

МАЛОЗАТРАТНЫЙ ЭКОЛОГИЧНЫЙ ДИЗЕЛЬ С ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ

LOW-COST, ECO-FRIENDLY DIESEL WITH A THERMALLY INSULATED COMBUSTION CHAMBER

В.Г. МЕРЗЛИКИН^{1,2}, к.т.н.
А.Р. МАКАРОВ³, к.т.н.
С.В. СМИРНОВ³, к.т.н.
А.В. КОСТЮКОВ¹, к.т.н.
МАРКОС ОХЕДА ГУТИЕРРЕС⁴, к.т.н.

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия

² Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

³ Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

⁴ Tablet School Company, Latacunga, Ecuador, merzlikinv@mail.ru, a-r-makarov@ya.ru, smirnof61@mail.ru, marcosgutierrezojeda@yahoo.com

V.G. MERZLIKIN^{1,2}, PhD in Engineering
A.R. MAKAROV³, PhD in Engineering
S.V. SMIRNOV³, PhD in Engineering
A.V. KOSTUKOV¹, PhD in Engineering
MARCOS OJEDA GUTIERREZ⁴, PhD in Engineering

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

² Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

³ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

⁴ Tablet School Company, General Maldonado y Belisario Quevedo, Latacunga, Ecuador, merzlikinv@mail.ru, a-r-makarov@ya.ru, smirnof61@mail.ru, marcosgutierrezojeda@yahoo.com

Эффективность работы дизеля изучалась с использованием хорошо известных типов керамических теплоизолирующих НИС- или термобарьерных ТВС-покрытий. Эта проблема актуальна для дизеля с низкими тепловыми потерями камеры сгорания, в которой интенсивная лучистая компонента (в ближнем ИК-диапазоне) достигает ~ 50 % от суммарного теплового потока. В данной работе авторы продолжили изучения этих покрытий, но как полупрозрачных (SHICs или STBCs) с объемным поглощением проникающей лучистой энергии. Проведенное спектрофотометрическое моделирование оптических параметров этих покрытий позволило оценить характеристики формируемого температурного поля с уменьшенным приповерхностным градиентом температуры (в сравнении с непрозрачными покрытиями), обуславливающего существенное снижение потерь тепла через теплоизолируемый поршень. Было выбрано полупрозрачное STBC-покрытие на основе частично стабилизированного диоксида циркония (PSZ-керамика $ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$), определяющее формирование оптимального температурного профиля в головке поршня. Для стендовых испытаний был использован экспериментальный одноцилиндровый тракторный дизель. При частоте вращения $n > 2800$ 1/мин тепловые потери не превышали 0,2 МВт/м² через днище поршня с теплозащитным слоем. Выполненные испытания показали более низкий удельный расход топлива на ~ 2–3 % в сравнении с камерой сгорания дизеля с непокрытым керамикой поршнем. При этом крутящий момент и эффективная мощность возросли на ~ 2–5 %.

Ключевые слова: полупрозрачное теплоизолирующее (термобарьерное) покрытие, рассеяние, поглощение, подповерхностный лучистый нагрев, дизель с низкими тепловыми потерями.

The performance of a diesel engine has been studied using well-known types of ceramic thermal insulating HIC or thermal barrier TBC coatings. This problem is relevant for a diesel engine with low thermal losses of the combustion chamber, in which the intense radiant component (in the near-IR range) reaches ~ 50 % of the total heat flow. In this paper, the authors continued to study these coatings, but as translucent (SHICs or STBCs) with bulk absorption of penetrating radiant energy. The spectrophotometric modeling of the optical parameters of these coatings made it possible to estimate the characteristics of the temperature field being formed with a reduced near-surface temperature gradient (compared to opaque coatings), causing a significant decrease in heat loss through the heat-insulated piston. A translucent STBC coating based on partially stabilized zirconia (PSZ ceramics $ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$) was chosen, determining the formation of the optimum temperature profile in the piston head. For bench testing was used experimental single-cylinder tractor diesel. With a rotation frequency of $n > 2800$ 1/min, the heat loss did not exceed 0,2 MW/m² through the bottom of the piston with the heat-shielding layer. The tests performed showed a lower specific fuel consumption of ~ 2–3 % in comparison with the combustion chamber of a diesel engine with an uncoated ceramic piston. At the same time, torque and effective power increased by ~ 2–5 %.

Keywords: translucent heat insulating (thermal barrier) coating, scattering, absorption, subsurface radiant heating, diesel with low heat losses.

Введение

Исследование относится к фундаментальным разработкам нового поколения дизельных двигателей с камерой сгорания с низкими тепловыми потерями, обуславливающими рост ее эффективности и возможность снижения концентрации токсичных компонентов выпускных газов.

Одним из традиционных направлений инновационных разработок последних десятилетий является внедрение теплозащитных материалов и покрытий камеры сгорания, обеспечивающих снижение и управление внешним теплоотводом. Но существенным недостатком остается интенсивная генерация токсичных диоксидов азота с ростом температуры теплоизолированных стенок камеры сгорания. По мнению авторов работы, данная проблема не решалась в должной мере автоинженерами в России [1–4] и за рубежом [5–10] из-за игнорирования влияния лучистой компоненты теплового потока на тепловой режим теплоизолированных стенок камеры сгорания и ее газового объема.

Тогда исследуемые до сих пор керамические покрытия как непрозрачные теплоизолирующие HICs- (heat-insulating – российская терминология) или термобарьерные TBC- (thermalbarriercoatings – принятое за рубежом название) покрытия должны рассматриваться как полупрозрачные SHICs (semitransparent heatinsulatingcoatings) покрытия.

Цель и объект исследования

Снижение тепловых потерь, теплонапряженности дизеля с контролируемым загрязнением окружающей среды с использованием модельных полупрозрачных термобарьерных покрытий (на основе частично стабилизированного диоксида циркония PSZ-керамики $ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$), формирующих управляемый приповерхностный градиент температуры внутренних стенок (головки поршня) камеры сгорания с улучшенными теплоэнергетическими и топливными характеристиками с апробацией при стендовых испытаниях одноцилиндрового дизеля ТМЗ-450Д с теплоизолированным днищем поршня.

Методы тенденции исследования дизелей с низкими тепловыми потерями

Современные тенденции развития двигателестроения, а именно форсирование дви-

гателей по частоте вращения и среднему эффективному давлению приводят к росту теплонапряженности основных их деталей и, в первую очередь, деталей цилиндропоршневой группы. Проблемы оптимизации теплового состояния деталей дизеля, обеспечения их безотказности и долговечности находятся в центре внимания ученых и инженеров. Одним из путей снижения тепловой нагруженности деталей является теплоизоляция их с помощью керамических покрытий.

Однако, как показали исследования многих авторов, теплоизоляция камеры сгорания дизеля не всегда приводит к росту его эффективности и улучшению экологических показателей [1–10].

