

УДК 621.43.016.4

*А.П. Марченко, д-р техн. наук, В.А. Пылев, д-р техн. наук,
В.В. Шпаковский, канд. техн. наук, В.В. Пылев, студ.*

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МГНОВЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ТЕПЛОИЗОЛИРУЕМОГО ПОРШНЯ ДВС

Достаточно длительный период одним из перспективных направлений развития двигателестроения является реализация комплекса научно-технических решений, обеспечивающих улучшение топливной экономичности дизелей за счет использования теплоизоляции камеры сгорания (КС). Обнадеживающими данными, несмотря на всю сложность проблемы и общепризнанную незавершенность теоретических разработок, здесь можно считать снижение расхода топлива, полученное на частичных режимах работы двигателя Г.Вошни [1], позитивный эффект, установленный по всей нагрузочной характеристике А.К. Костиным [2], аналогичные результаты ряда других экспериментальных работ.

При этом практически все исследователи оценку уровня теплоизоляции КС ведут относительно предельного адиабатического состояния, как такого, при котором между рабочим телом и стенками КС теплообмен отсутствует [3-5].

На практике известны два основных варианта конструктивного приближения к теоретическому „адиабатному” двигателю. Первый основан на использовании стенки КС как регенеративного теплового аккумулятора, воспринимающего теплоту от рабочего тела в процессе сгорания и возвращающего ее в период наполнения цилиндра. В числе очевидных недостатков этого предложения обязательно указывается на неизбежный существенный подогрев поступающего свежего заряда и, соответственно, уменьшение коэффициента наполнения [5].

Второй вариант – динамическая изоляция КС, наоборот, основан на максимальном уменьшении аккумулирующего действия стенки с целью прибли-

жения ее температуры к температуре рабочего тела. Такая изоляция для случая предельного адиабатического состояния определяется величиной термической инертности материала $TT = \lambda \rho c \rightarrow 0$ [5]. Последнее условие означает, что реальное приближение к термически безинерционным свойствам стенок КС предполагает применение материалов с минимально возможным коэффициентом теплопроводности.

Величины коэффициента термической инертности TT для ряда материалов и воздуха, соответствующие условиям, характерным КС дизеля, представлены в табл.1.

Таблица 1 – Характеристика термической инертности материалов деталей КС и воздуха

Материал	$TT, \text{кг}^2/(\text{К}^2\text{с}^5)$
Поршневой сплав АЛ25 [3]	$3,90 \cdot 10^8$
Серый чугун [4,5]	$1,94 \cdot 10^8$
Серый чугун [3]	$1,76 \cdot 10^8$
Al_2O_3 [6]	$7,63 \cdot 10^6$
ZrO_2 [4]	$4,54 \cdot 10^6$
Воздух [4]	$1,09 \cdot 10^3$

Из таблицы видно, что значения TT для оксидов алюминия и циркония, как возможных теплоизоляторов КС, являются низкими лишь относительно, далеко не приближаясь к идеальному случаю.

По этой причине использование низкотеплопроводных материалов, хотя и приводит к росту амплитуды поверхностной температурной волны, но в недостаточной степени снижает регенеративный теплоаккумулирующий эффект стенок КС. Подтверждением сказанному являются выполненные нами

сравнительные расчеты для исходной стенки из поршневого сплава АЛ25 и модернизированной, с корундовым покрытием толщиной 1 мм. Постановка задачи и граничные условия теплообмена соответствовали данным работы [6]. При этом установлено, что использование указанного покрытия ведет к увеличению амплитуды поверхностной температурной волны в 11,3 раза, с 11К до 124К. Одновременно минимальная температура исследуемой поверхности в цикле нестационарного высокочастотного теплообмена возрастает на 56К, с 298°С до 354°С. Аналогичные результаты для чугунного поршня, снабженного теплозащитным слоем из диоксида циркония толщиной 2 мм приведены в [5].

В связи с вышеизложенным, обязательным направлением исследований, сопровождаемым созданием конструкций с частичной динамической теплоизоляцией КС, является поиск путей снижения регенеративного теплоаккумулирующего эффекта стенок. Установление условий, обеспечивающих снижение указанного эффекта, является целью данной работы.

Ясно, что реализация уменьшенного теплоотвода от поверхности КС к рабочему телу должна предполагать его увеличение в стенку. В работе [6] нами показано, что при использовании низкотеплопроводного покрытия минимальная температура стенки может иметь более низкие значения, чем высокотеплопроводная стенка без покрытия. При этом в [7] установлено, что указанный эффект наблюдается в случае, когда толщина покрытия не превышает глубину проникновения в стенку температурной волны.

