

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОРШНЯ ДВС С ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

А. П. Марченко, В. В. Пылёв

В статье изложена методика моделирования трехмерного нестационарного высокочастотного температурного состояния теплоизолированного поршня, основанная на разбивке тела поршня на области трехмерной стационарной и одномерной нестационарной теплопроводности. Проанализированы тепловые потоки в поверхностном слое поршня. Подтверждена допустимость пренебрежения их составляющими, параллельными поверхности камеры сгорания. Рекомендовано выделение увеличенного количества зон задания граничных условий по поверхности камеры сгорания по отношению к стационарной задаче теплопроводности.

MODELING OF NONSTATIONARY HIGH-FREQUENCY TEMPERATURE STATE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE PISTON WITH A COATED COMBUSTION CHAMBER SURFACE

A. P. Marchenko, V. V. Pylyov

The simulation method of the three-dimensional nonstationary high-frequency temperature state of the coated piston is presented in the article. It is based on division of piston body to conventional zones of three-dimensional stationary and one-dimensional nonstationary heat conductivity. The piston surface layer heat flows are analyzed. The admissibility of neglecting their components been parallel to combustion chamber surface is confirmed. It is recommended to specify the larger amount of differing boundary conditions zones with respect to stationary heat transfer model.

УДК 621.436

В. А. Пылев, Р. Ариан

ОЦЕНКА ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ПОРШНЯ С УЧЁТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ В ЗОНЕ КРОМКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

На основе экспериментальных данных получены аналитические зависимости изменения температурного состояния поршня дизеля 4СН12/14 от нагрузки. Идентифицированы граничные условия задачи теплопроводности в осесимметричной и несимметричной постановках. Исследовано влияние учета выборок под клапаны в поршне на его температурное состояние и уровень термических напряжений в зоне кромки камеры сгорания.

Введение

Широкий опыт разработки, испытаний, эксплуатации двигателей различного назначения показывает, что перспектива их форсирования является крайне неблагоприятным фактором, определяющим работоспособность конструкции. При этом обеспечение заданного ресурса (ресурсной прочности) особо термонапряжённых зон деталей камеры сгорания (КС), прежде всего поршней высокофорсированных дизелей, является одной из важнейших задач, требующих своего решения в процессе проектирования двигателей либо их доводки и модернизации.

Задача расчетного исследования теплонапряженного состояния деталей КС, в частности поршней, на стадии их проектирования имеет большое значение. Это объясняется существенным возрастанием тепловых и механических нагрузок на эти детали и, соответственно, необходимостью перехода от концепции гарантированного обеспечения прочности на начальных стадиях проектирования к концепции работы деталей на пределе прочности. Для решения указанной задачи применяют метод

конечных элементов (МКЭ), а в качестве граничных условий (ГУ), как правило, используют ГУ 3-го рода [1-3].

Анализ исследований и публикаций

Расчеты теплонапряженного состояния поршней преимущественно выполняют для 3D-моделей с использованием осесимметричных, реже – и несимметричных ГУ [1-4]. В литературе рекомендуется идентификация состояния поршня на уровне 1-2 %. При температуре кромки 300 °С погрешность расчетов составляет 6К, что соизмеримо с эффектом масляного струйного охлаждения.

В [4] показана необходимость перехода к использованию несимметричных ГУ, что повышает достоверность оценок ресурсной прочности конструкции. Однако, тепловое состояние поршня также определяется его сложной конфигурацией. Поэтому результаты расчетов также зависят от детализации геометрической модели. Для поршня дизеля к такой детализации относят выборки под клапаны. Влияние последних на температурное состояние кромки КС практически не исследовано.

Цель работы

Исследование влияние учета выборок под клапаны в поршне на его температурное состояние и уровень термических напряжений в зоне кромки камеры сгорания.

Основная часть

Для достижения поставленной цели в работе на основе проведенного экспериментального исследования была выполнена идентификация температурного состояния поршня быстроходного дизеля 4ЧН12/14. Рассмотрены уровни форсирования двигателя 1,3 кВт (0,2 кВт/л), 37 кВт (5,85 кВт/л) и 74,5 кВт (11,77 кВт/л). Частота вращения коленчатого вала – 1800 мин⁻¹.

Поршень изготовлен из алюминиевого сплава АЛ25. На огневом днище выполнены выборки под клапана. На рис.1 представлены места размещения хромель-алюмелевых термопар. Термопары заглублены на 1 мм в тело поршня от его поверхности.