Интенсивные исследования теплоизоляции камеры сгорания дизелей с применением керамических покрытий были приостановлены с конца XX столетия. Одной из основных проблем, вставших перед разработчиками, являлся эффект неуправляемого перегрева внутренних теплоизолированных стенок камеры сгорания, что приводило к увеличению температуры, растрескиванию покрытий, их низкой работоспособности, недолговечности и неприемлемому росту генерации токсичных компонентов выпускных газов, прежде всего диоксидов азота. При этом не было достигнуто необходимое увеличение коэффициента полезного действия дизеля, достаточного для промышленного внедрения. А высокий приповерхностный градиент температуры теплоизоляции стимулировал, тем не менее, значительные тепловые потери [11–14].

Но применение современных подходов к оптимизации рабочего процесса при высоких температурах стенок, а также новых технологий и материалов при конструировании камеры сгорания позволяет добиться существенного снижения тепловых потерь рабочего тела и позволит продолжить на новом качественном уровне исследования фундаментальных проблем разработок камер сгорания дизелей и турбин, корпусных элементов аэрокосмических объектов [15–23].

Так, посредством создания вихревого движения заряда в цилиндре можно добиться эффекта внутренней адиабатизации камеры сгорания и снизить конвективную составляющую теплового потока на 30–40 %. Но влияние лучистой компоненты по-прежнему еще мало изучено, хотя подобные разработки для ди-

зелей были начаты в середине прошлого века пионерскими работами советских и немецких ученых [24–26].

Подобная проблема стала актуальной для разработок камер сгорания турбин, в которых доля излучения достигает 30 % [22]. В камерах сгорания дизелей лучистая компонента оказывает еще большее влияние на сложный теплообмен, так как может достигать ~50 % от общего теплового потока [11, 25, 26].

Решение проблемы влияния лучистой компоненты теплового потока и ее управления может быть выполнено на основе применения полупрозрачных керамических покрытий с известными оптическими и терморрадиационными свойствами [27], начиная с ранних работ в в последней трети прошлого столетия [28].

В связи с этим изучение полупрозрачных теплоизолирующих покрытий камер сгорания дизелей является насущной задачей.

Объемные эффекты рассеяния и поглощения лучистой энергии в полупрозрачных покрытиях позволяют снизить их поверхностную температуру, предотвратить перегрев камеры сгорания и уже на новом качественном уровне решать задачи адиабатизации рабочего процесса дизеля, повышения его коэффициента полезного действия, а также улучшения мощностных и экономических показателей [20–22].

В традиционных исследованиях сложного теплообмена и лучистого теплопереноса для элементов теплозащиты стенок камер сгорания дизелей [11–14] и турбин, лопаток авиационных турбин [17–19], корпусов аэрокосмических аппаратов [29–32], ловушек перегретого теплоносителя ядерного реактора [33] обычно требуется рассмотреть воздействие интегрального теплового потока с учетом вклада проникающей лучистой компоненты в коротковолновом диапазоне длин волн $\sim 1\text{--}2$ мкм в нагрев теплоизолирующих и теплозащитных покрытий. Применяемые керамические теплоизолирующие покрытия являются частично прозрачными для указанного лучистого воздействия. Но, как правило, этим эффектом пренебрегают [1–14], хотя применение таких покрытий становится актуальным, исходя уже из тенденций развития концепций аналогичной теплозащиты в других упомянутых выше областях науки и техники.

При разработках нового поколения быстроходных дизелей, например, на конференциях международного союза автоинженеров

SAE [22, 34] не раз формулировались фундаментальные направления достижения сверхстандартов при эксплуатации дизелей, направленные на уменьшение расхода топлива и снижение токсичности выпускных газов. Традиционные способы решения этих задач за последние 20 лет начинают себя исчерпывать. Необходимо обратить внимание на внедрение полупрозрачных теплоизолирующих материалов и покрытий на их основе, отличительной чертой которых является объемный лучистый прогрев, механизм которого исследуется на протяжении десятилетий, например, при разработках теплозащиты ракетно-космических объектов при входе в плотные слои атмосферы [29–32].

В РФ наиболее успешные практические разработки по применению керамических теплозащитных покрытий были проведены Федеральным государственным унитарным предприятием «Московское машиностроительное производственное предприятие «Салют», позволившие уже несколько лет выпускать авиационные газотурбинные двигатели с лопатками, теплоизолированными многослойными керамическими покрытиями на основе стабилизированного диоксида циркония [35]. Разработчикам удалось внедрить полупрозрачное керамическое покрытие эмпирическим путем без анализа лучистого теплообмена.

Задача создания огнезащитных материалов была решена специалистами МГТУ им. Н.Э. Баумана путем полуаналитических оценок характеристик лучистого теплообмена [36].

В США подобные задачи решаются в различных исследовательских центрах. Наиболее близко к решению поставленных задач подошли в специалисты NASA [17, 18].

Интенсивные исследования ведутся в ФРГ в институтах Bavarian Centre of Applied Energy Research, German Aerospace Center, Institute of Materials Research, сотрудники которых также определили фундаментальные направления исследования полупрозрачных керамических покрытий, разработали теоретическую методику, выполнили экспериментальные измерения оптико-теплофизических параметров наиболее перспективного покрытия на основе стабилизированного диоксида циркония для лопаток и лопастей турбин [19].

Научная концепция применения полупрозрачных покрытий для теплоизолированных камер сгорания дизелей формировалась в

МГТУ «МАМИ» с 2004 г., основные направления разработок в которой были предложены в патентах РФ, начиная с 2004 [20], № 2323357 (2008), № 2410196 (2011), включающие как указание на требуемые характеристики покрытий, так и способы их формообразования. Была показана возможность регулирования температуры внутренних граничных стенок камеры сгорания ДВС с нанесенными полупрозрачными покрытиями, обоснованная также в публикациях ряда авторов [15, 16, 21, 22, 37].

Из-за отсутствия оптических моделей теплообмена или данных по оптическим и терморadiационным характеристикам в традиционных исследованиях при изучении радиационно-конвективного воздействия ограничивались эффективным теплообменом только на облучаемой поверхности без анализа прогрева устройства проникающим излучением [1–14]. Это не позволяло провести корректную оценку терморadiационных и, следовательно, температурных полей.

Авторы в своих предшествующих разработках использовали физико-математическую модель радиационно-кондуктивного нагрева полупрозрачных покрытий как оптически неоднородных материалов с комплексными методами диагностики их теплофизических и оптических характеристик на промышленной и лабораторной экспериментальной аппаратуре для оценки показателей поглощения и рассеяния, обуславливающих функцию теплового источника при решении нелинейных задач лучистого теплопереноса [15, 16, 34, 37].