В связи с этим задачей представленной работы является исследование распределения тепловых потоков в стенке по ее глубине и по углу поворота коленчатого вала двигателя.

С учетом общепринятых в ДВС допущений исследовано одномерное температурное состояние неограниченной пластины. Постановка задачи нестационарной теплопроводности соответствует данным работы [6] и в силу обобщающего характера получаемых результатов здесь не приводится.

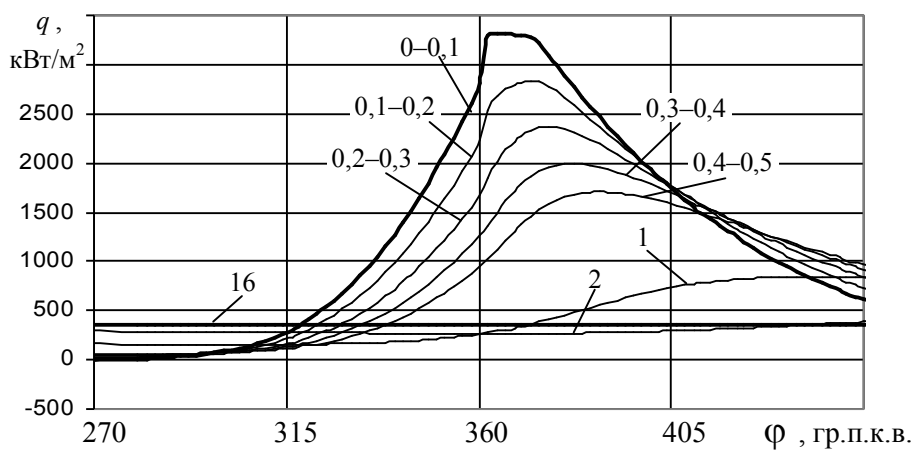
Рассмотрены следующие характерные варианты решаемой задачи:

1. Монометаллическая высокотеплопроводная стенка (исходный вариант, материал – сплав АЛ25).
2. Случай двуслойной конструкции, предполагающей наличие низкотеплопроводного покрытия на высокотеплопроводной стенке (Al_2O_3 –АЛ25). Толщина покрытия – 0,25 мм, что соответствует варианту проникновения высокочастотной температурной волны в высокотеплопроводный материал.
3. То же, для толщины покрытия 0,35 мм, как варианта практически полного гашения температурной волны в низкотеплопроводном материале.

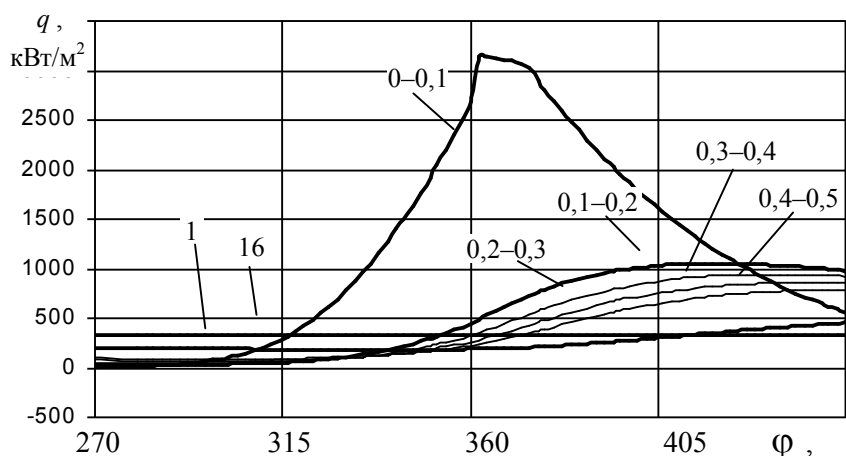
Распределение значений температур и величин тепловых потоков по глубине стенки определялось на расчетной сетке с шагом 0,1 мм.

На рис.1 представлено пространственно-временное поле тепловых потоков для указанных вариантов конструкций в диапазоне углов от 270 до 450 гр. п.к.в.

