

ДВИГАТЕЛЕ СТРОЕНИЕ

№ 1 (259)
январь–март 2015

Санкт-Петербург

РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Тузов Л.В., Ганин Н.Б., Пряхин А.С.
**Идеальный термодинамический цикл ДВС
с изохорным и изотермическим способами
подвода теплоты**

3

ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES

Tuzov L.V., Ganin N.B., Pryanin A.S.
**Ideal Thermodynamic Cycle for Reciprocating Engine
with Isochoric and Isothermal Heat Supply**

7

Gusarov V.V., Avtayev F.V.
Balancing W8 Engines

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

Коньков А.Ю., Яранцев М.В.
**Способ диагностирования плунжерных пар
топливного насоса высокого давления**

14

AUTOMATION AND DIAGNOSTICS

Konkov A.Yu., Yarantsev M.V.
**Assessment of Wear in HP Fuel Pump Plunger Pairs
at an Early Stage**

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

Пушнин В.П.
**Строение сферических наноразмерных
частиц дизельной сажи**

19

Pushnin V.P.
Structure of Nanoscale Spherical Soot Particles

Патрахальцев Н.Н., Аношина Т.С., Камышников Р.О.
**Снижение расхода топлива и вредных выбросов
дизеля на режимах малых нагрузок
методом изменения рабочего объема**

26

Patrakhaltsev N.N., Anoshina T.S., Kamyshnikov R.O.
**Improvement in Engine Fuel Efficiency and Emission
Performance at Low Loads by means
of Displacement Control**

Живлюк Г.Е., Петров А.П.
**Анализ возможностей снижения выбросов
вредных веществ эксплуатируемыми СДЭУ**

30

Jivlyuk G.E., Petrov A.P.
**Reserves of Improvement in Emission Performance of
Marine Diesel Engines**

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Марукович Е.И., Бевза В.Ф., Груша В.П., Красный В.А.
**Повышение качества деталей из чугунов путем
совершенствования процесса структурообразования**

35

MAINTENANCE AND REPAIR ISSUES

Marukovich E.I., Bevza V.F., Grusha V.P., Krasny V.A.
**Improvement in Structure Formation Technologies
as a Means to Enhance Cast Iron Parts Quality**

НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Мельник Г.В.
**Обзор журнала Diesel & Gas Turbine Worldwide
за 2014 год**

41

Melnik G.V.
**Review of Diesel & Gas Turbine Worldwide
2014 Publications**

Новости ОАО «Звезда»

51

News from JSC «Zvezda»

Развитие двигателестроения в России

52

Progress of Engine Building in Russia

ИНФОРМАЦИЯ

АГРОИНФО-2015
**6-я международная научно-практическая
конференция**

40

AGROINFO-2015
6th International Academic And Research Conference

**Международная научно-практическая конференция
«Новые горючие и смазочные материалы
с присадками»**

53

**International Academic And Research Conference
«New Fuels and Lubricants Modified with Additives»**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

ПРЕДПРИЯТИЯ

В.А. Шелеметьев	<i>техн. директор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
В.А. Рыжов	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
Е.С. Васюков	<i>техн. директор</i>	<i>ЗАО УК БМЗ, г. Брянск</i>
А.К. Лимонов	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО РУМО, Н. Новгород</i>
М.В. Бояркин	<i>гл. спец. по развитию</i>	<i>ОАО ХК «Барнаултрансмаш», г. Барнаул</i>
В.М. Гребнев	<i>техн. директор</i>	<i>ОАО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково</i>
Р.Х. Хафизов	<i>зам. гл. констр. по двиг.</i>	<i>ОАО КамАЗ, г. Набережные Челны</i>
А.А. Матюшин	<i>генеральный директор</i>	<i>ОАО ЗМЗ, г. Заволжье</i>
В.И. Федышин	<i>директор</i>	<i>МАН Ферросталь, Санкт-Петербургский филиал</i>
В.В. Коновалов	<i>1-й зам. ген.директора</i>	<i>ОАО «Звезда», Санкт-Петербург</i>
А.П. Маслов	<i>вед. инж.-конструктор</i>	<i>ООО ГСКБ «Трансдизель», г. Челябинск</i>
А.С. Калюнов	<i>начальник ИКЦ</i>	<i>ООО НЗТА, г. Ногинск</i>

