

УДК 621.43

И.Л. Захаров, В.Л. Химич, А.Н. Тарасов, Л.А. Захаров

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПОРШНЕВОГО МНОГОТОПЛИВНОГО ДВС С ПЕРЕМЕННОЙ СТЕПЕНЬЮ СЖАТИЯ НА РАННЕЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты термодинамических испытаний «методом научного исследования» рядного четырехцилиндрового двигателя ЗМЗ-4021.10 рабочим объемом 2,445 л, работающий на низкооктановом бензине А-76 с переменной степенью сжатия, на топливе различного химического состава и с применением рабочего тела трех, двух и одноатомным химическим составом. Подвод теплоты от теплоисточника к массе рабочего тела осуществлялся по циклу Отто и Карно. С применением этих данных по геометрической модели и геометрическим характеристикам численными расчетами определены принципиально неустранимые тепловые потери по второму закону термодинамики и пути их уменьшения. Рассматриваются физическая, термодинамическая и математическая модели совершенствования термодинамического рабочего цикла. Выявлено благоприятное влияние на улучшение термодинамических показателей энергетических, экономических и экологических поршневого ДВС при работе на номинальных нагрузках.

Ключевые слова: рабочие термодинамические циклы двигателей внутреннего сгорания, степень сжатия, род рабочего тела, среднее давление цикла, форсировка ДВС с благоприятной экономичностью.

Поршневые ДВС по требованиям европейских стандартов оцениваются эксплуатационными, эффективными, индикаторными и термодинамическими показателями. Главная задача при создании многотопливных ПДВС с переменной степенью сжатия на ранней стадии проектирования – **анализ исследования и расчет термодинамических показателей.**

Термодинамические показатели поршневого ДВС характеризуют термодинамический рабочий цикл и **определяются** «методом научного исследования» **изменения** параметров состояния рабочего тела в цилиндре поршневого ДВС за время рабочего цикла. К ним относятся среднее термодинамическое давление P_t , термодинамическая мощность N_t , крутящий момент M_t , термодинамический КПД η_t , удельный термодинамический расход топлива g_t , часовой термодинамический расход топлива G_t , степень форсировки (благоприятное соотношение, обеспечивающее условия получения низкого расхода топлива $\frac{P_Z - \text{максимальное давление цикла}}{P_t - \text{среднее давление цикла}} \geq 7,0$).

Объект исследования – рядный четырехцилиндровый поршневой двигатель: рабочим объемом $V_h=2,445$ л, с порядком работы цилиндров 1-2-4-3, диаметром цилиндра $D=0,092$ м, ходом поршня $S=0,092$ м, степенью сжатия $\varepsilon=6,7:1$, эффективной номинальной мощностью $N_e=66,2$ кВт, эффективным удельным расходом топлива $g_e=0,300$ кг/(кВт·ч), номинальной частотой вращения коленчатого вала двигателя $n=4500$ мин⁻¹, низшей теплотой сгорания применяемого топлива $Q_n=44013798 \frac{\text{Дж}}{\text{кг топлива}}$, теоретически необходимым коли-

чества воздуха для полного сгорания одного килограмма топлива $l_0=14,828 \frac{\text{кг воздуха}}{\text{кг топлива}}$.

Допущения при исследовании термодинамических показателей поршневого ДВС с переменной степенью сжатия, работающий по циклу Отто, на топливе с различным химическим составом, **принимаются:**

1) рабочее тело в цилиндре термодинамического поршневого ДВС воздух – считать идеальным газом, нормальные термодинамические условия которого – удельное давление $p=101332$ Па, удельный объем $v=0,773395$ м³/кг, плотность $\rho=1,293$ кг/м³, абсолютная температура $T=273,16$ К;

2) количество массы рабочего тела помещенного в полный объем цилиндра (диаметр цилиндра $D=0,092$ м, ход поршня $S=0,092$ м, степень сжатия $\varepsilon=7:1$)

$$m_a = V_a \cdot \rho = const \quad \text{или} \quad m_a = \left(\frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \rho \right) = const ;$$

3) теоретически необходимое количество воздуха для обеспечения полного сгорания одного килограмма топлива и его низшая теплота сгорания Q_H , зависящие от элементарного массового состава топлива;

4) количество массы топлив с различным элементарным массовым химическим составом, которое может полностью «сгореть» в массе воздуха [m_a по пункту 2)] в цилиндре термодинамического поршневого ДВС,

$$m_T = \frac{m_a}{l_0}, \quad \text{кг} ;$$

5) количество теплоты Q_1 , которое сообщается рабочему телу в цилиндре поршневого термодинамического ДВС:

$$Q_1 = m_T \cdot Q_H = const ;$$

б) величины термодинамических показателей поршневого ДВС с переменной степенью сжатия ($\varepsilon=14:1$, $\varepsilon=21:1$, $\varepsilon=28:1$) определяющие параметры, полученные для степени сжатия $\varepsilon=7:1$ ($m_a=const$, $m_T \neq const$, $Q_1=const$) сохраняются постоянными и неизменными.