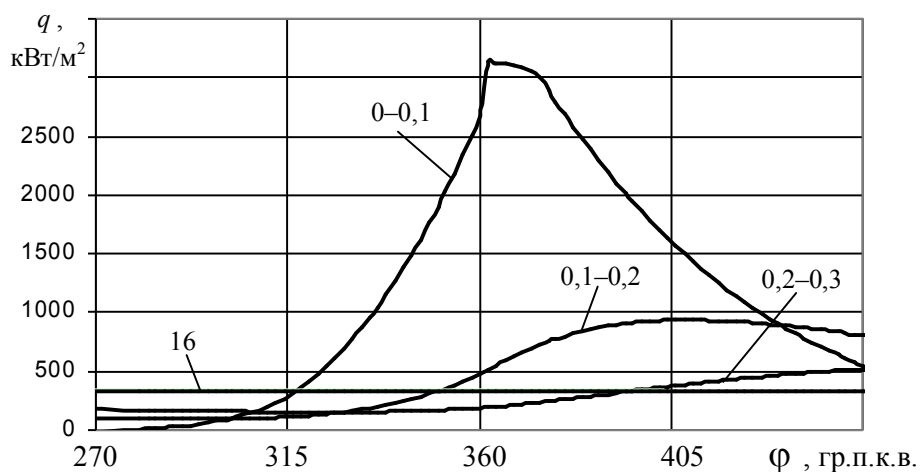
Сравнение рисунков 1а и 1в свидетельствует, что вблизи 360 гр. п.к.в. имеет место качественно различное распределение величин тепловых потоков. Так для случая высокотеплопроводной стенки плотность линий теплового потока достаточно высока. Здесь в поверхностном слое толщиной 0,5 мм величина теплового потока уменьшается в 1,2–1,25 раза на каждые 0,1 мм исследуемой глубины. При этом полное гашение колебания теплового потока имеет место на глубине до 3 мм от тепловоспринимающей поверхности стенки.



а



б



в

Рис. 1. Пространственно-временное представление тепловых потоков в поверхностном слое стенки КС при $\varphi = 270-450$ гр. п.к.в.:
 а – исходная стенка из сплава АЛ25; б – стенка с покрытием Al_2O_3 толщиной 0,25 мм;
 в – стенка с покрытием Al_2O_3 толщиной 0,35 мм;
 цифры у кривых – исследуемая глубина стенки, мм

Для случая теплоизолированной поверхности уже на глубине 0,1 мм имеет место снижение теплового потока в 3,1 раза, а полное гашение волны теплового потока достигается при глубине на порядок меньшей и равной 0,3 мм.

Таким образом, первый из рассмотренных вариантов можно считать примером реальной теплоаккумулирующей стенки, а второй – реальной динамически теплоизолированной. Тогда промежуточный вариант, который соответствует рис. 1б, представляет собой сочетание динамической теплоизоляции поверхности с теплоаккумулирующими свойствами поверхностного подслоя.

На рис. 2 представлены соответствующие расчетные результаты для участка от 0 до 270 гр.п.к.в. При этом следует обратить внимание на данные рис. 2а. Здесь с глубины 0,1 мм, несмотря на известный подогрев заряда в цилиндре, линии теплового потока характеризуется высокой плотностью, а тепловой поток имеет направление вглубь стенки. Последнее свидетельствует о малом регенеративном эффекте стенки и, как следствие, о сохранении теплоаккумулирующего эффекта в поверхностном подслое. Последнее можно объяснить низким значением TT для воздуха (см. табл.1), для которого при теплоподводе от стенки должны проявляться свойства динамического теплоизолятора.

При наличии на поверхности стенки покрытия из Al_2O_3 толщиной 0,25 мм пространственно-временное поле тепловых потоков качественно остается неизменным при общем росте уровня потока в стенку (см. рис. 2б). Однако, уже при толщине покрытия 0,35 мм дальнейшее общее увеличение теплового потока сопровождается резким разрежением его линий. Таким образом, на рассматриваемом отрезке углов п.к.в. в тепловоспринимающей части низкотеплопроводного поверхностного слоя также имеет место эффект динамической теплоизоляции.

В целом на основе данных о пространственно-

временном распределении тепловых потоков в теле стенки КС (рис.1 и 2) можно заключить, что усиление динамической теплоизоляции стенки в случае ее снабжения низкотеплопроводным покрытием может быть достигнуто за счет сохранения высокой теплопроводности материала в той части поверхностного слоя, тепловой поток в котором на такте наполнения имеет направленность в тело стенки.