Физико-математическая модель процессов лучистого теплообмена в камере сгорания быстроходных дизелей

Разработанные методы и способы оценки характеристик радиационных и температурных полей позволяют теоретически и экспериментально определить их характеристики в подповерхностной области облучаемых полупрозрачных материалов. Экспериментальные спектрофотометрические измерения коэффициентов отражения и пропускания плоских образцов полупрозрачных теплоизолирующих SHIC-покрытий позволяют определить значения показателей рассеяния, поглощения, индикатрисы рассеяния и коэффициента собственного излучения. Эти данные являются исходными для вычисления функции теплово-

го источника для расчета локального подповерхностного перегрева различного рода теплоизолированных технических объектов.

Вводимые оптические параметры рассматривались зависящими от спектра излучения для коротковолнового диапазона длин волн $\lambda \sim 0,7\text{--}2$ мкм. Для теплоизолирующих полупрозрачных SHIC- и непрозрачных HIC-покрытий при различных оптических и терморadiационных характеристиках теплофизические свойства принимались одинаковыми.

В данной работе рассматривается одномерная двухслойная модель материала в виде металлической подложки с нанесенным слоем теплоизолирующего полупрозрачного (непрозрачного) покрытия. Данное покрытие исследуется в условиях эксплуатации теплоизолированной камеры сгорания быстроходного дизеля с частотой вращения не менее 3000 мин⁻¹.

Ранее проведенные исследования двигателей показали, что если температура внутренних стенок камеры сгорания увеличивается в 2 раза, то из-за изменения толщина пограничного слоя коэффициент теплоотдачи увеличивается в 5 раз. В связи с этим изучение полупрозрачных теплоизолирующих покрытий в камере сгорания дизелей сосредоточивается на исследовании их влияния на поверхностную температуру деталей, в частности головки поршня. При частичной прозрачности SHIC-покрытий существенно меняются терморadiационные поля и формируемые температурные профили в их подповерхностном объеме.

Решение системы дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности и лучистого теплопереноса, с учетом суммарного коэффициента теплоотдачи, показывает, что поверхностная температура полупрозрачных материалов ниже, чем у непрозрачных, и умеренно выше для незащищенных покрытием металлов (рис. 1).

На рис. 1 показаны расчетные температурные профили модельной металлической плоско-параллельной подложки без поверхностной теплоизоляции (кривая 1) и в присутствии полумиллиметровых теплоизолирующих слоев непрозрачной (кривая 3–3') и полупрозрачной (кривая 2–2') керамик.

Проникающее излучение, безусловно, снижает термобарьерные характеристики полупрозрачных покрытий и ухудшает изоляционную способность покрытия. Но собственное поверхностное тепловое излучение в длинно-

волновой области 2–5 мкм вызывает снижение температуры поверхности и обуславливает или уменьшение температурного градиента (показано на рис. 1 – кривая 2–2'). Для оптически неоднородных покрытий более значительной толщины от нескольких миллиметров в зависимости от теплофизики процессов сложного теплообмена для различных полупрозрачных сред может наблюдаться смещение максимума температуры с поверхности в глубину полупрозрачного покрытия с расширением подповерхностной зоны объемного лучистого нагрева [26–31].

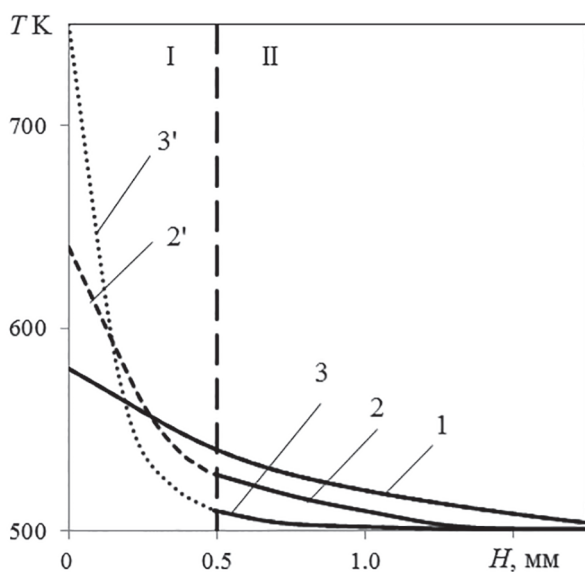


Рис. 1. Модельные расчетные распределения температуры в незащищенной (кривая 1, слой металла без покрытия для областей I и II) и теплоизолированной (керамический слой – I на металле – II) алюминиевой плоской подложке с модельным керамическим слоем толщиной 0,5 в виде: непрозрачного НИС-покрытия, кривая 3, 3', полупрозрачного SHIC-покрытия, кривая 2, 2' с показателями поглощения $\kappa = 14 \text{ м}^{-1}$ и рассеяния $\sigma = 2400 \text{ м}^{-1}$

Указанный эффект вызывается селекцией структуры покрытия как интеллектуального материала, согласованной по максимуму рассеяния проникающего излучения, что обеспечивает контроль и управление тепловым режимом подповерхностной зоны покрытия (его подложки), а также интенсивно изменяющейся газовой атмосферой в камере сгорания.

Непрозрачные покрытия представляют материалы, для которых излучение раскаленных частиц сажи внутри камеры сгорания не про-

никает внутрь теплоизолированных стенок. Эта терморрадиация в основном поглощается, за исключением незначительного поверхностного рассеяния и небольшой доли, отражаемой по закону Френеля. В данной работе для непрозрачного керамического покрытия НИС (кривая 3–3') поверхностный коэффициент отражения принимался равным $\sim 20\%$. Непрозрачное покрытие представляет собой материал с теми же известными теплофизическими характеристиками, как и полупрозрачное SHIC (кривая 2–2').

Для стендовых испытаний дизеля типа ТМЗ-450Д образец полупрозрачного покрытия SHIC был выбран со следующими характеристиками, экспериментально измеренными с помощью серийного спектрофотометра. При незначительном показателе поглощения $\kappa = 14 \text{ м}^{-1}$, но высоком показателе рассеяния $\sigma = 2400 \text{ м}^{-1}$ в ближней инфракрасной области спектра. Коэффициенты отражения составляют $\sim 40\%$ для тонких (0,5 мм) и $\sim 90\%$ для толстых слоев.

Для анализа различия температурных профилей непрозрачного и полупрозрачного покрытий в камере сгорания дизеля имели место следующие условия взаимодействия, $q_0 = 1,8 \text{ МВт/м}^2$ с долей излучения $\sim 50\%$. Температура газовой атмосферы принималась постоянной $T_A(t) = 800 \text{ К}$. Коэффициент турбулентной теплоотдачи $\alpha_T = 3000 \text{ МВт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Начальная температура $T_0 = 500 \text{ К}$. Время воздействия постоянного теплового импульса – длительностью 0,01 с при синфазном лучистом и конвективном воздействии. Облучаемая поверхность в длинноволновой области рассматривается как черное тело. Тыльная поверхность металлической подложки теплоизолирована.

