

Улучшение технических показателей перспективного поршневого многотопливного ДВС с переменной степенью сжатия на ранней стадии проектирования

Ле Динь Динг

Ле Динь Динг / Le Dinh Ding - магистр технических наук,
факультет судовых энергетических установок,
Вьетнамский морской университет, г. Хайфон, Социалистическая Республика Вьетнам

Аннотация: в статье 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 осуществляется по циклу Отто и Карно. С применением этих данных по геометрической модели и геометрическим характеристикам численными расчетами определены принципиально неустраняемые 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.

1. Введение

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 $(P_z - \text{максимальное давление цикла}) / (P_t - \text{среднее давление цикла}) \geq 7,0$)

2. 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 $Q_n=44013798$ Дж/(кг топлива), теоретически необходимым количеством воздуха для полного сгорания одного килограмма топлива $l_0=14,828$ кг топлива кг воздуха.

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 $\varepsilon=7:1$)

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

3) теоретически необходимое количество воздуха для обеспечения полного сгорания одного килограмма топлива и его низшая теплота сгорания Q_n , 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,

$$m_T = m_a / l_0, \text{ kg} \quad (2)$$

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

$$Q_1 = m_T Q_H; \quad (3)$$

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

Математические формулы для определения термодинамических показателей поршневого термодинамического ДВС с переменной степенью сжатия на номинальном режиме работы $n=4500 \text{ мин}^{-1}$.

Термодинамическая мощность поршневого двигателя:

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

является функцией диаметра цилиндра D , хода поршня S , степени сжатия ε , коэффициента наполнения η_n , плотности 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 $n \cdot 1/60$.

Крутящий термодинамический момент поршневого двигателя:

$$M_t = 9,55 N_t / n, \text{ Н.м} \quad (5)$$

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

$$G_t = \frac{\pi D^2}{4} S \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \eta_H \rho \frac{1}{\alpha l_0} i \frac{1}{m} n \cdot 60, \frac{\text{кг}}{\text{час}} \quad (6)$$

Термодинамический КПД поршневого ДВС

$$\eta_t = 1 - 1/(k-1) \quad (7)$$

Удельный термодинамический расход топлива поршневого ДВС

$$g_t = G_t / N_t, \text{ кг/кВт.ч} \quad (8)$$

Среднее термодинамическое давление рабочего тела в цилиндре термодинамического поршневого ДВС

$$p_t = L_t / (V_{\max} - V_{\min}) = L_t / V_s, \text{ МПа} \quad (9)$$

Степень форсировки термодинамического поршневого ДВС

$$\Phi_t = p_z / p_t \geq 7 \quad (10)$$

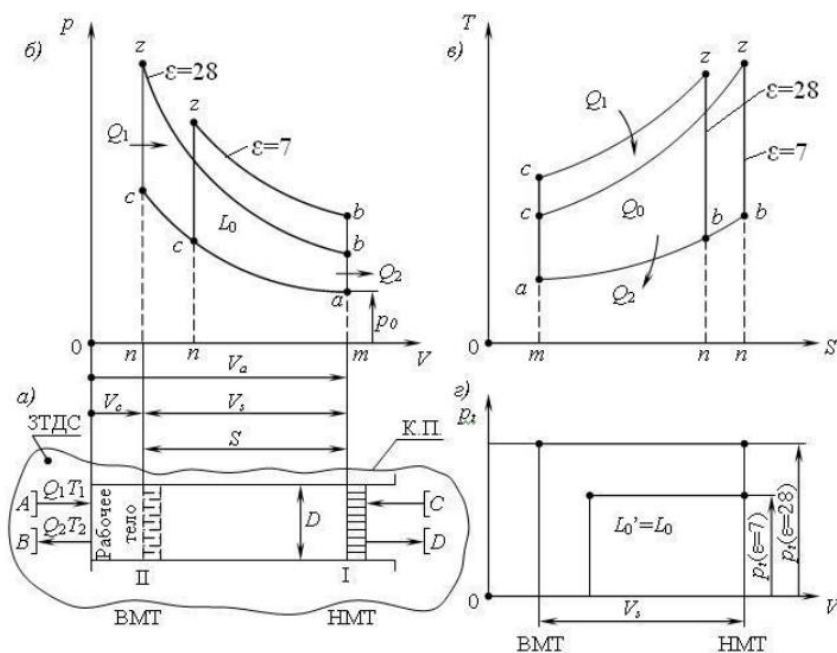


Рис. 1. Теоретический поршневой двигатель, работающий по циклу Отто, в V, p и S, T диаграммах для степеней сжатия 7 и 28:

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

3. Исследование и расчет

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.