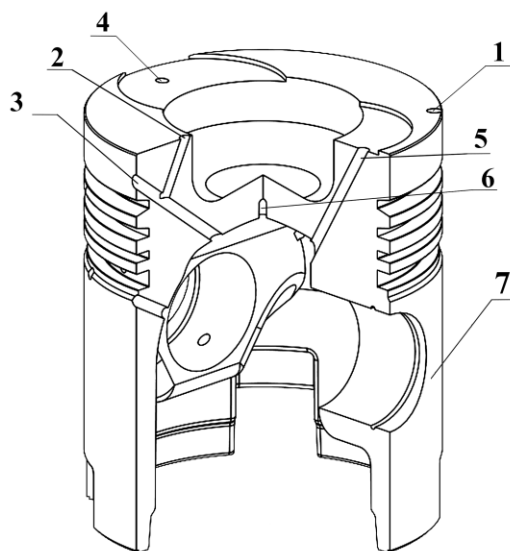


Рис.1. Места размещения термопар в поршне дизеля 4ЧН12/14

В целях прогнозирования температурного состояния поршня на более высоких уровнях форсирования двигателя результаты термометрирования были обработаны методом наименьших квадратов (МНК). Для каждой из зон поршня, в которых размещены термопары, получены следующие зависимости:

$$\text{точка 1} - t_{\text{тренда}} = 131,95 + 0,914 \cdot Ne \quad (1)$$

$$\text{точка 2} - t_{\text{тренда}} = 136,06 + 1,1835 \cdot Ne \quad (2)$$

$$\text{точка 3} - t_{\text{тренда}} = 115,05 + 0,6242 \cdot Ne \quad (3)$$

$$\text{точка 4} - t_{\text{тренда}} = 133,02 + 1,1126 \cdot Ne \quad (4)$$

$$\text{точка 5} - t_{\text{тренда}} = 124,85 + 1,1249 \cdot Ne \quad (5)$$

$$\text{точка 6} - t_{\text{тренда}} = 110,99 + 0,7152 \cdot Ne \quad (6)$$

$$\text{точка 7} - t_{\text{тренда}} = 87,513 + 0,2138 \cdot Ne \quad (7)$$

Сравнение результатов термометрирования с расчетными значениями температур, полученных с использованием выражений (1) -(7), представлены в таблице 1. Видно, что между экспериментальными и расчетными данными расхождения Δt практически отсутствуют. Соответствующие расчетным значениям линии тренда изображены на рис. 2. Здесь и далее экспериментальные значения температур во всех рассматриваемых зонах обозначены $t_{\text{эксп}}$, а расчетные с использованием МНК – $t_{\text{тренда}}$.

Полученные данные на втором этапе работ позволили применительно к осесимметричной задаче теплопроводности осуществить идентификацию граничных условий ГУ 3-го рода.

ГУ заданы по 24 зонам поршня, представленным на рис. 3. Использована уточненная геометрическая модель поршня, учитывающая выборки под клапаны (см. рис. 1).

Идентификация ГУ была осуществлена для режимов 1,3 кВт и 74,5 кВт. В первом приближении ГУ принимались по рекомендациям [1-3].

На основе полученных данных были установлены линейные зависимости ГУ от мощности двигателя, позволившие получить их значения для исследованного режима 37 кВт, а также установить прогнозируемое температурное состояние поршня для режима 150 кВт (23,7 кВт/л).

Сравнение экспериментальных результатов, обработанных МНК с расчетными трасч, полученных по МКЭ, представлены в таблице 2. Данные свидетельствуют о их хорошем совпадении во всех контрольных точках, кроме точек 4 и 5. Последнее объясняется несимметричностью реального температурного поля поршня.

В табл. 3 представлены аналогичные данные, полученные с использованием традиционной упрощенной геометрической модели конструкции, в которой отсутствуют выборки под клапана.