Проведенные расчеты подтвердили [1, 25]: температура поверхности полупрозрачного покрытия SHIC (кривая 2–2') ниже, чем для непрозрачного покрытия НИС (кривая 3–3'), и умеренно выше, чем для неизолированной металлической подложки (кривая 1). Применение непрозрачной керамики увеличивает температуру поверхности головки поршня на 100–200 К, стимулируя образование оксидов азота зачастую с нежелательным режимом конвективно-лучистого теплопереноса в камере сгорания. В этих условиях керамическое покрытие может также разрушиться из-за формирующегося большого подповерхностного градиента температуры.

Таким образом, тепловой режим полупрозрачного покрытия является более подходящим и может контролироваться изменением только оптических параметров за счет специфического структурирования (как интеллектуального материала), например выбора преобладающей ориентации рассеивающих частиц керамического слоя. В этом случае коэффициент теплопроводности практически не изменится. Предлагаемое физическое моделирование оптимальной структуры SHIC должно способствовать требуемому терморегулированию камеры сгорания, предотвращению ее перегрева и лучшему самовоспламенению топлива.

Подтверждением результатов положительного влияния теплоизоляции камеры сгорания на рабочий процесс дизеля и его индикаторные показатели является применение полупрозрачного покрытия из окиси алюминия толщиной 0,25 мм, полученные при испытании дизеля Ч13/14 [15] и в более поздней работе с имитатором дизеля [2].

Расчет удельных тепловых потоков на поверхности стенок камеры сгорания по формуле Ананда (рис. 2), проведенный по результатам его исследования, показывает уменьшение интегральных тепловых потерь от рабочего тела в процессах сгорания и расширения.

В то же время наблюдается интенсификация процесса сгорания вблизи ВМТ, уменьшение догорания на линии расширения, что, в конечном итоге, приводит к снижению удельных расходов топлива и увеличению индикаторного КПД. Видно, что при использовании полупрозрачной теплоизоляции максимальное значение теплового потока возникает за счет повышения температуры рабочего тела при

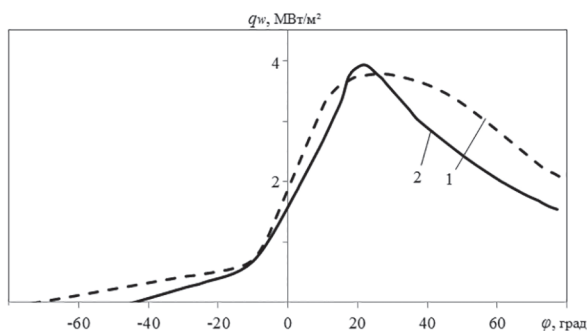


Рис. 2. Потери теплоты от рабочего тела дизеля Ч 24/36 через незащищенное днище поршня (кривая 1) и покрытого полупрозрачной теплоизоляцией на основе окиси алюминия (кривая 2)

угле поворота коленчатого вала до 20°. Также наблюдаются потери теплоты от рабочего тела при отсутствии полупрозрачной теплоизоляции в более широкой области (35–80° коленчатого вала после сгорания). Эти потери теплоты происходят во время хода расширения, где тепло от процесса сгорания превращается в полезную работу.

Экспериментальное исследование дизеля с использованием полупрозрачной теплоизоляции

В работе проведена экспериментальная оценка механических, теплоэнергетических характеристик и расхода топлива одноцилиндрового дизеля воздушного охлаждения ТМЗ-450Д в составе штатного моторного стенда (табл. 1).

Было проведено сравнение характеристик при работе базового дизеля с поршнем без теплоизоляции и с нанесенным плазменным способом полупрозрачным SHIC-покрытием толщиной 0,5 мм на основе PSZ-керамик (рис. 3).

Таблица 1

Основные показатели и параметры тракторного дизеля ТМЗ-450Д

Показатели и параметры двигателя	Единица измерения	Значение показателя
Количество цилиндров и их расположение		1, вертикальное
Ход поршня / диаметр цилиндра	мм	80/85
Рабочий объем двигателя	дм ³	0,454
Степень сжатия		20
Номинальная частота вращения вала	мин ⁻¹	3600
Номинальная мощность	кВт (л.с.)	8,0 (11,0)
Уд. расход топлива на номинальном режиме	г/кВт·ч	не более 280
Масса сухая без навесных агрегатов	кг	55±1



Рис. 3. Поршень дизеля ТМЗ-450Д без теплоизоляции (а) и с керамическим покрытием на основе $ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$ (б)

Выбор этого дизеля был обусловлен высокой чувствительностью быстроходных двигателей воздушного охлаждения к качеству применяемых теплоизолирующих материалов. Испытания проводились на моторном стенде, оснащённом специальным оборудованием и необходимыми приборами [39].

Как показано на рис. 4–7, наиболее лучший результат получается при высоких оборотах двигателя – от 2800 до 3400 1/мин.

Это объясняется тем, что сгорание топлива происходит практически полностью вблизи ВМТ, так как поверхностная температура теплоизолированных стенок, поршня камеры сгорания выше, чем для незащищённых элементов.

Это способствует благоприятным условиям самовоспламенения топлива и сокращению его время сгорания, что согласуется с экспериментальными наблюдениями в работах Р.З. Кавтарадзе, указывающими на процесс газификации нагара сажи для высокооборотных дизелей [18].

Проведённые авторами экспериментальные исследования рабочего процесса дизеля ТМЗ-450Д и математическое моделирование его рабочего процесса с использованием поршня с теплоизолирующей PSZ-керамикой и без нее показали снижение суммарных тепловых потерь в камере сгорания на 16 % при приемлемом уровне поверхностной температуры днища поршня. Это привело к улучшению мощностных (рис. 6) и экономических (топливных) (рис. 7) показателей дизеля.

Заключение

В статье обсуждена актуальная для дизелеостроения проблема, связанная с влиянием лучистой компоненты раскалённых частиц сажи в камере сгорания дизеля с низкими тепловыми потерями на температурный режим те-

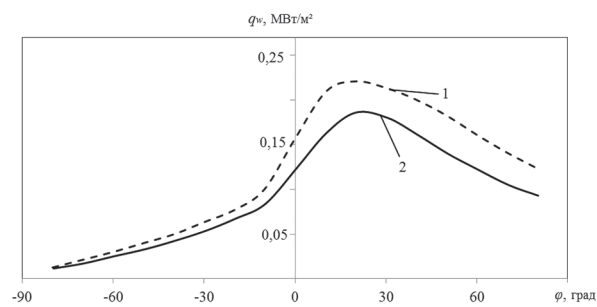


Рис. 4. Экспериментально измеренные тепловые потери через огневое днище незащищенного поршня (1) и покрытого полупрозрачной керамической теплоизоляцией (2) в камере сгорания одноцилиндрового дизеля ТМЗ-450Д

