

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

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОРШНЕВОГО ДВС С ПЕРЕМЕННОЙ СТЕПЕНЬЮ СЖАТИЯ НА РАННЕЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Статья посвящена методу оценки термодинамических показателей поршневого двигателя, работающего на топливе с различным химическим составом. Разработан принципиально новый метод оценки перехода работы ДВС по термодинамическому циклу Тринклера на термодинамический цикл Отто с переменными степенью сжатия и родом рабочего тела, описываемый геометрической, физической и математической моделями. Предложенный метод по подбору предельно максимальных термодинамических показателей для обеспечения их оптимизации по термодинамическим показателям ДВС, работающего по наиболее выгоднейшему циклу Карно является более перспективным для повышения эффективности ДВС, их экономических и экологических свойств по сравнению с ранее использованным методом. *Степень сжатия; показатель адиабаты; среднее термодинамическое давление; термодинамическая мощность; крутящий момент; термический КПД; удельный термодинамический расход топлива; часовой расход топлива; форсировка; программный комплекс MATLAB*

Актуальность темы заключается в важном народнохозяйственном значении проблемы повышения термодинамических показателей поршневых ДВС с переменной степенью сжатия, работающей по циклу Отто. Повышение низшей теплоты сгорания для топлива является значительным резервом улучшения их характеристик.

Целью работы является повышения термодинамических показателей поршневых ДВС (на примере рядного четырехцилиндрового двигателя рабочим объемом 2,234 л) путем повышения низшей теплоты сгорания для топлива.

В работе представлен метод исследования термодинамических показателей поршневого ДВС с переменной степенью сжатия, удовлетворяющего перспективным экономическим и экологическим требованиям.

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  $\eta_t$ , удельный термодинамический расход топлива  $g_t$ , часовой термодинамический расход топлива  $G_t$ , степень форсировки (благоприятное соотношение, обеспечи-

вающее 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: с рабочим объемом  $V_h = 2,234$  л, с порядком работы цилиндров 1-3-4-2, диаметром цилиндра  $D = 0,087$  м, ходом поршня  $S = 0,094$  м, степенью сжатия  $\epsilon = 14:1$ , эффективной номинальной мощностью  $N_e = 83$  кВт, эффективным удельным расходом топлива  $g_e = 0,250$  кг/(кВт·ч), номинальной частотой вращения коленчатого вала двигателя  $n = 3800$  мин<sup>-1</sup>, низшей теплотой сгорания применяемого топлива  $Q_n = 42720000$  Дж / кг топлива, теоретически необходимым количеством воздуха для полного сгорания одного килограмма топлива  $l_0 = 14,391 \frac{\text{кг воздуха}}{\text{кг топлива}}$ .

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

- рабочее тело – воздух в цилиндре термодинамического поршневого ДВС считать идеальным газом, нормальные термодинамические условия которого – удельное давление  $p = 101332$  Па, удельный объем  $v = 0,773395$  м<sup>3</sup>/кг, плотность  $\rho = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>, абсолютная температура  $T = 273,16$  К;

- количество массы рабочего тела, помещенного в полный объем цилиндра (диаметр

цилиндра  $D = 0,087$  м, ход поршня  $S = 0,094$  м, степень сжатия  $\varepsilon = 7:1$ )

$$m_a = V_a \cdot \rho = \text{const}$$

или

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

теоретически необходимое количество воздуха для обеспечения полного сгорания одного килограмма топлива и его низшая теплота сгорания  $Q_n$ , зависящие от элементарного массового состава топлива (например для бензина: углерода  $C = 0,855$ , водорода  $H = 0,145$ ) имеют значение:

$$l_0 = 14,828 \frac{\text{кг воздуха}}{\text{кг топлива}};$$

$$Q_n = 44013798 \frac{\text{Дж}}{\text{кг топлива}};$$

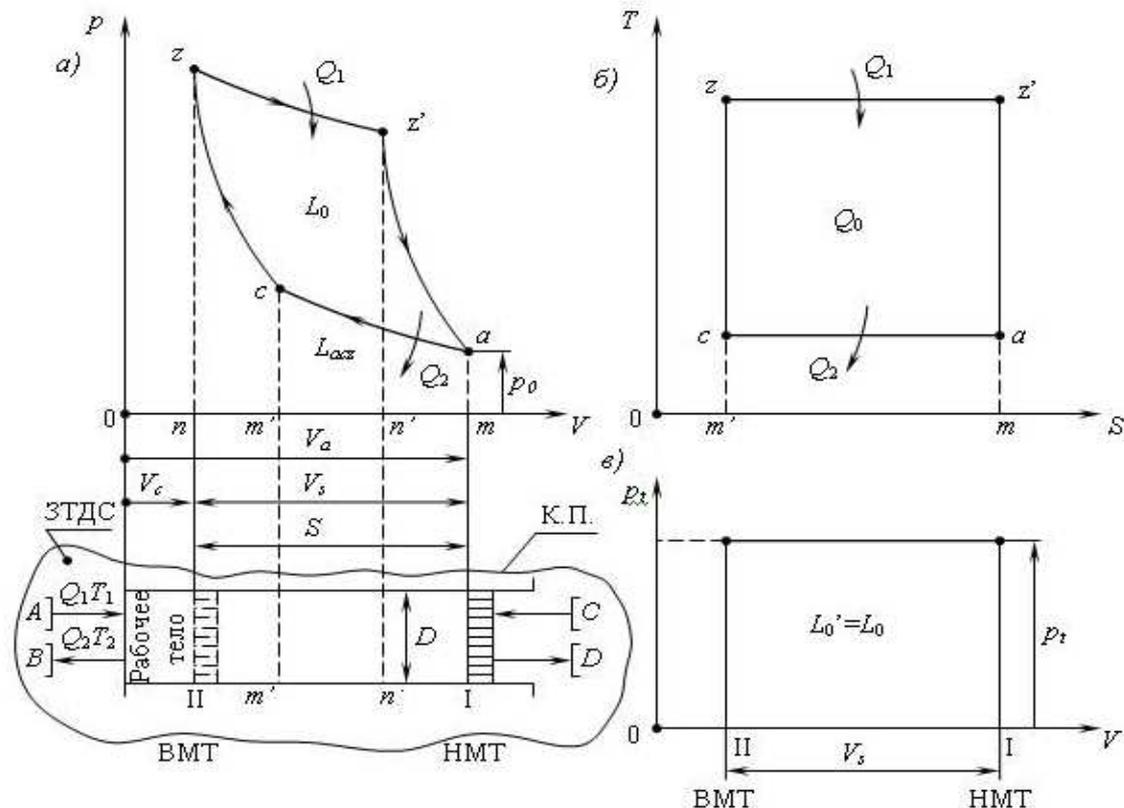
количество массы топлив с различным элементарным массовым химическим составом, которое может полностью «сгореть» в массе воздуха в цилиндре термодинамического поршневого ДВС,

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

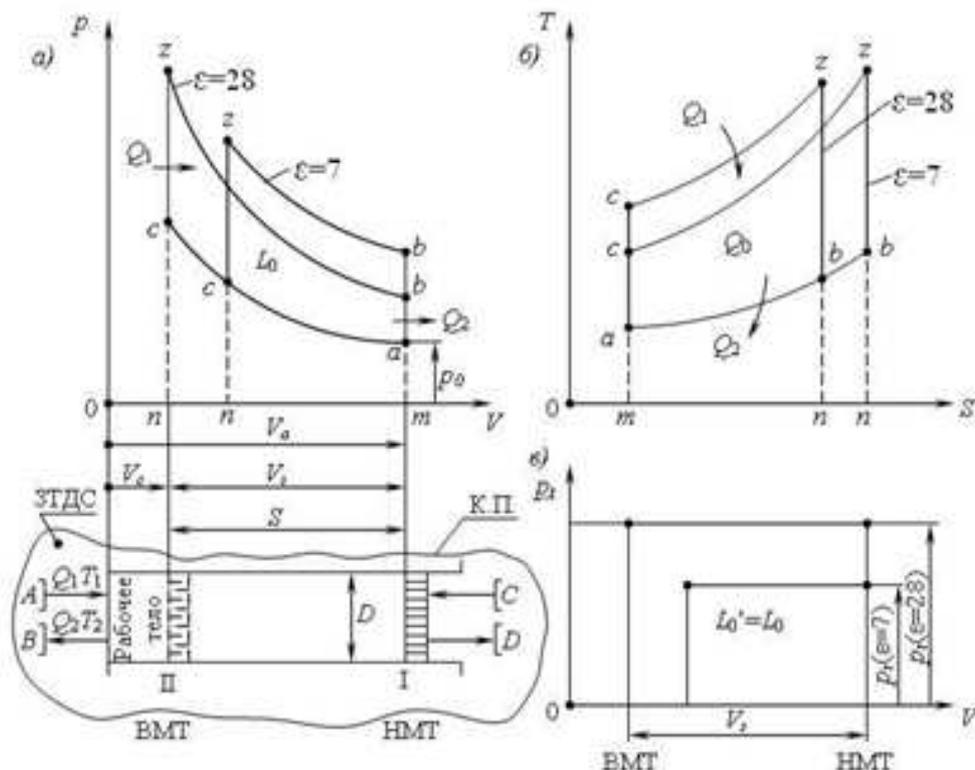
количество теплоты  $Q_1$ , которое сообщается рабочему телу в цилиндре поршневого термодинамического ДВС:

$$Q_1 = m_T \cdot Q_n = \text{const}.$$

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.



**Рис. 1.** Термодинамический цикл двигателя Карно в  $V, p$  и  $S, T$  диаграммах:  
 $a$  – закрытая термодинамическая система (теоретический поршневой ДВС),  
 где  $p, V$  – работа, совершенная произвольным количеством рабочего тела ЗТДС;  
 $\bar{b}$  –  $T, S$  – теплота, подведенная к рабочему телу, в ЗТДС;  
 $\bar{v}$  –  $p_t$  – среднее термодинамическое давление рабочего тела в ЗТДС



**Рис. 2.** Теоретический цикл двигателя Отто в  $V, p$  и  $S, T$  диаграммах для степеней сжатия 7 и 28:  
 а – закрытая термодинамическая система (теоретический поршневой ДВС),  
 где  $p, V$  – работа, совершенная произвольным количеством рабочего тела ЗТДС;  
 б –  $T, S$  – теплота, подведенная к рабочему телу, в ЗТДС;  
 в –  $p_i$  – среднее термодинамическое давление рабочего тела в ЗТДС

Математические формулы для определения термодинамических показателей поршневого термодинамического ДВС с переменной степенью сжатия на номинальном режиме работы  $n = 3800 \text{ мин}^{-1}$ .

Термодинамическая мощность поршневого двигателя:

$$N_t = M_a \frac{1}{\alpha \cdot l_0} Q_n \eta_{ix} i \frac{1}{m} n \frac{1}{60},$$

или

$$N_t = \left[ \frac{\pi D^2}{4} S \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \eta_n \rho \right] \frac{1}{\alpha l_0} Q_n \eta_{ix} i \frac{1}{m} n \frac{1}{60}, \text{ Вт}$$

является функцией диаметра цилиндра  $D$ , хода поршня  $S$ , степени сжатия  $\varepsilon$ , коэффициента наполнения  $\eta_n$ , плотности рабочего тела  $\rho$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , теоретически необходимое количество воздуха  $l_0$ , низшей теплоты сгорания топлива  $Q_n$ , термодинамический КПД  $\eta_i$ , числа цилиндров  $i$ , тактности  $m$  и частоты следования циклов  $n \cdot \frac{1}{60}$ .

Крутящий термодинамический момент поршневого двигателя:

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

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

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

Термодинамический КПД поршневого ДВС

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Удельный термодинамический расход топлива поршневого ДВС

$$g_i = \frac{G_t}{N_t} \cdot 1000, \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

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

$$\Phi_t = \frac{P_z}{P_t} \geq 7.$$

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

- разрабатываем и строим геометрическую, физическую, термодинамическую и математическую модели, рис. 1, а и рис. 2, а;

- определяем параметры состояния рабочего тела (рис. 1, а) 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  $\epsilon$  и показателя адиабаты  $k$ ;

- строим по результатам расчета параметров состояния рабочего тела теоретической цикл двигателя Карно (рис. 1) и Отто (рис. 2) 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  $\eta_t$  от степени сжатия

- « $\epsilon$ » и показателя адиабаты « $k$ » в программном пакете MATLAB, рис. 3;