Математические формулы для определения термодинамических показателей поршневого термодинамического ДВС с переменной степенью сжатия на номинальном режиме работы $n=4500$ мин⁻¹.

Термодинамическая мощность поршневого двигателя:

$$N_t = M_a \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot Q_H \cdot \eta_{tx} \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot \frac{1}{60}, \quad \text{или}$$

$$N_t = \left[\frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \eta_H \cdot \rho \right] \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot Q_H \cdot \eta_{tx} \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot \frac{1}{60}, \quad \text{Вт}$$

является функцией диаметра цилиндра D , хода поршня S , степени сжатия ε , коэффициента наполнения η_H , плотность рабочего тела ρ , коэффициент избытка воздуха α , теоретически необходимое количество воздуха l_0 , низшей теплоты сгорания топлива Q_H , термодинамический КПД η_t , числа цилиндров i , тактности m и частоты следования циклов $n \cdot \frac{1}{60}$.

Крутящий термодинамический момент поршневого двигателя:

$$M_t = 9,55 \cdot \frac{N_t}{n}, \quad \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Часовой расход топлива поршневого термодинамического ДВС за час работы на номинальном режиме:

$$G_t = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \eta_H \cdot \rho \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot 60, \quad \frac{\text{кг}}{\text{час}}.$$

Термодинамический КПД поршневого ДВС

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

Удельный термодинамический расход топлива поршневого ДВС

$$g_t = \frac{G_T}{N_t}, \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$$

Среднее термодинамическое давление рабочего тела в цилиндре термодинамического поршневого ДВС

$$p_t = \frac{L_t}{V_{\max} - V_{\min}} = \frac{L_t}{V_s}, \text{ МПа.}$$

Степень форсировки термодинамического поршневого ДВС

$$\Phi_t = \frac{p_z}{p_t} \geq 7.$$

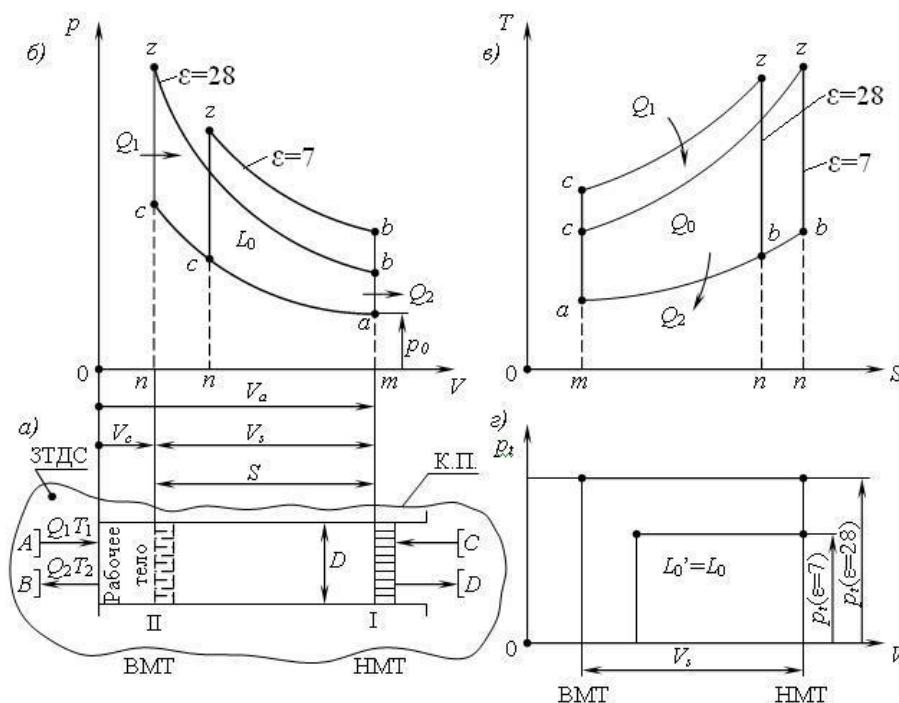


Рис. 1. Теоретический поршневой двигатель, работающий по циклу Отто, в V, p и S, T диаграммах для степеней сжатия 7 и 28:

a – закрытая термодинамическая система (теоретический поршневой ДВС); b – p, V – работа, совершенная произвольным количеством рабочего тела ЗТДС; c – T, S – теплота, подведенная к рабочему телу, в ЗТДС; z – p_t – среднее термодинамическое давление рабочего тела в ЗТДС