Таблица 1. Сравнение результатов экспериментального исследования и их обработки методом наименьших квадратов

№, кВт	Точка 1			Точка 2			Точка 3		
	тэксп, °C	ттренда, °C	Δt, °C	тэксп, °C	ттренда, °C	Δt, °C	тэксп, °C	ттренда, °C	Δt, °C
1,3	133,3	133,1	-0,2	137,7	137,5	-0,2	116	115,9	-0,1
37	165,6	165,8	0,2	179,8	179,9	0,1	138,2	138,2	0
74,5	200,1	200	-0,1	224,4	224,3	-0,1	161,7	161,7	0
	Точка 4			Точка 5			Точка 6		
1,3	136,1	134,5	-1,6	127,9	126,3	-1,6	112,1	111,9	-0,2
37	171,3	174,3	3	163,6	166,6	3	137,3	137,5	0,2
74,5	217,5	216	-1,5	210,3	208,8	-1,5	164,5	164,3	-0,2
	Точка 7								
1,3	88,1	87,8	-0,3						
37	95	95,4	0,4						
74,5	103,7	103,5	-0,2						

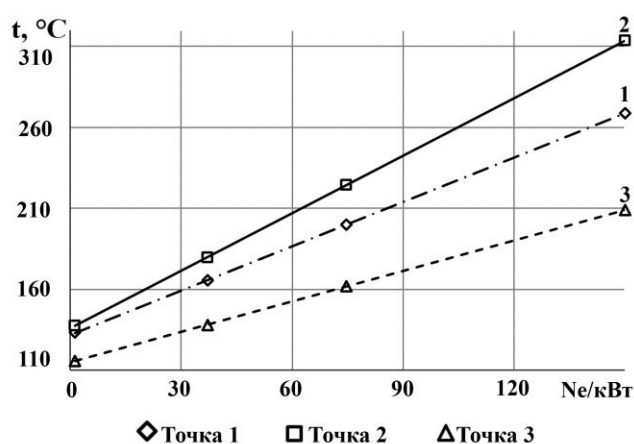


Рис.2. Изменение температурного состояния поршня от режима работы двигателя в основных контрольных точках

На основании представленных данных видно, что в контрольных точках поршня, в том числе и для кромки КС (точка 2) расхождения расчетов лежат в пределах 2 °C и не являются значимыми. Так даже для режима $N_e=150$ кВт в точке 2 на модели с выборками получено значение температуры

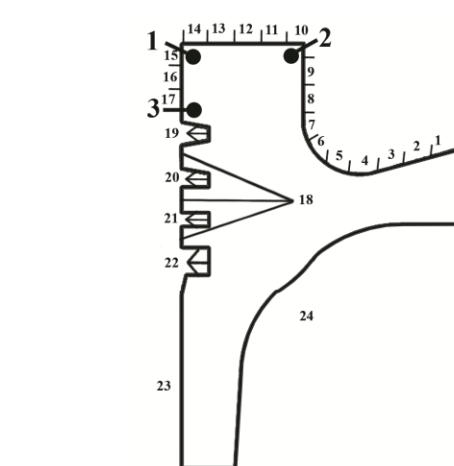


Рис.3. Схема задания ГУ 3-го рода поршня и основные контрольные точки анализа

316 °C, а при использовании упрощенной модели – 314 °C.

Однако следует отметить, что уточнение модели было выполнено только геометрическое, а ГУ теплообмена оставались симметричными.

Таблица 2. Сравнение экспериментального температурного состояния поршня с расчетным для уточненной геометрической модели поршня при использовании симметричных ГУ

№ точки	$N_e=1,3$ кВт			$N_e=37$ кВт			$N_e=74,5916$ кВт			$N_e=150$ кВт		
	трасч, °C	ттренда, °C	Δt, °C	трасч, °C	ттренда, °C	Δt, °C	трасч, °C	ттренда, °C	Δt, °C	трасч, °C	ттренда, °C	Δt, °C
1	133	133,1	-0,1	165	165,8	-0,8	200	199,9	0,1	271	268,6	2,4
2	144	137,6	6,4	184	179,9	4,1	228	224,3	3,7	316	313,5	2,5
3	116	115,9	0,1	138	138,2	-0,2	162	161,6	0,4	210	208,6	1,4
4	136	134,5	1,5	170	174,3	-4,3	208	208,8	-0,8	286	299,8	-13,8
5	135	126,3	8,7	169	166,6	2,4	207	216	-9,0	285	293,7	-8,7
6	114	111,9	2,1	139	137,5	1,5	168	164,3	3,7	225	218,2	6,8
7	85	87,8	-2,8	93	95,4	-2,4	104	103,5	0,5	119	119,6	-0,6

Таблица 3. Сравнение экспериментального температурного состояния поршня с расчетным для упрощенной геометрической модели поршня при использовании симметричных ГУ