НИИ

В.С. Папонов	<i>ген. директор</i>	<i>ОАО НИКТИД, г. Владимир</i>
Д.П. Ильющенко-Крылов	<i>гл. инженер</i>	<i>ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.А. Сорокин	<i>зав. отделом</i>	<i>ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.И. Ерофеев	<i>нач. отдела</i>	<i>1 ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург</i>
В.В. Альт	<i>директор</i>	<i>ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск</i>
Ю.А. Микутенок	<i>президент</i>	<i>ООО НПХЦ «Миакрон-Нортон»</i>
Б.А. Зеленев	<i>директор</i>	<i>НТЦ ПМТ ФГУП ЦНИИМ, Санкт-Петербург</i>
А.М. Махмудов	<i>с.н.с.</i>	<i>ФГУП «Крыловский ГНЦ», Санкт-Петербург</i>

ВУЗЫ

Ю.В. Галышев	<i>зав. кафедрой ДВС</i>	<i>СПбГПУ, Санкт-Петербург</i>
Н.Д. Чайнов	<i>проф. кафедры Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
О.К. Безюков	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.А. Иванченко	<i>зав. кафедрой СЭУ</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
Л.В. Тузов	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.С. Пунда	<i>проф. кафедры ДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
В.К. Румб	<i>проф. кафедры ДВС и АСЭУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
А.В. Смирнов	<i>нач. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ФГОУ ВПО ВИ(ИТ), Санкт-Петербург</i>
В.О. Сайданов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ФГОУ ВПО ВИ(ИТ), Санкт-Петербург</i>
А.А. Обозов	<i>профессор кафедры ТД</i>	<i>ФГБОУ ВПО БГТУ, г. Брянск</i>
С.П. Косырев	<i>профессор кафедры ТАМ</i>	<i>БИТТУ фил. ГОУ ВПО СГТУ г. Балаково</i>
А.В. Разуваев	<i>профессор кафедры ТАМ</i>	<i>БИТТУ фил. ГОУ ВПО СГТУ г. Балаково</i>

Издатель журнала — ООО «ЦНИДИ-Экосервис», Санкт-Петербург.

Журнал издается при поддержке ФГОУ ВПО «Военный институт (инженерно-технический)» ВИ(ИТ), филиал «Военной академии материально-технического обеспечения», Санкт-Петербург.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук (www.vak.ed.gov.ru).

Электронные версии журнала (2005–2015 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» (www.elibrary.ru) и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Выпускающий редактор Н.А. Вольская
Редактор инф. отдела Г.В. Мельник
Ст. редактор О.Д. Камнева
Верстка — А.В. Вольский

Сдано в набор 03.03.2015
Подписано в печать 20.03.15
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7
Зак. 123. Тираж 1000 экз.
Цена договорная

Почтовый адрес редакции журнала:
ООО «ЦНИДИ-Экосервис», 191123, Санкт-Петербург, а/я 65

Тел.: +7 (921) 956-31-94

E-mail: ecology@rdiesel.ru
www.rdiesel.ru

**ДВИГАТЕЛЕ
СТРОЕНИЕ**

Типография «СВЕТЛИЦА»
Лиц. ПД № 2-69-618, 196158,
Санкт-Петербург, Московское шоссе, 25, 215

© Журнал «Двигателестроение». 2015. № 1 (259)

ИДЕАЛЬНЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ДВС С ИЗОХОРНЫМ И ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ СПОСОБАМИ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ

Л.В. Тузов, д.т.н., проф., Н.Б. Ганин, к.т.н, доцент, А.С. Пряхин к.т.н, проф., ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова

Предлагается идеальный термодинамический цикл с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты, обеспечивающий постоянство максимальной температуры цикла в период изотермического расширения, что обеспечивает высокий термодинамический КПД. Показано, что для обеспечения постоянной максимальной температуры цикла, в период изотермического расширения, необходима постоянная скорость подвода теплоты. Предлагаемый цикл может стать основой для создания экономичного управляемого низкотемпературного рабочего процесса при постоянной температуре сгорания с низкими выбросами окислов азота.