Исследование и расчет термодинамических показателей термодинамического поршневого ДВС с переменной степенью сжатия, работающий на топливах различного химического состава [1, 2, 3]:

- разрабатываем и строим геометрическую, физическую, термодинамическую и математическую модели, рис. 1, a ;
- определяем параметры состояния рабочего тела для ключевых точек процессов цикла Карно и Отто;
- определяем термодинамические характеристики рабочих процессов цикла Карно и Отто;
- определяем изменение термодинамического КПД поршневого термодинамического

ДВС, работающего по циклу Карно и Отто в зависимости от степени сжатия ε и показателя адиабаты k ;

- строим, по результатам расчета параметров состояния рабочего тела, теоретический цикл двигателя Карно и Отто (рис.1) в V,p и S,T диаграммах для степеней сжатия 7 и 28;
- строим, по результатам расчета термодинамического КПД поршневого ДВС Карно и Отто, в координатах **3D поверхности** изменения термодинамического КПД η_t от степени сжатия « ε » и показателя адиабаты « k » в программном пакете MatLab, рис. 2;
- рассчитываем по математическим формулам термодинамические показатели поршневого теоретического ДВС Карно и Отто.

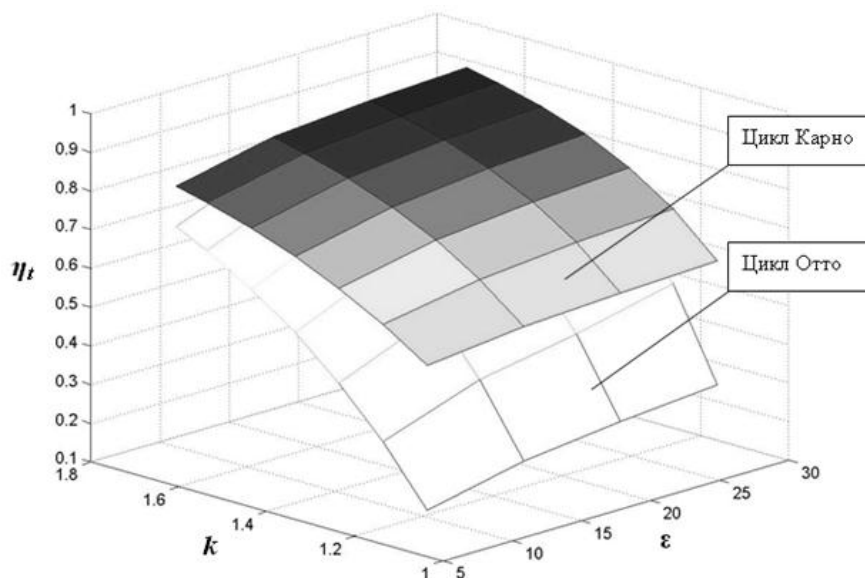


Рис. 2. Графики изменения термического КПД от степени сжатия ε и показателя адиабаты k циклов поршневых ДВС Отто и Карно