Рассмотрим два характерных временных сечения распределения тепловых потоков (рис. 3) и температур (рис.4) в поверхностном слое стенки. Эти сечения соответствуют углам 370 и 40 гр. п.к.в. Здесь на каждом уровне глубины x каждый первый, второй и третий столбики диаграммы обозначают соответственно первый, второй и третий варианты решаемой задачи. Сопоставление рис. 3а и рис. 4а свидетельствует, что увеличение перепада тепловых потоков по глубине стенки приводит к росту ее поверхностной температуры. Так для третьего варианта расчета, при толщине покрытия 0,35 мм имеет место наибольший перепад тепловых потоков и наибольший заброс температуры поверхности стенки. Первый расчетный вариант, как стенка без покрытия, существенно уступает второму и третьему.

С другой стороны, из рис. 3б видно, что на представленном временном сечении на глубине 0-0,1 мм осредненный тепловой поток практически равен нулю, а далее в материале стенки имеет место теплоподвод. При этом наибольший перепад тепловых потоков по глубине стенки соответствует третьему варианту расчета, при толщине покрытия 0,35 мм. Наименьший перепад – второму варианту, при толщине 0,25 мм.

Соответственно, из рис. 4б видно, что наибольшая просадка температуры поверхности стенки соответствует второму расчетному варианту, а наименьшая – третьему.