- рассчитываем по математическим формулам термодинамические показатели поршневого теоретического ДВС Карно и Отто;

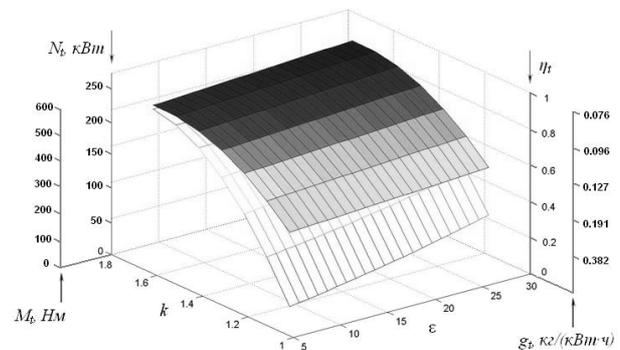
- строим по результатам расчета термодинамические показатели в координатах **3D поверхности** изменения термодинамических показателей  $N_t, p_t, G_t, g_t, \eta_t, \Phi_t$  от степени сжатия  $\epsilon$  и показателя адиабаты  $k$  в программном пакете MatLab, табл. 1 и 2;

- анализ теоретических циклов двигателей Карно и Отто, рис. 1 и 2, показывает изменения параметров состояния рабочего тела, полезной работы циклов, среднего давления циклов;

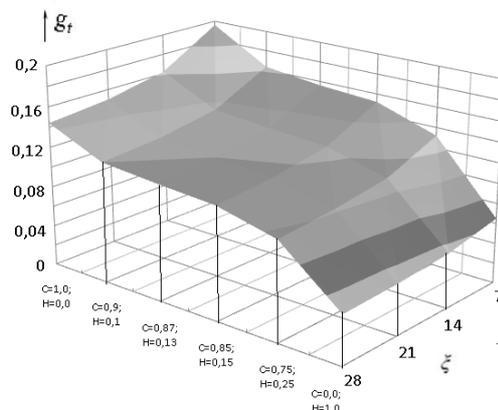
- анализ изменений термодинамических КПД от степени сжатия  $\epsilon$  и показателя адиабаты  $k$  циклов поршневых ДВС Карно и Отто рис. 3 показывает степень приближения КПД цикла Отто к циклу Карно;

- 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. 4) с использованием САПР ДВС.



**Рис. 4.** График изменения термодинамических показателей, полученных по математическим моделям поршневого ДВС Карно и Отто:  $\eta_t = f(\epsilon; k)$ ;  $N_t = f(\epsilon; k)$ ;  $M_t = f(\epsilon; k)$ ;  $p_t = f(\epsilon; k)$ ;  $g_t = f(\epsilon; k)$



**Рис. 5.** График изменения термодинамической экономичности поршневого ДВС Отто, работающего на топливе с различным химическим составом  $g_t = f(\epsilon, C \text{ и } H)$

Таблица 1

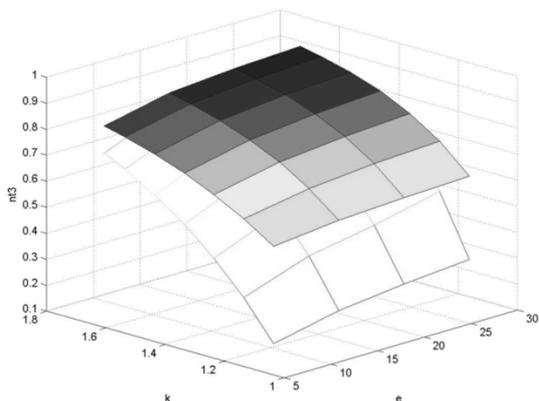
## Выбор и расчет цикловых показателей термодинамического поршневого ДВС