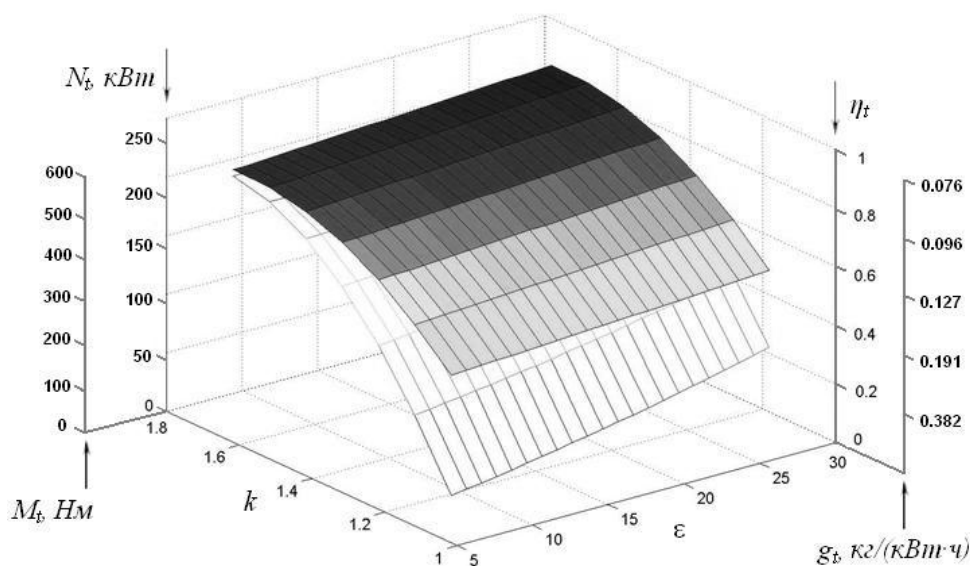


Рис. 3. График изменения термодинамических показателей, полученных по математическим моделям поршневого ДВС Карно и Отто:
 $\eta_t = f(\varepsilon; k)$; $N_t = f(\varepsilon; k)$; $M_t = f(\varepsilon; k)$; $p_t = f(\varepsilon; k)$; $g_t = f(\varepsilon; k)$

Далее строим, по результатам расчета термодинамические показатели в координатах **3D поверхности** изменения термодинамических показателей N_b , p_b , G_b , g_b , η_b , Φ_t от степени сжатия ε и показателя адиабаты k в программном пакете MatLab, рис. 3;

– анализ теоретических циклов двигателей Карно и Отто, рис. 1, показывает изменения параметров состояния рабочего тела, полезной работы циклов, среднего давления циклов.

Таблица 1

**Основные термодинамические показатели поршневого ДВС Отто,
работающего на топливе разного химического состава**

Параметры		$\varepsilon = 7:1$	$\varepsilon = 14:1$	$\varepsilon = 21:1$	$\varepsilon = 28:1$
Пылевидное угле- родное топливо $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	43,644798			129 %
	g_t	0,196	0,177	0,168	0,163
Тяжелое топливо $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	36,370665			107,5 %
	g_t	0,163	0,147	0,140	0,135
Дизельное топли- во $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	34,848172			103,0 %
	g_t	0,157	0,141	0,134	0,130
Бензин $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	33,833177			↕ 100 %
	g_t	0,152	0,137	0,130	0,126
Метан $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	29,570197			87,4 %
	g_t	0,133	0,120	0,114	0,110
Водород $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	14,548266			43,0 %
	g_t	0,065	0,059	0,056	0,054

Затем анализ изменений термодинамических КПД от степени сжатия ε и показателя адиабаты k циклов поршневых ДВС Карно и Отто показывает степень приближения КПД цикла Отто к циклу Карно, рис. 2;

– анализ изменения термодинамических показателей поршневых ДВС Карно и Отто показывает основные направления совершенствования поршневого ДВС Отто;

– анализ термодинамических зависимостей, позволил вывести математические уравнения и построить математические-геометрические поверхности для поршневых ДВС Карно и

Отто, по которым можно определять основные термодинамические показатели на ранней стадии проектирования ДВС рис. 3; с использованием САПР ДВС:

для цикла Отто:

$$\eta_t = -1,866374 \cdot k^2 - 0,013819 \cdot k \cdot \varepsilon + 0,000127 \cdot \varepsilon^2 + 6,566462 \cdot k + 0,020783 \cdot \varepsilon - 4,924325;$$

для цикла Карно:

$$\eta_t = -1,147984 \cdot k^2 + 3,808762 \cdot k + 0,002955 \cdot \varepsilon - 2,325508.$$