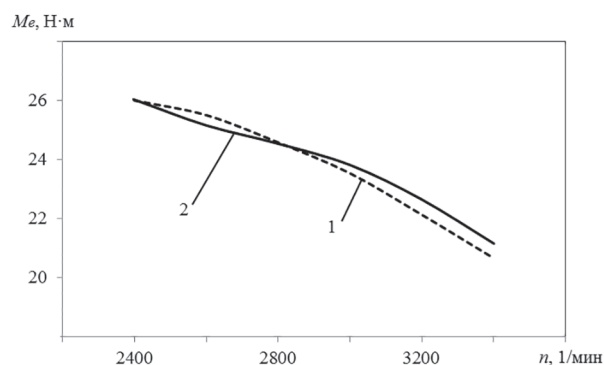


Рис. 5. Изменение крутящего момента $M_e(n)$ (обозначения кривых на рис. 4)

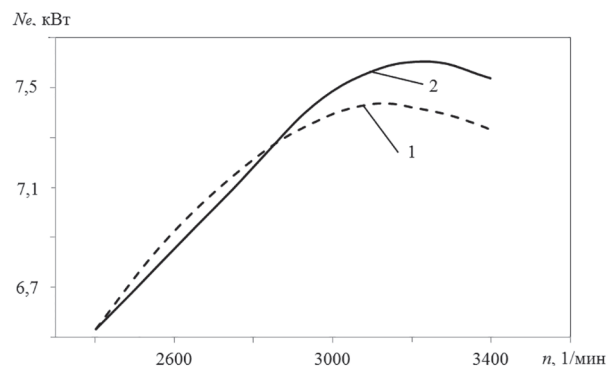


Рис. 6. Изменение эффективной мощности $N_e(n)$ (обозначения кривых на рис. 4)

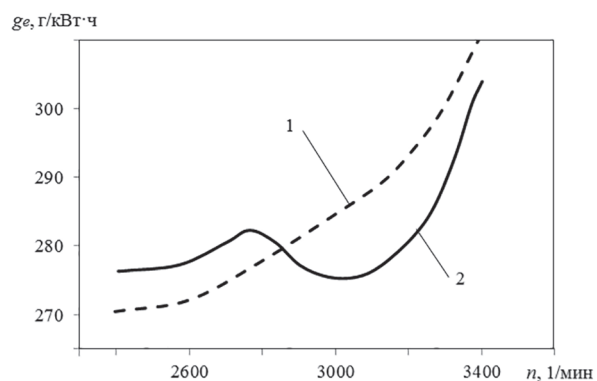


Рис. 7. Удельный эффективный расход топлива $g_e(n)$ (обозначения кривых на рис. 4)

плоизолирующего полупрозрачного покрытия поршня.

Использованная физико-математическая модель позволяет описать процессы рассеяния и поглощения теплового излучения в полупрозрачных покрытиях камер сгорания для прогнозирования и контроля температуры ее внутренних стенок в зависимости от оптимального соотношения оптических и теплофизических характеристик.

Эксплуатация экологичной и эффективной теплоизолированной камеры сгорания может осуществляться при контроле температуры ее поверхности с полупрозрачным керамическим покрытием SHIC с толщиной слоя до $\sim 0,5$ мм с оптическими характеристиками: коэффициенте отражения полубесконечного слоя $\sim 70\text{--}90\%$, показатели поглощения $k \sim 1\text{--}20 \text{ м}^{-1}$ и рассеяния $\sigma \sim 100\text{--}3000 \text{ м}^{-1}$ в коротковолновом интервале ближнего ИК-спектра, а также коэффициенте собственного излучения $\epsilon \sim 0,98$ в длинноволновом интервале $2\text{--}5$ мкм при скоростях более 2800 1/мин.

Установлено расчетно-теоретическими методами снижение максимальной температуры поверхности днища поршня при использовании полупрозрачных покрытий по сравнению с непрозрачными, что позволяет прогнозировать будущую долговечность покрытия вследствие снижения градиента температуры у его поверхности (рис. 1).

Разработанная методика расчета процессов лучистого теплообмена в камере сгорания дизеля с полупрозрачным керамическим покрытием была апробирована при выборе полупрозрачной теплоизолирующей PSZ-керамики ($\text{ZrO}_2 + 8\% \text{ Y}_2\text{O}_3$) для экспериментальных испытаний одноцилиндрового тракторного дизельного двигателя ТМЗ-450Д (см. рис. 3) с потерями тепла не более $0,20 \text{ МВт/м}^2$ (рис. 4).

Подтверждено в натурном эксперименте, что применение полупрозрачной керамики на днище поршня позволяет на 16% уменьшить потери теплоты рабочего тела, что приводит к улучшению эксплуатационных характеристик до $\sim 3\text{--}5\%$, повышению крутящего момента (рис. 5), эффективной мощности (рис. 6) и соответствующему уменьшению удельного эффективного расхода топлива (рис. 7).

Технология нанесения полупрозрачных теплоизолирующих покрытий для внутренних стенок камер сгорания дизелей с низкими тепловыми потерями должна основываться на

специфическом селективном структурном составе (с определенным распределением пор по размерам, выявляемых с помощью спектрофотометрической диагностики), который формируется при определенном режиме плазменного или другого способа напыления. Это позволит сформировать оптимальные терморadiационные и температурные поля, вызывающие образование в рассеивающем объеме полупрозрачной керамики контролируемого подповерхностного температурного профиля для управления приповерхностным градиентом температуры в условиях сложного теплообмена с интенсивной лучистой компонентой в спектральном диапазоне $0,8\text{--}2$ мкм.

Проблема увеличения долговечности керамических покрытий остается важной темой разработок в моторостроении и турбостроении. Но современные технологии нанесения покрытий позволяют напылять керамические покрытия, например, с переменным по толщине и комбинированным структурным составом различных керамических оксидов [40].

Последние зарубежные исследования также подтверждают начало интенсивных разработок керамических покрытий, связанных, прежде всего, с применением новых технологических способов структурирования покрытий [41–45]. Так, автор одного из обзоров [42] подтверждает начало интенсивных разработок термобарьерных покрытий TBCs в мировой автомобильной промышленности: «Исследования по снижению расхода потребляемого топлива в двигателях внутреннего сгорания и технологические инновации продолжаются. Сегодня прилагаются существенные усилия по повышению эффективности двигателя путем модификации его конструкции, например, параллельно с разработкой передовой технологии нанесения керамических покрытий. Применение самих керамических покрытий в двигателях внутреннего сгорания стремительно растет».

Существенным достоинством представленной работы является включение в комплексное рассмотрение сложного теплообмена влияния оптических свойств теплоизолирующих покрытий, что пока не стало одной из основных методологий указанных разработок в России и за рубежом.