№ точки	Ne= 1,3 кВт			Ne= 37 кВт			Ne= 74,5916 кВт			Ne= 150 кВт		
	трасч, °С	ттренда, °С	Δt, °С	трасч, °С	ттренда, °С	Δt, °С	трасч, °С	ттренда, °С	Δt, °С	трасч, °С	ттренда, °С	Δt, °С
1	132	133,1	-1,1	164	165,8	-1,8	199	199,9	-0,9	269	268,6	0,4
2	145	137,6	7,4	185	179,9	5,1	227	224,3	2,7	314	313,5	0,5
3	116	115,9	0,1	138	138,2	-0,2	162	161,6	0,4	210	208,6	1,4
4	137	134,5	2,5	173	174,3	-1,3	212	208,8	3,2	291	299,8	-8,8
5	137	126,3	10,7	173	166,6	6,4	212	216	-4,0	291	293,7	-2,7
6	114	111,9	2,1	139	137,5	1,5	168	164,3	3,7	225	218,2	6,8
7	85	87,8	-2,8	93	95,4	-2,4	104	103,5	0,5	119	119,6	-0,6

В связи с указанным на последующих этапах работ выполнена идентификация несимметричных ГУ в области КС и сравнение результатов термонапряженного состояния поршня для уточненной и упрощенной моделей.

В первом приближении несимметричные ГУ принимались по рекомендациям [4]. Основные результаты идентификации представлены в табл. 4. При этом видно, что в данном случае в зоне кромки КС в контрольной точке 2 расхождения температур на режиме $N_e = 150$ кВт достигли 4 °С и равны

316 °С для уточненной и 312 °С для упрощенной моделей.

В связи с вышеизложенным для рассматриваемых нами моделей определены значения температур и термических напряжений в зоне точек 1-3 в окружном направлении КС поршня. Схема размещения контрольных точек представлена на рис. 3. Результаты сканирования расчетных температур и термических напряжений в указанных точках для режима $N_e = 150$ кВт представлены в табл. 5.

Таблица 4. Сравнение экспериментального температурного состояния поршня с расчетным при использовании несимметричных ГУ

№ точки	Уточненная модель						Упрощенная модель					
	Ne= 37 кВт			Ne= 150 кВт			Ne= 37 кВт			Ne= 150 кВт		
	трасч, °С	ттренда, °С	Δt, °С	трасч, °С	ттренда, °С	Δt, °С	трасч, °С	ттренда, °С	Δt, °С	трасч, °С	ттренда, °С	Δt, °С
1	165	165,8	-0,8	275	268,6	2,4	165	165,8	-0,8	273	268,6	4,4
2	181	179,9	1,1	316	313,5	-3,5	181	179,9	1,1	312	313,5	0,5
3	137	138,2	-1,2	208	208,6	-0,6	137	138,2	-1,2	209	208,6	0,4
4	175	174,3	0,7	298	299,8	-1,8	178	174,3	3,7	303	299,8	3,2
5	169	166,6	2,4	294	293,7	0,3	171	166,6	4,4	298	293,7	4,3
6	135	137,5	-2,5	217	218,2	-1,2	135	137,5	-2,5	218	218,2	-0,2
7	165	165,8	-0,8	116	119,6	-3,6	95	95,4	-0,4	116	119,6	-3,6

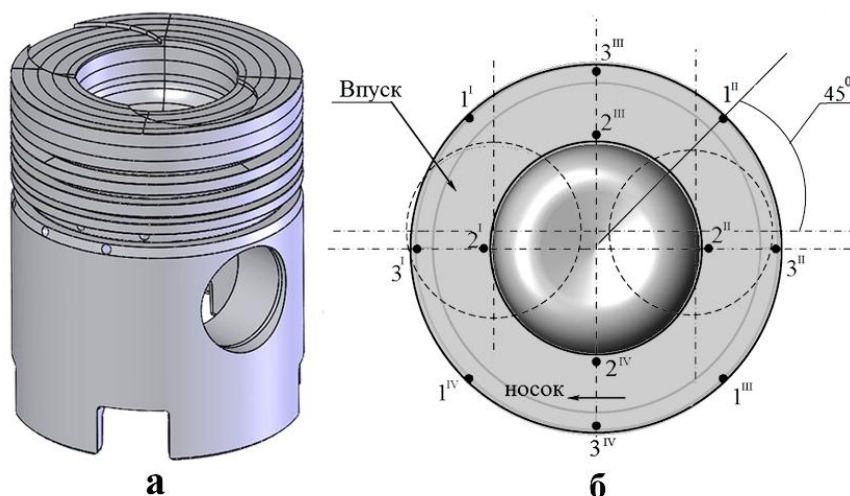


Рис. 3. Зоны задания несимметричных ГУ поршня (а) и контрольные точки анализа (б)