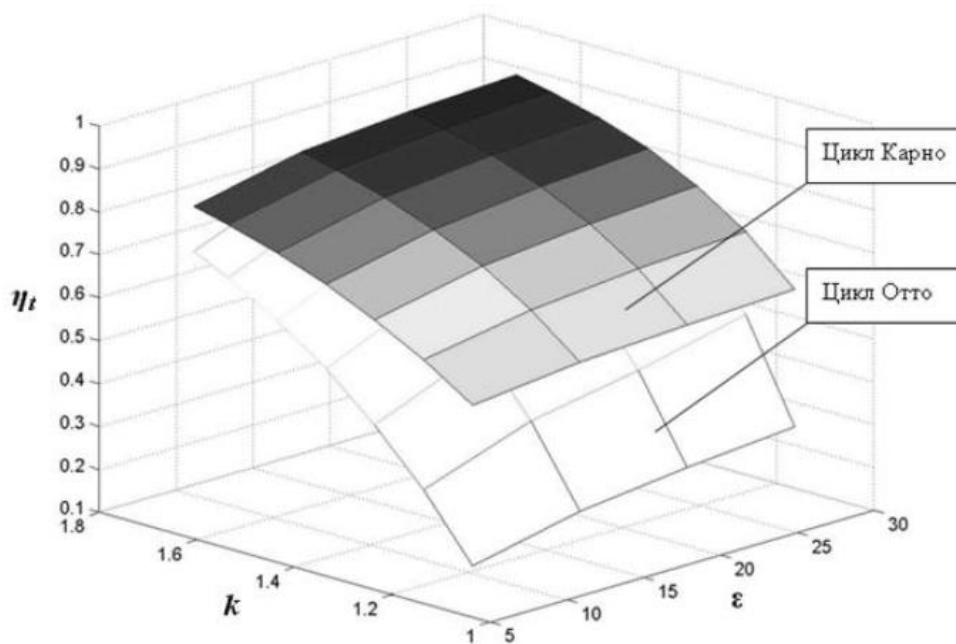


Рис. 2. Графики изменения термического КПД от степени сжатия ϵ и показателя адиабаты k циклов поршневых ДВС Отто и Карно

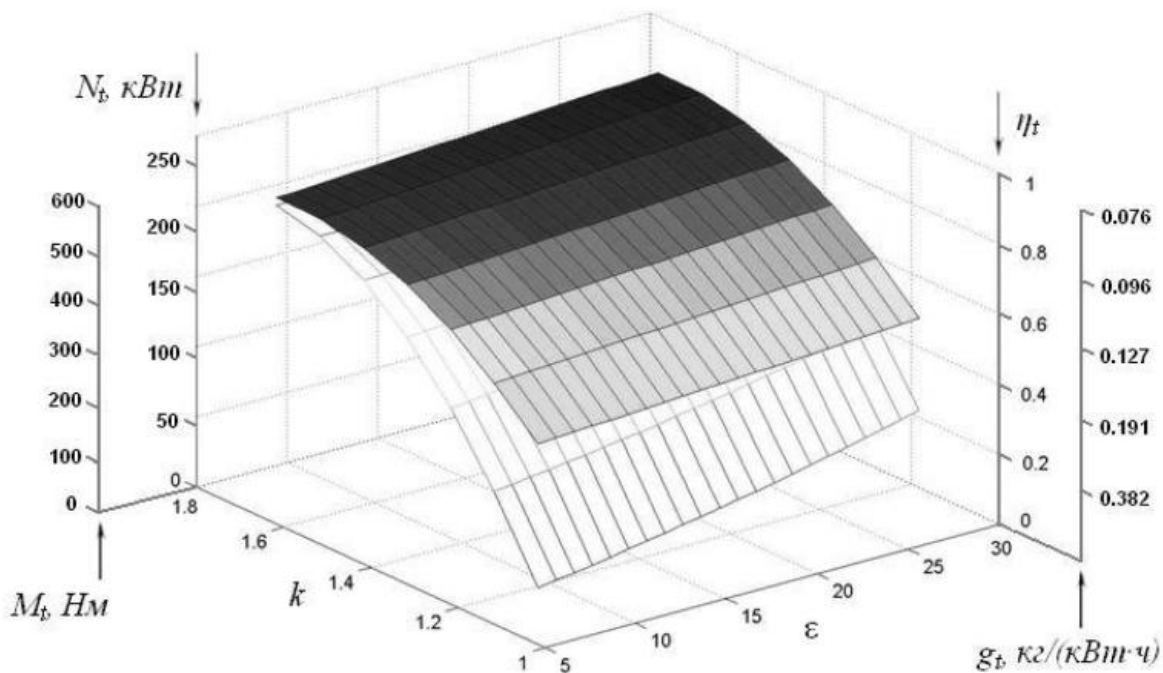


Рис. 3. График изменения термодинамических показателей, полученных по математическим моделям поршневого ДВС Карно и Отто:

$$\eta_t = f(\varepsilon; k); N_t = f(\varepsilon; k); M_t = f(\varepsilon; k); p_t = f(\varepsilon; k); g_t = f(\varepsilon; k)$$

Далее строим, по результатам расчета термодинамические показатели в координатах 3D поверхности изменения термодинамических показателей N_t , p_t , G_t , g_t , η_t , 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.

