выбора ее значения, рационального с точки зрения объединения лучших свойств двух современных типов двигателей: топливной экономичности дизеля и удельной мощности бензинового двигателя.

В качестве объекта исследования был выбран четырехтактный одноцилиндровый дизель YANMAR L-100C (степень сжатия в

серийном исполнении составляет 19,3), поскольку на базе этого двигателя планируется проводить часть экспериментальных исследований унифицированного рабочего процесса.

Целью работы является определение рациональной степени сжатия исследуемого дизеля.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты осуществлялись в системе имитационного моделирования ДВС «Альбея», разработанной на кафедре ДВС Уфимского государственного авиационного технического университета. Эта система позволяет определить индикаторные и эффективные показатели двигателя [2–4].

Для подтверждения адекватности модели были проведены расчеты параметров цикла и эффективных показателей двигателя YANMAR L-100C, которые были сопоставлены с данными экспериментального исследования. Условная продолжительность сгорания (ϕ_z) была определена из экспериментальных данных и составила 89 градусов угла поворота коленчатого вала (ГУПКВ). Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных кривых давления и скорости нарастания давления в цилиндре было получено при значении показателя характера горения m = 0,1. Результаты сопоставления представлены на рис. 1 и 2.

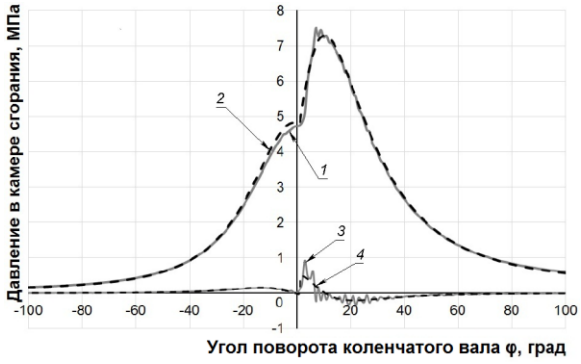

Рис. 1. Сопоставление расчетной и экспериментальной кривых давления и скорости нарастания давления ($dP/d\varphi$) в цилиндре двигателя YANMAR L-100C: *1* – давление в цилиндре, эксперимент; *2* – давление в цилиндре, расчет; *3* – скорость нарастания давления ($dP/d\varphi$), эксперимент; *4* – скорость нарастания давления ($dP/d\varphi$), расчет

Угол начала теплоподвода при каждой степени сжатия выбирался из условия получения максимального эффективного КПД.

На первом этапе влияние степени сжатия на показатели описываемого двигателя исследовалось с характеристиками тепловыделения исходного двигателя. При этом предполагалось, что показатель характера сгорания (m = 0,1) и продолжительность сгорания (ϕ_z = 89) при изменении степени сжатия остаются неизменными.

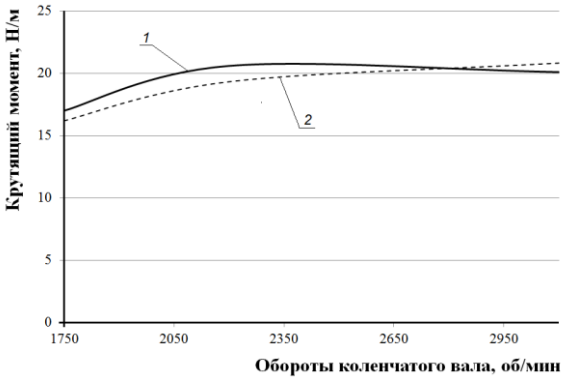

Рис. 2. Сопоставление расчетной и экспериментальной внешних скоростных характеристик двигателя YANMAR L-100C: *1* – эксперимент; *2* – расчет

Унифицированный рабочий процесс позволяет использовать различные топлива и, соответственно, различные режимы выгорания (от характеристик, соответствующих дизелям, до характеристик, соответствующих бензиновым двигателям) [1]. Поэтому при неизменной продолжительности сгорания (ϕ_z = 89) были проведены исследования с показателем характера горения m = 3, как наиболее типичным для бензиновых двигателей.

Кроме того, рассматривалось влияние степени сжатия на показатели двигателя с более совершенной характеристикой выгорания. Известно, что при одинаковых степенях сжатия наиболее эффективен цикл с изохорным подводом теплоты. Однако на практике сокращать продолжительность меньше 40–50 градусов УПВК нецелесообразно ввиду сильного роста механической и тепловой нагрузки на двигатель [5]. Поэтому продолжительность сгорания φ_z примем равной 50 ГУПКВ. Также, как и в предыдущем случае, рассматривались два показателя характера сгорания (m = 0,1 и m = 3).