Предлагаемые полупрозрачные керамические материалы и покрытия находят свое применение и будут, несомненно, востребованы в различных областях науки и техники, включая

разработки автоиндустрии, аэрокосмической отрасли, судостроения, при решении задач терморегулирования ловушек атомных реакторов, в биологии, медицине, а также могут быть использованы как модификации искусственного теплозащитного покрова для управления и контроля тепловым состоянием ряда природных, гляциальных и водных сред.

В автоиндустрии возможно повторить технологический прорыв в разработках теплоизолирующих покрытий, подобный разработкам керамической (композитной) теплозащиты, термобарьерных покрытий TBCs аэрокосмических аппаратов, осуществленный в прошлом столетии [29–32].

Литература

1. Онищенко Д.О., Панкратов С.А., Смирнов А.Ю. Влияние частичной теплоизоляции камеры сгорания дизеля на теплоотдачу в систему охлаждения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. №. 3 (108). С. 81-89. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-81-89.
2. Дударева Н.Ю., Кальщиков Р.В., Домбровский О.П., Бутусов И.А. Экспериментальное исследование теплового состояния днища поршня ДВС с теплозащитным слоем, сформированным методом микродугового оксидирования // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. Т. 5. С. 115–125. DOI: 10.7463/0515.0774148.
3. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А., Кадыров С.М., Арипджанов М.М. Расчетно-экспериментальное исследование влияния теплоизоляции поршня и гильзы на образование оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 4. С. 83–102.
4. Carmona D.D.V. Thermal barrier coatings for efficient combustion. Master's Degree in Materials Sc. & Eng., School of Ind. Eng. & Manag., KTN Campus. Stockholm. 2014. 96 p.
5. Uchida N., Osada H. A new piston insulation concept for heavy-duty diesel engines to reduce heat loss from the wall. SAE Int. J. Engines. 2017. Vol. 10. Iss. 5. P. 2565–2575. DOI: 10.4271/2017-24-0161.
6. Ciniviz M., Salman M.S., Canl E., Kuse H., Solmaz Ç. Ceramic coating applications and research fields for ICEs // Ceramic Coatings – App. in Engineering. 2012. P. 195–234.
7. Azadi M.A. A review of the effects on diesel engine performance and components lifetime // Int. J. of Autom. Eng. 2013. Vol. 3. P. 305–317.
8. Das D., Majumdar G., Sen R.S., Ghosh B.B. Evaluation of combustion and emission characteristics on diesel engine with varying thickness of PSZ coated piston crown // Int. J. of Innovative Research in Sci., Eng. and Tech. 2013. Vol. 10.
9. Sankar V. Thermal barrier coatings material selection, method of preparation and applications – a review // Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. 2014. P. 510–517.
10. Ciniviz M., Salman M.S., Canl E., Kuse H., Solmaz Ç. Ceramic coating applications and research fields for ICEs // Ceramic Coatings – App. in Engineering. 2012. P. 195–234.
11. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 472 с.
12. Костин А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. Ленинград: Машиностроение. 1979.
13. Бажайкин А.Н. Характеристики воспламенения и горения топливной струи в теплоизолированных камерах сгорания // Двигателестроение. 1992. № 1–3. С. 7–9.
14. Rakopoulos C.D., Giakoumis E.G. Diesel engine transient operation principles of operation and simulation analysis / E-ISBN 978-1-84882-375-4, Springer-Verlag London Limited. 2009. 390 p.
15. Merzlikin V., Gutierrez M.O., Sidorov O., Amel'mkov A. Regulation of the combustion chamber walls temperature with semitransparent heat insulating coatings. 8th Int. Conf. on Engines for Automobile. Capri – Naples, Italy. Paper Offer Number № 2007-24-0031.
16. Merzlikin V.G., Parshina S.A., Garnova V.Yu., Bystrov A.V., Makarov A.R., Khudyakov S.V. Rig test of diesel combustion chamber with piston coated optically simulated semitransparent PSZ-ceramic. 13th Int. Conf. on Engines and Vehicle. ICE2017, 10-14 September 2017, Capri-Naples, Italy. Paper Offer Number 17ICE-0103 /2017-24-0129. DOI: 10.4271/2017-24-0129.
17. Wang, L., Eldridge J.I., Guo S.M. Comparison of different models for the determination of the absorption and scattering coefficients of TBCs. Acta Materialia. 2014. Vol. 64. P. 402-410. DOI: org/10.1016/j.actamat.2013.10.053.
18. Siegel R. Internal radiation effects in zirconia thermal barrier coatings. AIAA J. Thermophysics Heat Trans. 1996. Vol. 10 (4). P. 707–709.
19. Manara J., Arduini-Schuster M., Rdtzer-Scheibe H.-J., Schulz U. Infrared-optical properties and heat transfer coefficients of semitransparent thermal barrier coatings. Surface and Coatings Technology.