Совместными усилиями фирм WARTSILA и MAN завершается реализация программы «Геркулес», которая предусматривает в течение 2004–2015 гг. создать судовой дизель с почти нулевыми выбросами вредных веществ, и при этом существенно снизить удельный расход топлива. Осуществление таких противоречивых задач предполагается с помощью новой концепции сгорания. Одной из основ новой концепции является использование высокой степени сжатия и управляемое низкотемпературное сгорание топлива в цикле с целью одновременного снижения выбросов окислов азота и удельного расхода топлива. В результате реализации этой концепции удалось достичь максимальных значений давления и температуры сгорания соответственно: 30 МПа и 2000 °С при давлении на входе в двигатель 0,8 МПа [7].

Целью данной статьи является разработка такого идеального термодинамического цикла, в котором процесс подвода теплоты протекал бы при постоянной максимальной температуре цикла, а его термический КПД превышал бы КПД известных термодинамических циклов ДВС.

Как известно, ДВС по характеру процесса подвода теплоты в цикл делятся на три типа [4]:

- с изохорным подводом теплоты (цикл Отто);
- с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля);

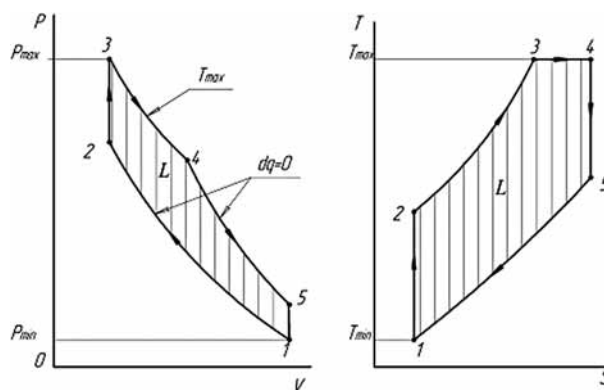


Рис. 1. Идеальный термодинамический цикл ДВС с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты

➤ с изохорным и изобарным подводом теплоты (цикл Тринклера–Сабатэ).

В указанных циклах максимальное давление и максимальная температура цикла взаимосвязаны. Иными словами с увеличением максимального давления увеличивается максимальная температура цикла. По этой причине традиционные циклы непригодны для управляемого низкотемпературного рабочего процесса с постоянной температурой сгорания. Попытаемся для этой цели выполнить анализ возможностей идеального термодинамического цикла с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты.

Рассмотрим этот идеальный термодинамический цикл в координатах p – V и T – S (рис. 1).

Цикл складывается из следующих процессов:

- (1–2) — адиабатное сжатие в цилиндре до максимально допустимого давления в ДВС;
 - (2–3) — изохорный подвод теплоты до T_{max} ;
 - (3–4) — изотермический подвод теплоты;
 - (4–5) — адиабатное расширение;
 - (5–1) — изохорный отвод теплоты;
- L — полезная работа цикла.

Для предлагаемого идеального термодинамического обратимого цикла (с изохорным и изотермическим подводом теплоты) справедливы следующие соотношения:

— степень предварительного изотермического расширения:

$$p_T = \frac{v_4}{v_3}; \quad (1)$$

— степень сжатия (в цилиндре ДВС)

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}; \quad (2)$$

— степень повышения давления

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2}. \quad (3)$$

Используя традиционные методы термодинамического анализа, получим формулу для термического КПД такого цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}, \quad (4)$$

где q_1 и q_2 — соответственно подведенная и отведенная теплота.

Подведенная теплота определяется суммой теплоты при постоянных объеме и температуре:

$$q_1 = q_1^v + q_1^t = c_v(T_{\max} - T_2) + R \cdot T_{\max} \cdot \ln \rho_T. \quad (5)$$

Отведенная теплота

$$q_2 = c_v(T_5 - T_1),$$

где c_v — удельная изохорная теплоемкость; T_{\max} , T_2 , T_5 , T_1 — температуры в соответствующих точках цикла; R — газовая постоянная.