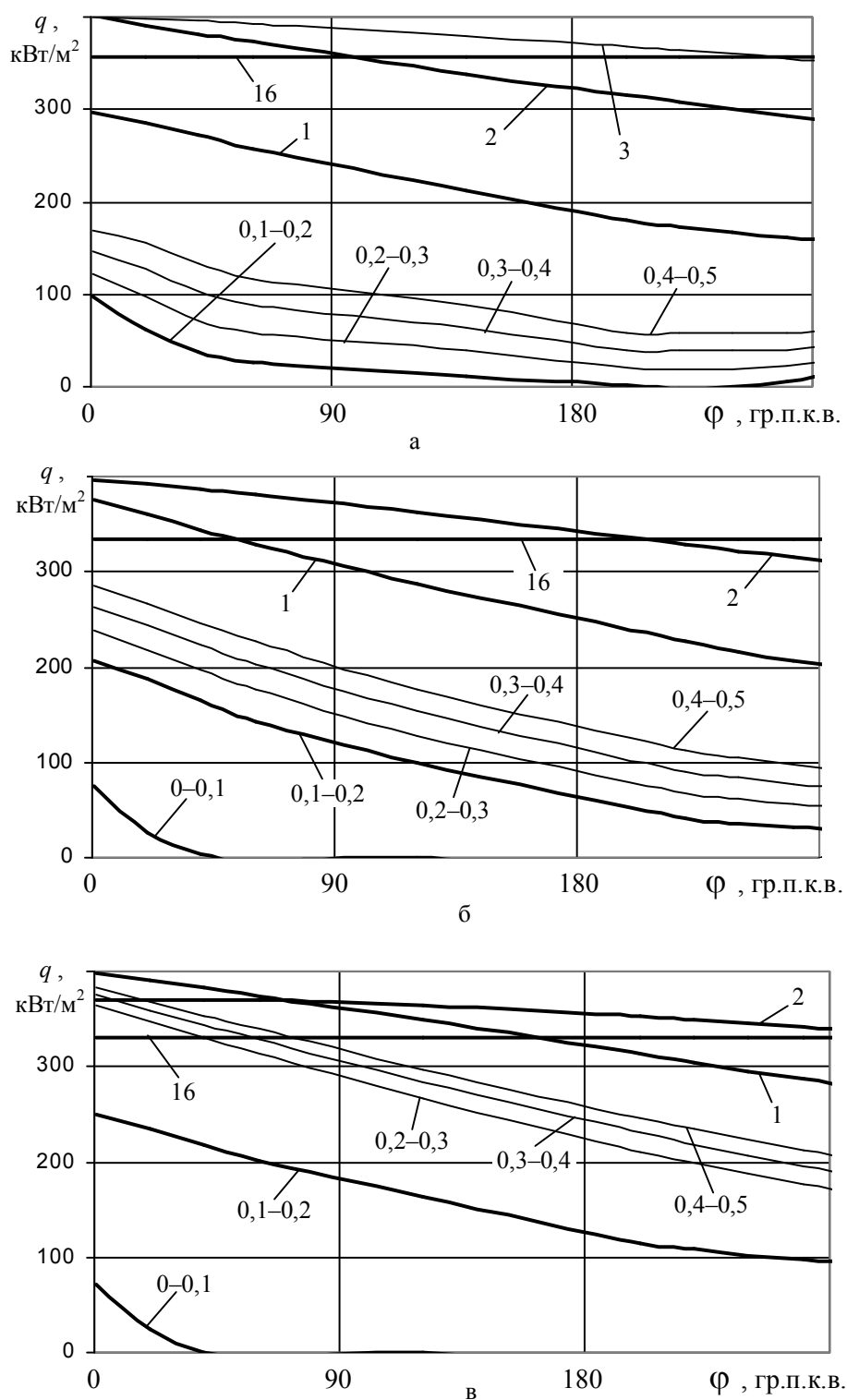


Рис. 2. Пространственно-временное представление тепловых потоков в поверхностном слое стенки КС при $\phi = 0-270$ гр. п.к.в.:

а – исходная стенка из сплава АЛ25; б – стенка с покрытием Al_2O_3 толщиной 0,25 мм; в – стенка с покрытием Al_2O_3 толщиной 0,35 мм; цифры у кривых – исследуемая глубина стенки, мм

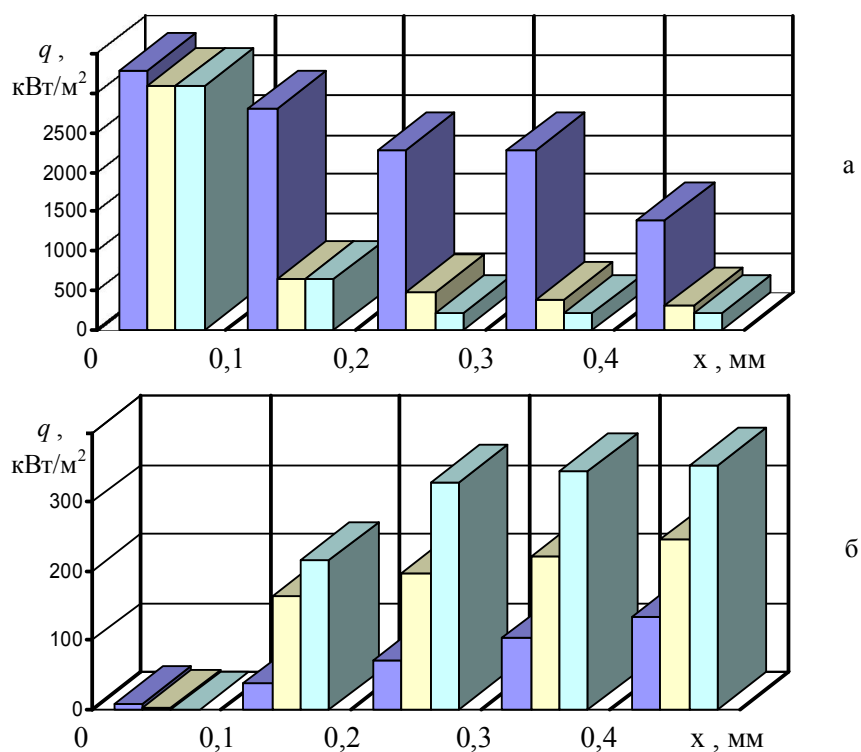


Рис. 3. Пространственное распределение тепловых потоков в поверхностном слое стенки КС при $\varphi = 370$ (а) и $\varphi = 40$ гр. п.к.в. (б)