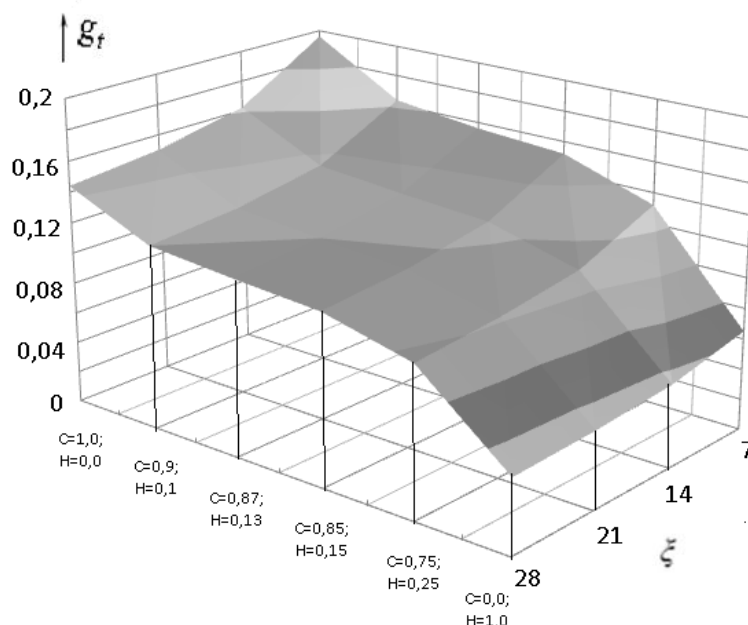


Рис. 4. График изменения термодинамической топливной экономичности поршневого ДВС Отто, работающего на топливе с различным химическим составом $g_t = f(\varepsilon, C \text{ и } H)$

Практическая ценность метода заключается в выборе **низшей теплоты сгорания** топлив с разным химическим составом, позволяющая системно и целенаправленно повышать основные термодинамические показатели поршневого ДВС на ранней стадии проектирования, рис. 4 и табл. 1.

Анализ рис.4 и табл. 1 показывает, что при постоянной массе рабочего тела в цилиндре термодинамического поршневого ДВС Отто, работающего на топливе с различным химическим составом получаем:

1) одинаковые термодинамические показатели (мощности, крутящего момента, КПД, среднее давление);

2) различные термодинамические показатели (часовой и удельный расход топлива);

3) наибольшую топливную экономичность можно получить, при работе термодинамического поршневого ДВС Отто на метане и водороде, а наименьшую – на пылевидном углеродном топливе, рис. 4 и табл. 1.

4) термодинамические показатели являются максимальными - предельными значениями, с которыми сравниваются оптимальные индикаторные, эффективные и эксплуатационные показатели действительного поршневого двигателя.

Реализация метода

Материалы методики используются:

- при создании новых и модернизации серийных поршневых ДВС на моторных предприятиях;

- на кафедре «Энергетические установки и тепловые двигатели» НГТУ им. Р.Е. Алексева при выполнении курсовых, дипломных и магистерских работ по специальности ДВС.

Библиографический список

1. **Захаров, Л.А.** Метод оценки термодинамических показателей поршневого двигателя работающего по циклу Отто на ранней стадии проектирования / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.Н. Тарасов // Журнал ААИ. 2011. №2(67)С. 42-47.
2. **Захаров, Л.А.** Повышение топливной экономичности дизельного двигателя за счет снижения механических потерь / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.В. Сеземин // Журнал ААИ. 2011. №3(68). С. 41-43.
3. **Захаров, Л.А.** Методика исследования и расчет термодинамических циклов поршневого ДВС с переменной степенью сжатия / Л.А. Захаров [и др.] // Сборник научных трудов международной студенческой научно-технической конференции по технической термодинамике для ДВС, посвященной 50-летию ЗФ НГТУ им. Р.Е. Алексева - НГТУ им. Р.Е. Алексева, 2010.
4. **Захаров, Л.А.** Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Отто, методом технической термодинамики: метод. указ. / сост.: Л.А. Захаров [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Новгород, 2010. – 33 с.
5. **Захаров, Л.А.** Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Карно, методом технической термодинамики: метод. указ. / сост.: Л.А. Захаров [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексева. Н.Новгород, 2010. – 14 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

I.L. Zakharov, V.L. Khimich, A.N. Tarasov, L.A. Zakharov

IMPROVING PERFORMANCE TECHNICAL PERSPECTIVE PISTON MULTIFUEL ENGINE WITH VARIABLE COMPRESSION RATIO AT AN EARLY STAGE

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

The results of the thermodynamic test "method of scientific research" inline four-cylinder engine ZMZ-4021.10 a working volume of 2.445 liters, working on low-octane gasoline A-76 with a variable compression ratio, the fuel of different chemical composition and the use of the working bodies of three, two, and monatomic chemical composition. Supply of heat from heat sources to the mass of the working fluid was carried out by Otto and Carnot cycle. With the use of these data according to a geometric model and the geometric characteristics of the numerical calculations are determined principally unavoidable heat losses by the second law of thermodynamics and the ways to reduce them. The physical, thermodynamic and mathematical models to improve the thermodynamic work cycle. Found a beneficial effect on improving the thermodynamic performance of power, economic and environmental reciprocating internal combustion engine when operating at rated load.

Key words: working thermodynamic cycle internal combustion engine compression ratio, type of working fluid, the average pressure of the cycle, forcing the ICE with a favorable economy.