Отсюда термический КПД термодинамического цикла с изохорным и изотермическим подводом теплоты составит:

$$\eta_t = 1 - \frac{c_v(T_5 - T_1)}{c_v(T_{\max} - T_2) + R \cdot T_{\max} \cdot \ln \rho_T}. \quad (6)$$

Учитывая, что $R = c_p - c_v$, а $c_p / c_v = k$, где $k = 1, 4$ — показатель адиабаты и выражая температуры в характерных точках цикла через T_1 после несложных преобразований получаем

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho_T^{k-1} - 1}{\varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + (k-1)\lambda \cdot \ln \rho_T]}. \quad (7)$$

Если степень предварительного изотермического расширения $\rho_T = 1$, предлагаемый идеальный цикл становится известным циклом Отто.

Сравним КПД термодинамического цикла с изохорным и изотермическим подводом теплоты с другими известными циклами. Для корректного сравнения принимаем одинаковыми для всех циклов следующие параметры:

➤ максимальные и минимальные температуры циклов T_{\max} и T_{\min} составляют, соответственно, 2000 и 20 °С;

➤ максимальные и минимальные давления циклов P_{\max} и P_{\min} соответственно 30 и 0,8 МПа, что соответствует степени сжатия 11.

➤ степень предварительного изобарного расширения равна степени предварительного изотермического расширения $\rho = \rho_T = 1,5$;

Расчетные значения термического КПД идеальных циклов

Название цикла	Формула термического КПД	Величина термич. КПД, % при $\varepsilon = 11$
Карно	$1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$	87,1
Цикл Тринклера–Сабатэ с изохорным и изобарным подводом теплоты	$\varepsilon = \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min} \cdot \lambda} \right)^{\frac{1}{k}};$ $\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{(\lambda \cdot \rho^k - 1)}{\lambda - 1 + k \cdot \lambda(\rho - 1)}$	59,1
Цикл с изохорным и изотермическим подводом теплоты	$\varepsilon = \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min} \cdot \lambda} \right)^{\frac{1}{k}};$ $\eta_t = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho_T^{k-1} - 1}{\varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + (k-1)\lambda \cdot \ln \rho_T]}$	60,4

➤ степень повышения давления $\lambda = 1,3$.

Результаты расчетов термических КПД сравниваемых циклов представлены в таблице.

Как видим, наибольший термический КПД соответствует циклу Карно 87,1, а наименьший — циклу Тринклера–Сабатэ 59,1 %. Предложенный идеальный термодинамический цикл имеет более высокий термический КПД — 60,4 % по сравнению с циклом Тринклера–Сабатэ, который реализуется на практике в дизельных двигателях.

На рис. 2 показано влияние степени сжатия на термический КПД двух идеальных циклов.

Из графика видно, что разница термических КПД между циклом с изохорным и изотермическим подводом теплоты и циклом Тринклера–Сабатэ в диапазоне степени сжатия от 10 до 50 составляет от 1,3 до 0,7%.

Однако для практического использования предлагаемого идеального цикла необходимо установить закон тепловыделения при изотермическом способе подвода теплоты, при котором температура сгорания оставалась бы постоянной в процессе изотермического расширения. Для определения искомого закона тепловыделения используем характеристику подвода теплоты x идеального термодинамического цикла:

$$x = \frac{Q(x)}{L}, \quad (8)$$

где $Q(x)$ — количество теплоты, выделившейся при изменении объема цилиндра от начального до текущего; L — полезная работа цикла.