Таблица 5. Теплонапряженное состояние поршня при использовании несимметричных ГУ в области КС при Ne=150 кВт

№ точки	Уточненная модель			Упрощенная модель		
	трасч, °С	Δt, °С	σ, МПа	трасч, °С	Δt, °С	σ, МПа
1 ^I	285		18,2	283		14
1 ^{II}	275	6	15,0	273	4	16,8
1 ^{III}	256		16,2	254		17,0
1 ^{IV}	261		18,8	259		18,1
2 ^I	320		26,9	326		22,2
2 ^{II}	318		23,7	320		20,1
2 ^{III}	293		14,9	291		15,1
2 ^{IV}	316	2,5	21,4	312	-1,5	20,8
3 ^I	214		42,6	214		41,5
3 ^{II}	217		38,3	211		38,5
3 ^{III}	203		29,8	202		29,7
3 ^{IV}	208	-0,6	39,7	208	-1	37,1

Здесь величина Δt представляет собой разницу между расчетами по МКЭ

и зависимостям (1) -(3) в зонах размещения термопар.

Из табл. 5 видно, что в точке 2^I температура поршня при использовании уточненной модели равна 320 °С, а при упрощенной – 326 °С. С учетом Термические напряжения соответственно равны 28,6 МПа и 25,2 МПа. Таким образом, использование общепринятой упрощенной геометрической модели завышает уровень действующих температур и занижает уровень термических напряжений.

Выводы.

На основе экспериментальных данных получены аналитические зависимости изменения температурного состояния поршня дизеля 4ЧН12/14 от нагрузки. На этой основе идентифицированы ГУ задачи теплопроводности в осесимметричной и несимметричной постановках.

Исследовано влияние учета выборок под клапаны в поршне на его температурное состояние и

уровень термических напряжений в зоне кромки КС.

Установлено, что использование упрощенной геометрической модели поршня приводит к изменению уровня действующих температур и занижению термических напряжений. Переход к уточненным несимметричным ГУ увеличивает расхождение расчетных результатов.

Дальнейшее направление работ связано с учетом окружной неравномерности ресурсной прочности кромки КС поршня.

Список литературы:

1. Процессы в перспективных дизелях / [А.Ф. Шеховцов, Ф.И. Абрамчук, В.И. Крутов и др.]; под. ред. А.Ф. Шеховцова. – Х.: Изд-во "Основа", 1992. – 352с. 2. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / [Ф.И. Абрамчук, А.П. Марченко, Н.Ф. Разлейцев, Е.И. Третьяк, А.Ф. Шеховцов, Н.К.Шокотов]; под. ред. А.Ф. Шеховцова. – К: Техника, 1992. – 272с. 3. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності. Монографія. / В.О. Пильов – Видавничий центр НТУ „ХПІ”, 2001. – 332 с. 4. Матвеевко В.В. Результати оцінки ресурсної міцності поршня автотракторного дизеля при учете локального теплообмена в камері сгорання / В.В. Матвеевко, В.А. Пылёв, А.В. Матюха // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. №2. – С.

Bibliography (translited):

1. Processes in perspective diesel / [A.F. Shekhovtsov, F.I. Abramchuk, V.I. Krutov et al.]; a. Ed. A.F. A.F. Shekhovtsov. - H.: Publishing House of the "Base", 1992. - 352s. 2. Modern diesel engines: increased tidal top efficiency and long-term strength / [F.I. Abramchuk, A.P. Marchenko, N.F. Razleytsev, E.I. Tretyak, A.F. Shekhovtsov, N.K. Shokotov]; a. Ed. A.F. Shekhovtsov. - By: Technology, 1992. - 272s. 3. Pylyov V.O. 3. Pylyov V.A. Computer-aided design piston speed diesel engines with a specified level of long mitsno's. Monograph. / V.A. Pylyov - of a publication whose center-NTU "HPI", 2001. - 332 p. 4. Matvienko V.V. Results of evaluation of the resource strength piston Autotractor diesel engine, taking into account local heat transfer in the combustion chamber / VV Matvienko, V.A. Pylyov, A.V. Matyukha // Internal combustion engines. - 2011. №2. - FROM.

Поступила в редакцию 08.07.2015 г.

Пылёв Владимир Александрович – доктор техн. наук, профессор, и.о. зав. кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: pylyov@meta.ua.