Расчеты проводились при частоте вращения коленчатого вала, равной 3100 об/мин, что соответствует режиму максимальной мощности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 представлены расчетные зависимости эффективного КПД от степени сжатия исследуемого двигателя при различных коэффициентах избытка воздуха. Условная продолжительность сгорания и показатель характера горения здесь соответствуют стандартному ис-

полнению исследуемого двигателя (ϕ_z = 89 ГУПКВ, m = 0,1).

Понижение степени сжатия исследуемого двигателя с 19,3 до 15 не вызывает понижения эффективного КПД цикла, а, напротив, ведет к его увеличению. Так на полной нагрузке (α = 1,36) отмечается рост эффективного КПД цикла на 6,1 %. С увеличением коэффициента избытка воздуха рост эффективного КПД цикла усиливается: для α = 2, α = 3 и α = 4 увеличение составляет 10,5, 19,8 и 34,6 % соответственно.

В случае понижения степени сжатия с 19,3 до значения 10 при α = 1,36 также наблюдается рост эффективного КПД на 6,4 %. На частичных нагрузках тенденция возрастания эффективного КПД сохраняется (увеличение на 13,5, 28,0 и 50,8 % для α = 2, α = 3 и α = 4 соответственно).

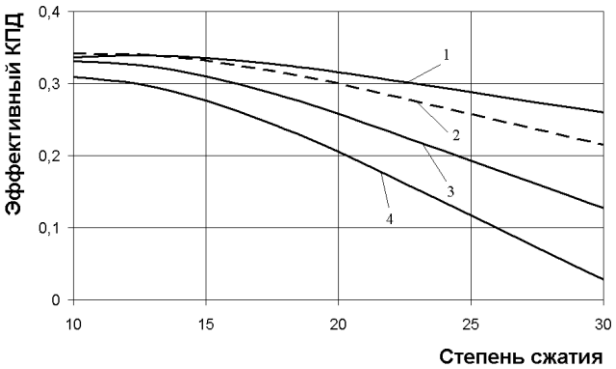

Рис. 3. Зависимость эффективного КПД от степени сжатия при различных коэффициентах избытка воздуха (ϕ_z = 89 град. УПКВ, m = 0,1): α = 1,36 (*1*); 2 (*2*); 3 (*3*); 4 (*4*)

На рис. 4 показатель характера горения соответствует наиболее типичному для бензиновых двигателей значению (m = 3).

Некоторое повышение общего уровня эффективного КПД (на 2–3 % на высоких нагрузках и до 10 % на малых) не повлияло на характер зависимости эффективного КПД от степени сжатия двигателя. Так, при α = 1,36 рост эффективного КПД при понижении степени сжатия с 19,3 до 15 составил 6,1 %, а при понижении с 19,3 до 10 – 6,4 %. Для частичных нагрузок характер зависимости также не изменился: рост на 10,2, 18,4 и 30,5 % для снижения с 19,3 до 15 и 12,8, 25,1 и 43,5 % для снижения с 19,3 до 10 для α = 2, α = 3 и α = 4 соответственно.

При переходе на значения продолжительности сгорания, равной 50 ГУПВК, зависимость эффективного КПД от степени сжатия исследуемого двигателя продемонстрировала характер, аналогичный приведенным выше расчетам (рис. 5, 7).

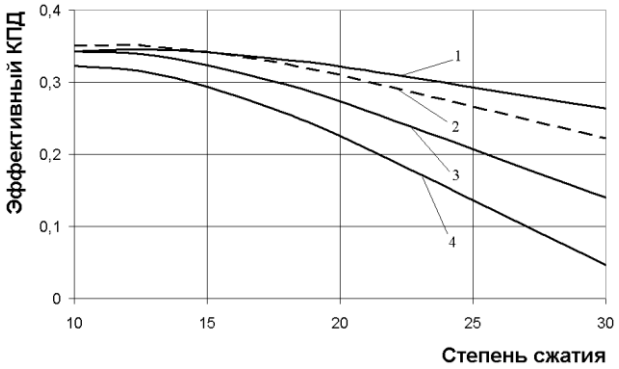

Рис. 4. Зависимость эффективного КПД от степени сжатия при различных коэффициентах избытка воздуха (ϕ_z = 89 ГУПКВ, m = 3): α = 1,36 (*1*); 2 (*2*); 3 (*3*); 4 (*4*)

Как показано на рис. 5, понижение степени сжатия исследуемого двигателя с 19,3 до 15 аналогично не вызывает понижения эффективного КПД цикла, а, напротив, ведет к его увеличению. Так, на полной нагрузке (α = 1,36) отмечается рост эффективного КПД цикла на 4,1 %. С увеличением коэффициента избытка воздуха рост эффективного КПД цикла усиливается: для α = 2, α = 3 и α = 4 увеличение составляет 7,5, 14,6 и 24,7 % соответственно.