Характеристика интегрального подвода теплоты идеального цикла x представляет собой отношение количества подведенной теплоты, при изменении объема от начального до текущего, к полезной работе цикла и определяется по индикаторной

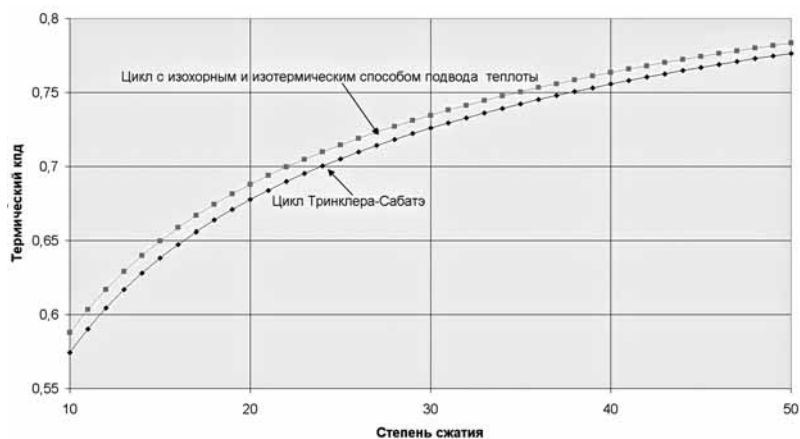


Рис. 2. Влияние степени сжатия на термический КПД идеальных циклов

диаграмме идеальных термодинамических циклов. Индикаторная диаграмма идеального термодинамического цикла с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты в координатах $P-V$ представлена на рис. 3.

Для вычисления характеристики интегрального подвода теплоты идеального цикла воспользуемся известной методикой [1] по расчету характеристик динамики тепловыделения по индикаторной диаграмме реального рабочего процесса

$$Q_x = \int_{p_0 V_0}^{p_m V_m} \frac{d(pV)}{k-1} + \int_{V_0}^{V_m} p dV. \quad (9)$$

Полученную зависимость проще всего решить графическим методом, используя чертежно-графический редактор КОМПАС [3]. С помощью графического интегрирования зависимость (9) приводится к виду:

$$Q_x = \left(\sum_1^m \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{k-1} + L_{сж} \right) \quad (10)$$

где $p_1 V_1, p_2 V_2$ — давление и объем в начале и в конце шага; $L_{сж}$ — работа сжатия в пределах шага.

Отсюда интегральная характеристика подвода тепла определится по формуле

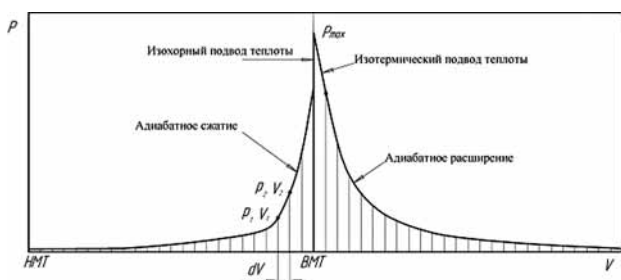


Рис. 3. Индикаторная диаграмма идеального термодинамического цикла с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты

$$x = \frac{1}{L} \left(\sum_1^m \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{k-1} + L_{сж} \right) \quad (11)$$

Интегральная характеристика идеального термодинамического цикла с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты оценивает закон подвода теплоты в диапазоне от 0 до 1,0 в пределах от ВМТ до НМТ.

Характеристику интенсивности теплоподвода или закон подвода теплоты можно определить путем графического дифференцирования интегральной характеристики (11):

$$\frac{dx}{dV} = \frac{x_{j+1} - x_j}{\Delta V}. \quad (12)$$

Используя полученные интегральные и дифференциальные характеристики подвода теплоты, оценим идеальный термодинамический цикл с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты и сравним его с другими известными циклами.

На рис. 4 изображены интегральные характеристики идеальных циклов с изотермическим подводом теплоты (цикл Отто), с изохорным и изотермическим подводом теплоты, с изохорным и изобарным способами подвода (цикл Тринклера-Сабатэ) и с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля) в зависимости от изменения рабочего объема.

Как видно из графика, интегральная характеристика x предложенного идеального термодинамического цикла занимает промежуточное положение между циклами Отто и Тринклера-Сабатэ.

Характеристика интенсивности теплоподвода dx/dV идеальных циклов показана на рис. 5.