Ариан Расул – аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: rasoul_arguan@yahoo.com.

ОЦІНКА ТЕПЛОНАПРУЖЕННЯ ПОРШНЯ З УРАХУВАННЯМ ЙОГО КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ В ЗОНІ КРОМКИ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ

В. О. Пильов, Р. Ариан

На основі експериментальних даних отримано аналітичні залежності зміни температурного стану поршня дизеля 4ЧН12/14 від навантаження. Ідентифіковано граничні умови задачі теплопровідності в осесиметричної і несиметричною постановках. Досліджено впливав-ня обліку вибірок під клапани в поршні на його температурний стан і рівень термічних напружень в зоні кромки камери згорання.

EVALUATION THERMAL STRESS PISTON TAKING INTO ACCOUNT ITS CONSTRUCTIVE ESPECIALLY IN THE ZONE EDGES COMBUSTION CHAMBER

V. A. Pylyov, R. Aryan

Based on experimental data, analytical depending changes of diesel piston temperature state 4CHN12/14 on the load. It identified the boundary conditions of heat conduction problem and axially symmetric asymmetric productions. We investigated the influence of the accounting-sampling valves for the piston on its thermal condition and level of thermal stresses in the edge of the combustion chamber.

УДК 621.436

В.А. Пылев, С.А. Кравченко, И.А. Нестеренко**ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА В ЗОНЕ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ ПОРШНЯ ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Проанализированы способы задания граничных условий для поршней транспортного дизеля. Предложен вариант упрощения задания граничных условий в зоне поршневых колец с целью упрощения расчета переходного процесса нагружения двигателя на начальных стадиях проектирования. Произведена оценка влияния предложенного варианта задания граничных условий на температурное состояние поршня и его ресурсную прочность.

Введение

Неизменной тенденцией совершенствования транспортных дизелей является увеличение их удельной мощности, которая за последние 30 лет возросла более, чем в 1,5 раза. При этом показатели надежности, в том числе долговечность, рассматриваются как критические для перспективных конструкций. Повышенное внимание к этим критериям поясняется соотношением 1:1 между затратами на топливо и обслуживания транспортного средства [1].

Применительно к поршню здесь имеет место проблема растрескивания кромки камеры сгорания (КС) которая, по общему мнению специалистов связана с существенной нестационарностью режимов работы двигателя в условиях эксплуатации [2, 3].

В связи с указанным в целях прогнозирования и поиска путей повышения ресурса кромки КС необходимой является задача моделирования процесса повреждаемости материала поршня в процессе длительной нестационарной эксплуатации двигателя. Эта задача может быть решена с учетом разработанного в НТУ «ХПИ» программного комплекса «Ресурс» [4, 5].

Исходными данными для его применения является температурное состояние поршня в исследуемой зоне в переходном процессе нагружения двигателя. В свою очередь, решение задачи нестационарной низкочастотной аperiодической теплопроводности поршня требует задания переменных во времени граничных условий (ГУ). Определение последних, особенно на начальных стадиях проек-

тирования двигателя, является самостоятельной сложной научно-технической задачей.

Анализ публикаций

Для определения температурного состояния поршня наиболее часто используют ГУ 3-го рода. При этом можно выделить четыре основные зоны задания ГУ, представленные на рис. 1 [4]. Основными здесь являются зоны I и III.

В [2,6] нестационарное температурное состояние поршня предлагается определять с использованием сложных законов задания управляющих функций граничных условий. Указанные законы устанавливались на основе экспериментальных данных. Поэтому их можно считать эффективным инструментом анализа конструкций в первую очередь при их доводке.

В [7] нами рассмотрен подход к упрощенному заданию ГУ в зоне I. Поэтому представляет интерес рассмотрение влияния заданных ГУ в зоне III на температурное состояние и ресурсную прочность кромки КС (см. т.1 на рис.1).

Известно, что использование ГУ 3-го рода предполагает задание коэффициента теплоотдачи в соответствующей области поверхности теплообмена и температуры среды. Значения коэффициентов теплоотдачи для канавок каждого из колец α_{III} хорошо известны. Возможно их задание вне зависимости от режима работы двигателя. В то же время условная температура среды в зоне колец T_{III} существенно зависит от режима нагружения двигателя и влияет на результаты расчетов [2,4,6]. В этой связи возникает задача допустимого упрощения задания ГУ 3-го рода в зоне кольцевого пояса поршня на начальных стадиях проектирования.