В случае понижения степени сжатия с 19,3 до значения 10 при α = 1,36 также наблюдается рост эффективного КПД на 2,4 %. На частичных нагрузках тенденция сохраняется (увеличение на 7,9, 18,7 и 33,3 % для α = 2, α = 3 и α = 4 соответственно).

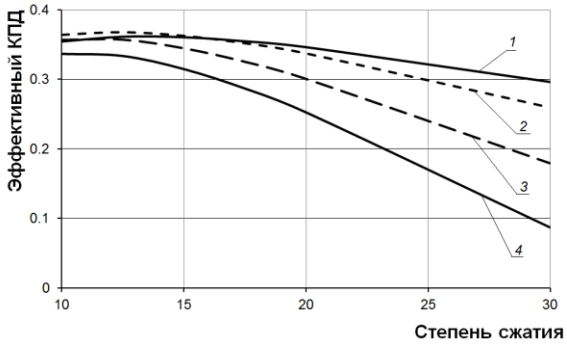

Рис. 5. Зависимость эффективного КПД от степени сжатия при различных коэффициентах избытка воздуха (ϕ_z = 50 ГУПКВ., m = 3): α = 1,36 (*1*); 2 (*2*); 3 (*3*); 4 (*4*)

На рис. 6 показаны регулировочные характеристики эффективного КПД двигателя от угла начала теплоподвода для коэффициента избытка воздуха α = 1,36 и характеристиках сгорания m = 3, ϕ_z = 50.

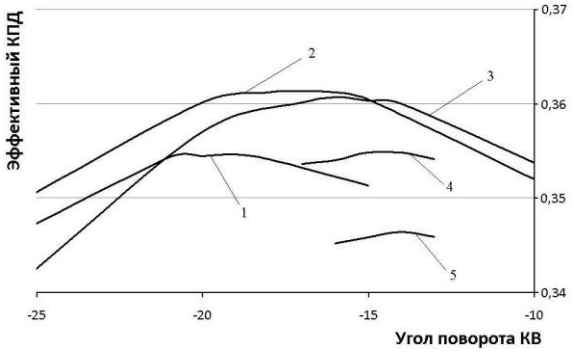

Рис. 6. Регулировочные характеристики эффективного КПД в зависимости от угла начала теплоподвода (α = 1,36, m = 3, ϕ_z = 50): ε = 10 (*1*); 12,5 (*2*); 15 (*3*); 17,5 (*4*); 20 (*5*)

Аналогичная картина наблюдается и в случае значения показателя характера горения m = 0,1 (ϕ_z = 50 ГУПКВ), но сопровождается некоторым снижением общего уровня эффективного КПД (на 3–4 % на высоких нагрузках и до 12 % на малых) (рис. 7).

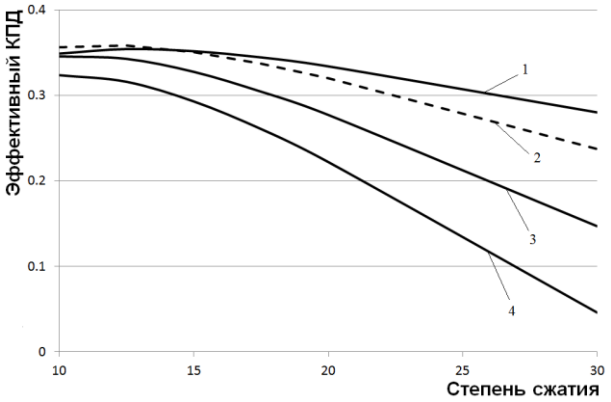

Рис. 7. Зависимость эффективного КПД от степени сжатия при различных коэффициентах избытка воздуха (ϕ_z = 50 ГУПКВ, m = 0,1): α = 1,36 (*1*); 2 (*2*); 3 (*3*); 4 (*4*)

При α = 1,36 рост эффективного КПД при понижении степени сжатия с 19,3 до 15 составил 5,3 %, а при понижении с 19,3 до 10 – 4,5 %. Для частичных нагрузок характер зависимости не изменяется: рост на 9,4, 18,2 и 31,9 % для снижения с 19,3 до 15 и 11,2, 24,7 и 45,8 % для снижения с 19,3 до 10 для α = 2, α = 3 и α = 4 соответственно.