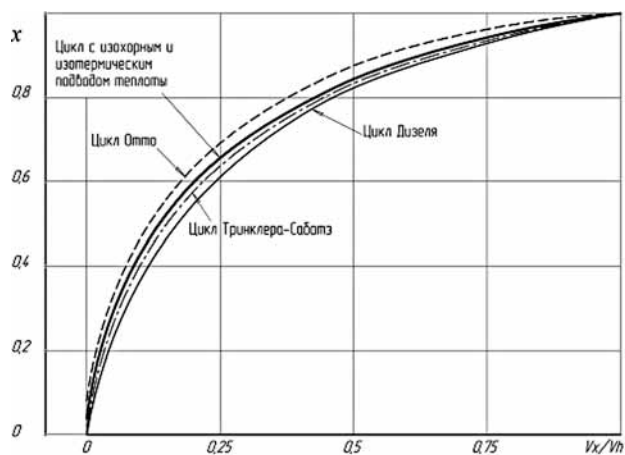


Рис. 4. Интегральные характеристики подвода тепла идеальных термодинамических циклов

По результатам сравнительного анализа и расчетным характеристикам (см. рис. 4 и 5) можно сделать следующие выводы:

➤ наибольшей скоростью подвода тепла характеризуется у цикла Отто — 0,056, в то время как в других циклах этот параметр находится в узком диапазоне — от 0,036–0,04;

➤ цикл с изохорным и изотермическим подводом теплоты имеет практически постоянную скорость подвода тепла (0,036–0,037) в период изотермического расширения, в то время как другие циклы имеют ярко выраженные экстремумы.

➤ для обеспечения постоянной максимальной температуры цикла в период изотермического расширения необходима постоянная скорость подвода теплоты.

Таким образом, предлагаемый идеальный термодинамический цикл с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты реализуется при постоянной максимальной температуре цикла в период изотермического расширения. Несмотря на то что термодинамический КПД предлагаемого цикла превышает КПД термодинамического цикла Тринклера–Сабатэ незначи-

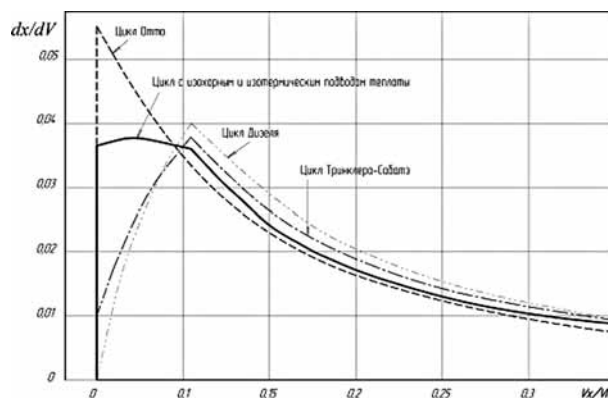


Рис. 5. Характеристика интенсивности теплоподвода идеальных циклов

тельно (0,7–1,3 %), предлагаемый идеальный термодинамический цикл может стать основой для создания экономичного управляемого низкотемпературного рабочего процесса с постоянной температурой сгорания и, как следствие, низкими выбросами окислов азота.

Литература

1. Теория двигателей внутреннего сгорания / Под ред. Н.Х. Дьяченко. — Л. : Машиностроение, 1974. — 552 с.
2. Ерофеев В.Л., Пряхин А.С. Термодинамические пределы энергоэффективности теплоэнергетических установок. Журнал университета водных коммуникаций, вып. 2 (18). — ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, 2013. — С. 33–38.
3. Ганин Н.Б. Автоматизированное проектирование в системе КОМПАС-3D V12. — М. : ДМК Пресс, 2010. — 360 с.

4. Гаврилов В.В. Судовое главное энергетическое оборудование. Судовые двигатели внутреннего сгорания: учеб. пособие. — СПб. : СПГУВК, 2011. — 228 с.
5. Андрющенко А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок. — М. : Высшая школа, 1968. — 288 с.
6. Дизели. Справочник / Под редакцией В.А. Ваншейдта. — М. : 1977. — 480 с.
7. Kyrktatos N., Hellberg L. and Poensgen C. Hercules-B: Ten Years After: Results From The Major Programme Hercules A-B-C On Marine Engine R&D, Paper № 18, 27th CIMAC Congress, Shanghai, 2013.