2009. Vol. 203 (8). P. 1059-1068. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.09.033.
20. Мерзликин В.Г., Товстоног В.А. Теплоизолирующее покрытие элементов и/или узлов камеры сгорания дизельного двигателя. Патент РФ № 2240430. 2004.
 21. Мерзликин В.Г., Гутьеррес М. Охеда. Безделкин В.В., Сидоров О.В., Сутугин В.Г. Полупрозрачная теплоизоляция для адиабатного дизеля (новая концепция) / Автомобильная промышленность. 2007. № 7. С. 34–36.
 22. Merzlikin V., Timonin V., Gutierrez Ojeda M., Sidorov O. New selectively absorbing and scattering heat-insulating coatings of the combustion chamber for LHR diesel // SAE Technical Paper 2007-01-1755. 2007.
 23. Dannecker R., Noll B., Hase M., Krebs W., Schildmacher K.-U., Koch R., Aigner M. Impact of radiation on the wall heat load at a test bench gas turbine combustion chamber: measurements and CFD simulation. Am. Soc. of Mech. Eng. (ASME). 2007. Proc. of Turbo Expo. Power for Land, Sea, and Air (Montreal). Vol 4. Parts A & B. GT2007-27148. P. 1311–1321.
 24. Чирков А.А. Об уровне научных исследований теплообмена в двигателях внутреннего сгорания. Труды Ярославского технологического института. Ярославль. 1962. Т. 6. С. 112–124.
 25. Рябов Д.И., Свиридов У.Б. Исследование некоторых особенностей сжигания распыленного топлива // Новости АН СССР. ОН. 1958.
 26. Pflaum W. Die Wärmeübertragung beidieselmotoren mit unci ohneauflegung. Motor Technische Zeitung. 1961. Vol. 3. S. 570–574.
 27. Новицкий Л.А., Степанов Б.М. Оптические свойства материалов при низких температурах. Справочник. Москва: Машиностроение. 1980. 224 с.
 28. Makino T., Kunitomo T., Sakai I., N. Kinoshita. Thermal radiation properties of ceramic materials // Heat Transfer Japan. Res. 1984. Vol. 13. No. 4. P. 33–50.
 29. Howe J.T., Green M.J., Weston K.C. Thermal shielding by subliming volume reflectors in convective and intense radiative environments. AAIA Journal. 1973. Vol. 11. No 7. NASA Ames research center. MoffetField, Calif. U.S.A.
 30. Петров В.П., Рябцев Е.И., Сутугин В.Г., Мерзликин В.Г. Оптические свойства высокоотражающей керамики // Тематический сб. «Вопросы авиационной науки и техники». Сер. авиационные материалы. 1989. С. 39–43.
 31. Авдучевский В.С. Основы теории полета космических аппаратов. Москва: Машиностроение. 1972. 345 с.
 32. Boeringer J.C., Spindler R.J. Radiant Heating of Semitransparent Materials. AAIA Journal. 1963. Vol. 1 (1). P. 84–88.
 33. Petrov V.A. Thermal radiation and optical properties of cubic YSZ up to the temperature of high rate evaporation. H. Temp. H. Pressures. 2002. Vol. 34. P. 657–668.
 34. Merzlikin V., Sidorov O., Cheranev S., Antonakopoulos N. Optimal spectral optical and thermo radiating characteristics of semitransparent heat-insulating coatings for Low-Heat-Rejection diesel engines., 11th Int. Conf. on Engines & Vehicle. ICE2011, 11 September 2011, Capri-Naples, Italy, Book of Abstracts. 2011. P. 41.
 35. Поклад В.А. и др. Способ нанесения покрытий на жаропрочные сплавы. Патент РФ № 2347848. 2007.
 36. Tovstonog V.A. The evaluation of fireproof properties of light-scattering coatings. High Temp. 1993. Vol. 31(4). P. 202–208.
 37. Merzlikin V.G., Gutierrez M.O., Makarov A.R., Kostukov A.V., Dementev A.A., Khudyakov S.V., Zagumennov F.A. Semitransparent ceramic heat-insulation of eco-friendly Low-Heat-Rejection diesel. Proc. of IOP Series: Materials Science and Engineering. IOP (Inst. of Physics) Publ. 2018. Vol. 327, 032037. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032037.
 38. Красс М.С., Мерзликин В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1990. 261 с.
 39. Мерзликин В.Г., Красс М.С. Покрытие для растапливания ледников. Патент № 917311, 1992.
 40. Красс М.С., Мерзликин В.Г., Сидоров О.В., Гутьеррес М. Охеда, Аджиев А.Х. Лучистая инверсия температурного поля в снежных покровах высокогорных ледников // М. ИГ РАН. Материалы гляциологических исследований. 2007. Вып. 121. С. 34–41.
 41. Merzlikin, V.G., Ilushin, Ya.A., Olenin, A.L., Sidorov, O.V., Tovstonog, V.A. The criterial optics of oceans and glaciers with technogenic pollutions. Proc. of American Inst. of Physics 1810: 120004, March 2017. DOI: 10.1063/1.4975578.
 42. Koh G., Jordan R. Sub-surface melting in seasonal snow cover. J. of Glaciology. 1995. Vol. 41 (139). P. 474–482.
 43. Ramu P., Saravanan C.G. Effects of ZrO₂-Al₂O₃ and SiC coating on diesel engine to study the combustion and emission characteristics. 2009. SAE International Paper 2009-01-1435.
 44. Гутьеррес Маркос О. Метод снижения тепловых потерь и теплонапряженности дизелей с исполь-

зованием полупрозрачных керамических покрытий: автореф. дис. канд. техн. н. М.: Изд. МГТУ «МАМИ». 2007. 26 с.

45. Русу И., Георгеску С., Бачиу К., Аурелиан Б. Многослойные термические барьеры, полученные в результате применения APS- и HVOF-технологий // *Машиностроение и транспорт. Наукові праці. ВНТУ.* 2009. № 4.

References

1. Onishchenko D.O., Pankratov S.A., Smirnov A.YU. The effect of partial thermal insulation of the combustion chamber of a diesel engine on heat transfer to the cooling system. *Vestnik MGTU im. N.EH. Bauman.* 2016. No 3(108), pp. 81–89 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-81-89.
2. Dudareva N.YU., Kal'shchikov R.V., Dombrovskij O.P., Butusov I.A. Experimental study of the thermal state of the bottom of the piston of the internal combustion engine with a heat-shielding layer formed by the method of microarc oxidation. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.EH. Bauman.* 2015. Vol. 5, pp. 115-125 (in Russ.). DOI: 10.7463/0515.0774148.
3. Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zelencov A.A., Kadyrov S.M., Aripdzhanov M.M. Computational and experimental study of the effect of piston and liner heat insulation on the formation of nitrogen oxides in the combustion products of a high-speed diesel engine. *Vestnik MGTU im. N.EH. Bauman. Ser. Mashinostroenie.* 2011. No 4, pp. 83–102 (in Russ.).
4. Carmona D.D.V. Thermal barrier coatings for efficient combustion. Master's Degree in Materials Sc. & Eng., School of Ind. Eng. & Manag., KTN Campus. Stockholm. 2014. 96 p.
5. Uchida N., Osada H. A new piston insulation concept for heavy-duty diesel engines to reduce heat loss from the wall. *SAE Int. J. Engines.* 2017. Vol. 10. Iss. 5. P. 2565-2575. DOI: 10.4271/2017-24-0161.
6. Ciniviz M., Salman M.S., Canl E., Kuse H., Solmaz I. Ceramic coating applications and research fields for ICEs // *Ceramic Coatings – App. in Engineering.* 2012. P. 195-234.
7. Azadi M.A. A review of the effects on diesel engine performance and components lifetime // *Int. J. of Autom. Eng.* 2013. Vol. 3. P. 305–317.
8. Das D., Majumdar G., Sen R.S., Ghosh B.B. Evaluation of combustion and emission characteristics on diesel engine with varying thickness of PSZ coated piston crown. *Int. J. of Innovative Research in Sci., Eng. and Tech.* 2013. Vol. 10.
9. Sankar V. Thermal barrier coatings material selection, method of preparation and applications – a review. *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.* 2014. P. 510–517.
10. Ciniviz M., Salman M.S., Canl E., Kuse H., Solmaz I. Ceramic coating applications and research fields for ICEs. *Ceramic Coatings – App. in Engineering.* 2012. P. 195–234.
11. Kavtaradze R.Z. Lokal'nyj teploobmen v porshnevyh dvigatelyah [Local heat transfer in piston engines]. 2-e izd. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.EH. Bauman, 2007. 472 p.
12. Kostin A.K. Teplonapryazhennost' dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Thermal stress of internal combustion engines]. Leningrad. Izd. «Mashinostroenie» Publ. 1979.
13. Bazhajkin A.N. Characteristics of ignition and combustion of the fuel jet in thermally insulated combustion chambers. *Dvigatelistroenie.* 1992. No 1–3, pp. 7–9 (in Russ.).
14. Rakopoulos C.D., Giakoumis E.G. Diesel engine transient operation principles of operation and simulation analysis / E-ISBN 978-1-84882-375-4, Springer-Verlag London Limited. 2009. 390 p.
15. Merzlikin V., Gutierrez M.O., Sidorov O., Amel'mkov A. Regulation of the combustion chamber walls temperature with semitransparent heat insulating coatings. 8th Int. Conf. on Engines for Automobile. Capri – Naples, Italy. Paper Offer Number № 2007-24-0031.
16. Merzlikin V.G., Parshina S.A., Garnova V.Yu., Bystrov A.V., Makarov A.R., Khudyakov S.V. Rig test of diesel combustion chamber with piston coated optically simulated semitransparent PSZ-ceramic. 13th Int. Conf. on Engines and Vehicle. ICE2017, 10-14 September 2017, Capri-Naples, Italy. Paper Offer Number 17ICE-0103/2017-24-0129. DOI: 10.4271/2017-24-0129.
17. Wang, L., Eldridge J.I., Guo S.M. Comparison of different models for the determination of the absorption and scattering coefficients of TBCs. *Acta Materialia.* 2014. Vol. 64. P. 402–410. DOI: org/10.1016/j.actamat.2013.10.053.
18. Siegel R. Internal radiation effects in zirconia thermal barrier coatings. *AIAA J. Thermophysics Heat Trans.* 1996. Vol. 10 (4). P. 707–709.
19. Manara J., Arduini-Schuster M., Rdtzer-Scheibe H.-J., Schulz U. Infrared-optical properties and heat transfer coefficients of semitransparent thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology.* 2009. Vol. 203(8). P. 1059-1068. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.09.033.