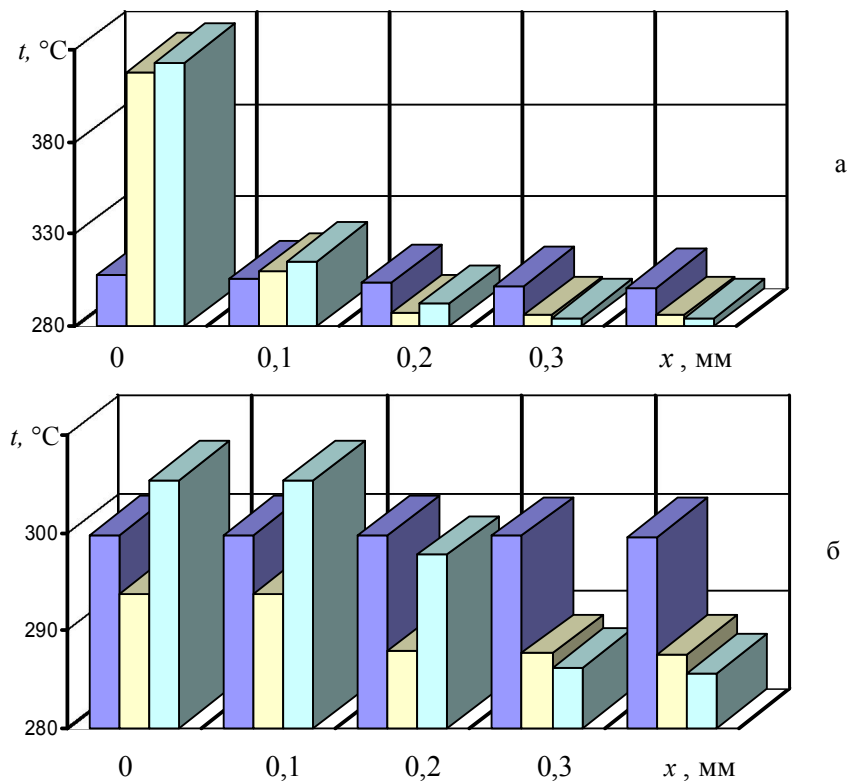


Рис. 4. Пространственное распределение температур в поверхностном слое стенки КС при $\varphi = 370$ (а) и $\varphi = 40$ гр. п.к.в. (б)

Таким образом, второй расчетный вариант следует считать наилучшим. Однако при сопоставлении данных рис. 3а и 3б следует обратить внимание на противоречивость требований максимального перепада тепловых потоков для участка сгорания-расширения и минимального перепада в период наполнения. Указанные требования относятся к различным временным координатам для неизменной пространственной. При этом изменение параметров теплозащитного покрытия, приводящие к увеличению просадки температуры в период газообмена, влекут снижение заброса температуры в период сгорания, и наоборот. Последнее означает, что задача выбора параметров указанного покрытия в общем случае должна решаться как компромиссная, с учетом влияния мгновенного температурного состояния стенки КС на рабочий процесс двигателя.

Выводы:

1. На основе данных о пространственно-временном распределении тепловых потоков в стенке КС установлено, что при использовании низкотеплопроводного покрытия поверхности стенки может быть достигнуто дополнительное усиление динамической теплоизоляции КС за счет сохранения высокой теплопроводности материала в той части поверхностного слоя, тепловой поток в котором на такте наполнения имеет направленность в тело стенки.

2. На этой основе выполнено уточнение рекомендуемой толщины теплоизолирующего покрытия, при котором минимальная мгновенная температура стенки с покрытием имеет более низкие значения, чем высокотеплопроводная стенка КС без покрытия.

Толщина такого покрытия не должна превосходить глубину динамического теплоизолирующего слоя стенки на участке наполнения цилиндра.

3. Показано, что установление оптимальной толщины теплоизолирующего покрытия поршня в общем случае должно осуществляться на основе решения компромиссной задачи с учетом температурного состояния поверхности КС и показателей рабочего процесса двигателя.

Дальнейшее направление работ связано с уточнением полученных количественных результатов на основе уменьшения расчетного шага численного эксперимента.

Список литературы:

1. *Woschni G. Experimental investigation of the heat transfer in internal combustion engines with insulated combustion chamber walls // Heat and mass transfer in gasoline and diesel engines, 1987. – 13 p.*
2. *Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов В.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. – Л.: Машиностроение, 1979. – 222 с.*
3. *Процеси в перспективних дизелях / Под ред. Шеховцова А.Ф. – Харків: Основа, 1992. – 352 с.*
4. *Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2001. – 592 с.*
5. *Grot K., Thiemann W. Beitrag zur Brennraumisolierung bei Viertakt Dieselmotoren // Motortechnische Zeitschrift. – 1983. – P. 287-298.*
6. *Марченко А.П., Пылев В.А., Шпаковский В.В., Пылев В.В. Эффект влияния малых толщин теплозащитного покрытия поршня на его мгновенную поверхностную температуру // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей. Матер. XI Междунар. научн.-практ. конф. – Владимир: ВГУ, 2008. – С. 220-223.*
7. *Марченко А.П., Пылев В.О., Шпаковский В.В., Пылев В.В. Аналіз високочастотних коливань температури в поверхневому шарі поршня з теплоізолюючим покриттям // Двигатели внутреннего сгорания, 2008. –№1. – С.65-71.*