Топливо	$m_{в, ц, 1ц}$ , кг	$l_0$ , кг.воздуха / кг.топлива	$m_{т, ц, 1ц}$ , кг	$Q_H$ , Дж/кг	$Q_{1, ц, 1ц}$ , Дж	$Q_1$ , %
Пылевидное угле- родное топливо C = 1,0 H = 0,0	0,000842522140	11,494	0,000073301030	34106600	2500,049	99,968
Жидкое тяжелое топливо C = 0,9 H = 0,1	0,000842522140	13,793	0,000061083310	40939150	2500,699	99,994
Дизельное топливо C = 0,874 H = 0,126	0,000842522140	14,391	0,000058545070	42720000	2501,045	100,008
Бензин C = 0,855 H = 0,145	0,000842522140	14,828	0,000056819670	44013798	2500,850	100
Метан C = 0,7618 H = 0,2382	0,000842522140	16,970	0,000049647730	50381739	2501,339	100,020
Водород C = 0,0 H = 1,0	0,000842522140	34,483	0,000024432970	102432100	2502,720	100,075

Таблица 2

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

Параметры		$\epsilon = 7:1$	$\epsilon = 14:1$	$\epsilon = 21:1$	$\epsilon = 28:1$
Пылевидное угле- родное топливо $k = 1,4$	$\eta_t$	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	$N_t$	171	206	223	233
	$G_t$	33,425269680			129 %
	$g_t$	0,196	0,162	0,150	0,144
Тяжелое топливо $k = 1,4$	$\eta_t$	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	$N_t$	171	206	223	233
	$G_t$	27,853989360			107,5 %
	$g_t$	0,163	0,135	0,125	0,120
Дизельное топливо $k = 1,4$	$\eta_t$	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	$N_t$	171	206	223	233
	$G_t$	26,696551920			103,0 %
	$g_t$	0,156	0,130	0,120	0,115
Бензин $k = 1,4$	$\eta_t$	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	$N_t$	171	206	223	233
	$G_t$	25,909769520			100 %
	$g_t$	0,152	0,126	0,116	0,111
Метан $k = 1,4$	$\eta_t$	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	$N_t$	171	206	223	233
	$G_t$	22,639364880			87,4 %
	$g_t$	0,132	0,102	0,102	0,097
Водород $k = 1,4$	$\eta_t$	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	$N_t$	171	206	223	233
	$G_t$	11,141434320			43,0 %
	$g_t$	0,065	0,054	0,050	0,048



**Рис. 3.** Графики изменения термического КПД от степени сжатия  $\epsilon$  и показателя адиабаты  $k$  циклов поршневых ДВС Отто и Карно

Практическая ценность метода заключается в выборе низшей теплоты сгорания топлив с разным химическим составом, позволяет системно и целенаправленно повышать основные термодинамические показатели поршневого ДВС на ранней стадии проектирования, табл. 1 и 2, рис. 5.

Анализ табл. 1 и 2, рис. 5 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) табл. 1 и 2;
- различные термодинамические показатели (часовой и удельный расход топлива) см. табл. 1 и 2;
- наибольшую топливную экономичность можно получить, при работе термодинамического поршневого ДВС Отто на метане и водороде, а наименьшую – на пылевидном углеродном топливе, рис. 5, табл. 1 и 2.

## 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 и дипломных проектов по специальности ДВС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика исследования и расчет термодинамических циклов поршневого ДВС с переменной степенью сжатия / Л. А. Захаров [и др.] // Сб. науч. тр. междунардн. студ. науч.-техн. конф. по техн. термодинамике для ДВС, посвященной 50-летию ЗФ НГТУ им. Р.Е. Алексева. НГТУ им. Р. Е. Алексева, 2010.
2. Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Отто, методом технической термодинамики: метод. указ. / Л. А. Захаров [и др.]; 2010. 33 с.
3. Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Карно, методом технической термодинамики: метод. указ. / Л. А. Захаров [и др.], 2010. 14 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Захаров Илья Львович**, докторант НГТУ. Дипл. инженер-исследователь (ВАХЗ, 1998). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (МГТУ «МАМИ», 2005). Иссл. рабочего процесса в бензиновых двигателях.

**Химич Владимир Леонидович**, проф., зав. каф. энергетическ. установок и тепловых двигателей НГТУ. Дипл. инженер по авиац. двигателям (КуАИ, 1962). Д-р техн. наук по газотурбинным двигателям (Ленинград, 1989). Иссл. в обл. тепловых энергетических установок.

**Захаров Лев Анатольевич**, проф. той же каф. Дипл. инженер (ГПИ, 1960). Д-р техн. наук по тепл. двигателям (НГТУ, 2000). Иссл. методов повышения техн.-экономическ. показателей ДВС.