Падение эффективного КПД двигателя с повышением степени сжатия выше определенного значения обуславливается двумя основными причинами:

- увеличением механических потерь;
- увеличением отклонения от изохорного процесса подвода теплоты (при одинаковой продолжительности теплоподвода).

Рост механических потерь с увеличением степени сжатия (рис. 8) объясняется ростом давления газов в цилиндре двигателя (рис. 9). При увеличении коэффициента избытка воздуха относительная доля механических потерь возрастает, соответственно снижается значение степени сжатия, соответствующее максимальному эффективному КПД.

Сущность влияния отклонения от изохорного подвода теплоты на эффективный КПД двигателя можно легко описать, если ввести условную величину:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{V_h + V_c}{V_\varphi},$$

где

$$V_\varphi = \Delta V_h + V_c;$$

ΔV_h – часть рабочего объема двигателя, на которую распространяется процесс теплоподвода. При изохорном подводе теплоты (ΔV_h = 0) это выражение переходит в известное выражение для степени сжатия (расширения):

$$\varepsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c}.$$

Отношение этих величин характеризует отклонение от изохорности подвода теплоты в зависимости от объема камеры сгорания:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_\varphi} = \frac{\Delta V_h}{V_c} + 1.$$

Видно, что с уменьшением объема камеры сгорания, а следовательно, с увеличением степени сжатия, отклонение от изохорности при постоянной продолжительности теплоподвода увеличивается. Как следствие, с повышением степени сжатия (при неизменной продолжительности сгорания) индикаторный КПД будет расти гораздо медленнее термического и, при определенных условиях, даже снижаться (рис. 8). По этой же причине практически не увеличиваются максимальные значения температуры цикла (рис. 9).

Таким образом, в условиях исследуемого дизеля и при частоте вращения n = 3100 об/мин, варьирование степени сжатия в диапазоне от 10 до 20 слабо влияет на эффективный КПД двигателя на полной нагрузке. На частичных нагрузках происходит значительное повышение КПД двигателя при переходе в диапазон ≈ 10–15.

Если учесть, что транспортный двигатель эксплуатируется на частичных режимах (меньше половины максимальной мощности) до

50–70 % общего времени, а на режимах холостого хода до 40 % [6], то можно констатировать, что снижение степени сжатия до значений 10–15 приведет к повышению экономичности. При этом уровень нагрузок на элементы двигателя (рис. 9) значительно уменьшится (до 30 %).

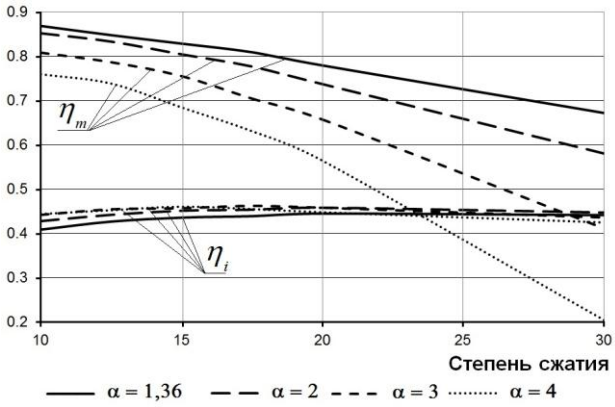

Рис. 8. Зависимость механического (η_m) и индикаторного (η_i) КПД от степени сжатия при различных коэффициентах избытка воздуха (ϕ_z = 50 ГУПКВ, m = 3)

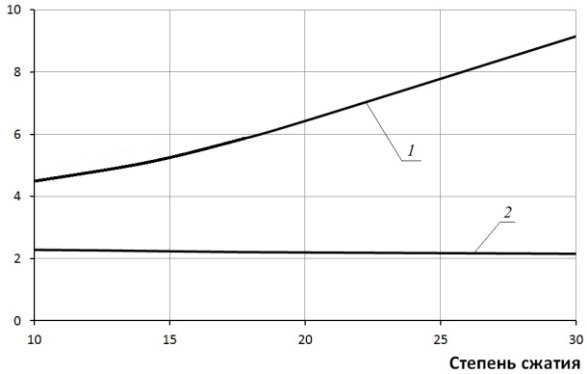

Рис. 9. Зависимости максимального давления и максимальной температуры цикла от степени сжатия (α = 1,36, ϕ_z = 50 ГУПКВ, m = 3):
1 – максимальное давление, Мпа;
2 – максимальная температура, К/1000