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:

$$\eta_t = -1,866374k^2 - 0,013819k\varepsilon + 0,000127\varepsilon^2 + 6,566462k + 0,020783\varepsilon - 4,924325; \quad (11)$$

для цикла Карно:

$$\eta_t = -1,147984k^2 + 3,808762k + 0,002955\varepsilon - 2,325508. \quad (12)$$

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 углеродное 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	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363

топливо $k = 1,4$	N_t	222	247	260	269
	G_t	36,370665			107,5%
	g_t	0,163	0,147	0,140	0,135
	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
Дизельное топливо $k=1,4$	N_t	222	247	260	269
	G_t	34,848172			103,0%
	g_t	0,157	0,141	0,137	0,130
	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
Бензин $k=1,4$	N_t	222	247	260	269
	G_t	33,833177			100%
	g_t	0,152	0,137	0,130	0,126
	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
Метан $k=1,4$	N_t	222	247	260	269
	G_t	29,570197			87,4%
	g_t	0,133	0,120	0,114	0,110
	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
Водород $k=1,4$	N_t	222	247	260	269
	G_t	14,548266			43%
	g_t	0,065	0,059	0,056	0,054
	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363

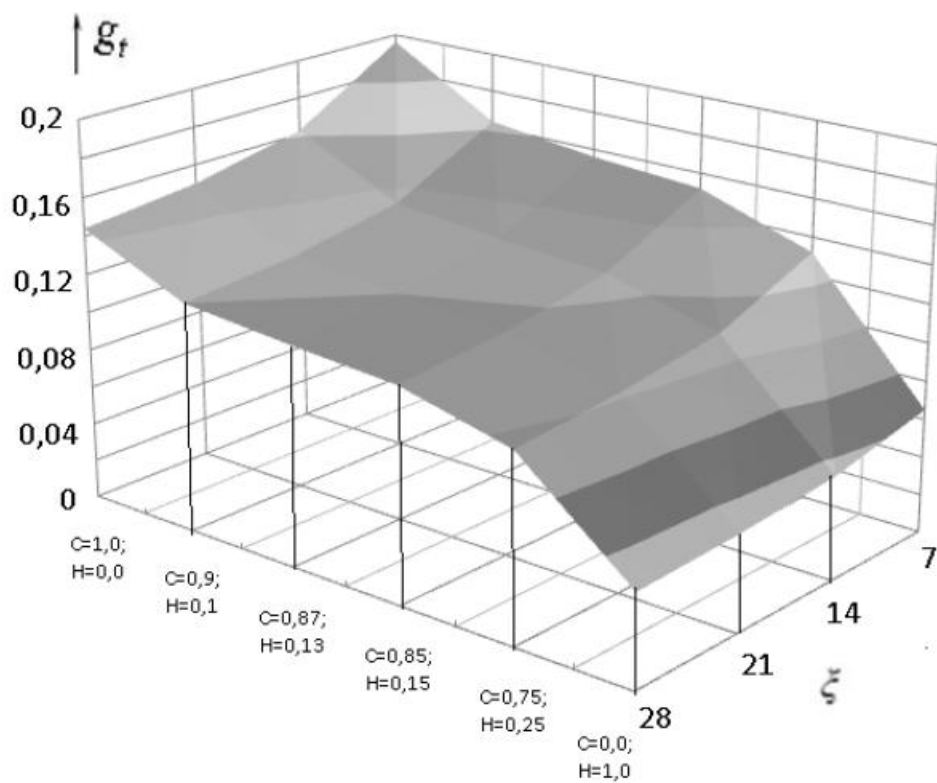


Рис. 4. График изменения термодинамической топливной экономичности поршневого ДВС Отто, работающего на топливе с различным химическим составом $g_t = f(\epsilon, C \text{ и } H)$

4. Заключение

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:

- одинаковые термодинамические показатели (мощности, крутящего момента, КПД, среднее давление);
- различные термодинамические показатели (часовой и удельный расход топлива);
- 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.
- термодинамические показатели являются максимальными - предельными значениями, с которыми сравниваются оптимальные индикаторные, эффективные и эксплуатационные показатели действительного поршневого двигателя.

Литература

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. Алексеева - НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 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. Алексеева. – 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. Алексеева. Н.Новгород, 2010. – 14 с.