Данный вывод подтверждается результатами, полученными в работе [6], где исследовался дизель со специальной системой зажигания с рядом последовательных искр. Было отмечено, что при снижении степени сжатия до 12, топливная экономичность дизеля возрастала.

ВЫВОДЫ

При реализации унифицированного рабочего процесса на базе дизельного двигателя YANMAR L-100C рекомендуется снизить степень сжатия до значений 10–15, поскольку это уменьшит нагрузки, действующие на конструкцию двигателя без ухудшения экономичности на полной нагрузке и с ростом экономичности на частичных режимах. Это в свою очередь позволит либо снизить массу и габариты, либо увеличить запас прочности и ресурс двигателя. Кроме того, понижение степени сжатия снизит вероятность самовоспламенения топливо-воздушной смеси раньше момента искрового воспламенения при использовании низкооктановых топлив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гарипов М. Д.** Новая концепция организации бездетонационного сгорания низкооктановых топлив в ДВС с искровым зажиганием // Автомобильная промышленность. 2010. № 4. С. 8–11. **[** M. D. Garipov, “The new concept of non-knocking low-octane fuels combustion in internal combustion engines with spark ignition,” (in Russian), *The Car Industry*, no. 4, pp. 8-11, 2010. **]**

2. **Губайдуллин И. С.** Моделирование рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания в интерактивной системе имитационного моделирования «Альбея». Уфа: УГАТУ, 1997. 43 с. **[** I. S. Gubaidullin, *The modeling of internal combustion engines workflow in an interactive simulation system "The Albeya"*, (in Russian). Ufa: USATU, 1997. **]**

3. **Загайко С. А.** Моделирование механических потерь ДВС в системе имитационного моделирования «Альбея». Уфа: 1996. 74 с. **[** S. A. Zagaiko, *Simulation of mechanical losses in the engine simulation system "The Albeya"*, (in Russian). Ufa, 1996. **]**

4. **Горбачев В. Г.** Система имитационного моделирования «Альбея» (ядро). Руководство пользователя. Руководство программиста: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 1995. 112 с. **[** V. G.Gorbachev, *Simulation system "The Albeya" (kernel). User Guide*, (in Russian). Ufa: USATU, 1995. **]**

5. **Орлин А.С., Круглов М. Г.** Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение, 1983. 372 с. **[** A. S. Orlin, M. G. Kruglov, *Internal combustion engines. Theory of piston and combined engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1983. **]**

6. **Phatak R. G., Komiyama K.** Investigation of a spark – assisted diesel engine. SAE Techn. Pap. Ser. 1983, № 830588, 8 p. **[** R. G. Phatak, *Investigation of a spark – assisted diesel engine*, SAE Techn. Pap. Ser., no. 830588, 1983. **]**

ОБ АВТОРАХ

ГАРИПОВ Марат Данилович, доц. каф. ДВС. М-р техн. и технол. (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. перспект. раб. процессов ПДВС.

САКУЛИН Роман Юрьевич, доц. каф. ДВС. М-р техн. и технол. (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. экологичности ПДВС.

ЯКОВЛЕВ Павел Борисович, студ. каф. ДВС.

METADATA

Title: The rational compression ratio for ICE with the unified workflow.

Authors: M. D. Garipov, R. J. Sakulin, P. B. Yakovlev.

Affiliation:
Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: garry76@mail.ru, laminar_burn@mail.ru, yak21@live.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 2 (63), pp. 19-24, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The numerical studies results of compression ratio effect on the four-stroke diesel YANMAR L-100C performance are presented. The most appropriate value of the compression ratio is determined.

Key words: compression ratio; piston engines; brake efficiency; excess air ratio.

About authors:

GARIPOV, Marat Danilovich, Doc., Dept. of ICE. Mag. (USATU, 1999). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2004).

SAKULIN, Roman Jurievich, Doc., Dept. of ICE. Mag. (USATU, 2006). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2010).

YAKOVLEV, Pavel Borisovich, stud., Dept. of ICE.