20. Merzlikin V.G., Tovstonog V.A. Teploizoliruyushchee pokrytie ehlementov i/ili uzlov kamery sgoraniya dizel'nogo dvigatelya [Thermal insulation coating of elements and / or components of the combustion chamber of a diesel engine]. Patent RF No 2240430. 2004.
21. Merzlikin V.G., Gutierrez M., Oheda, Bezdelkin V.V., Sidorov O.V., Sutugin V.G. Translucent thermal insulation for an adiabatic diesel (NEW CONCEPT). ZHurnal avtomobil'naya promyshlennost'. 2007. No 7, pp. 34–36 (in Russ.).
22. Merzlikin V., Timonin V., Gutierrez Ojeda M., Sidorov O. New selectively absorbing and scattering heat-insulating coatings of the combustion chamber for LHR diesel // SAE Technical Paper 2007-01-1755. 2007. DOI: 10.4271/2007-01-1755.
23. Dannecker R., Noll B., Hase M., Krebs W., Schildmacher K.-U., Koch R., Aigner M. Impact of radiation on the wall heat load at a test bench gas turbine combustion chamber: measurements and CFD simulation. Am. Soc. of Mech. Eng. (ASME). 2007. Proc. of Turbo Expo. Power for Land, Sea, and Air (Montreal). Vol 4. Parts A & B. GT2007-27148. P. 1311–1321.
24. Chirkov A.A. The level of scientific research on heat transfer in internal combustion engines. Trudy YAroslavskogo tekhnologicheskogo instituta. YAroslavl'. 1962. Vol. 6, pp. 112–124 (in Russ.).
25. Ryabov D.I., Sviridov U.B. The study of some features of the combustion of atomized fuel. Novosti AN SSSR. OTN. 1958 (in Russ.).
26. Pflaum W. Die Wärmeübertragung bei Dieselmotoren mit unci ohne Auflagerung. Motor Technische Zeitung. 1961. Vol. 3, pp. 570–574.
27. Novickij L.A., Stepanov B.M. Opticheskie svoystva materialov pri nizkih temperaturah. Spravochnik [Optical properties of materials at low temperatures. Directory]. Moscow. Izd. «Mashinostroenie» Publ. 1980. 224 p.
28. Makino T., Kunitomo T., Sakai I., H. Kinoshita Thermal radiation properties of ceramic materials // Heat Transfer Japan. Res. 1984. Vol. 13. No. 4, pp. 33–50.
29. Howe J. T., Green M. J., Weston K.C. Thermal shielding by subliming volume reflectors in convective and intense radiative environments. AIAA Journal. 1973. Vol. 11. No 7. NASA Ames research center. Moffet Field, Calif. U.S.A.
30. Petrov V.P., Ryabcev E.I., Sutugin V.G., Merzlikin V.G. Optical properties of highly reflective ceramics. Tematicheskij sb. «Voprosy aviacionnoj nauki i tekhniki». Ser. aviacionnye materialy [Thematic collection “Questions of aviation science and technology”]. 1989, pp. 39–43 (in Russ.).
31. Avduevskij V.S. Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov [Fundamentals of the theory of spacecraft flight]. Moscow. Izd. «Mashinostroenie» Publ. 1972. 345 p.
32. Boeringer J.C., Spindler R.J. Radiant Heating of Semitransparent Materials. AIAA Journal. 1963. Vol. 1 (1). P. 84–88.
33. Petrov V.A. Thermal radiation and optical properties of cubic YSZ up to the temperature of high rate evaporation. H. Temp.-H. Pressures. 2002. Vol. 34. P. 657–668.
34. Merzlikin V., Sidorov O., Cheranov S., Antonakopoulos N. Optimal spectral optical and thermoradiating characteristics of semitransparent heat-insulating coatings for Low-Heat-Rejection diesel engines., 11th Int. Conf. on Engines & Vehicle. ICE2011, 11 September 2011, Capri-Naples, Italy, Book of Abstracts. 2011. P. 41.
35. Poklad V.A. i dr. Sposob naneseniya pokrytij na zharoprochnye splavy [The method of coating on heat-resistant alloys]. Patent RF No 2347848. 2007.
36. Tovstonog V.A. The evaluation of fireproof properties of light-scattering coatings. High Temp. 1993. Vol. 31 (4). P. 202–208.
37. Merzlikin V.G., Gutierrez M.O., Makarov A.R., Kostukov A.V., Dementev A.A., Khudyakov S.V., Zagumenov F. A. Semitransparent ceramic heat-insulation of eco-friendly Low-Heat-Rejection diesel. Proc. of IOP Series: Materials Science and Engineering. IOP (Inst. of Physics) Publ. 2018. Vol. 327, 032037. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032037.
38. Krass M.S., Merzlikin V.G. Radiacionnaya teplofizika snega i l'da [Radiation thermophysics of snow and ice]. Leningrad. Izd. Gidrometeoizdat Publ. 1990. 261 p.
39. Merzlikin V.G., Krass M.S. Pokrytie dlya rastaplivaniya lednikov [Coating for melting glaciers]. Patent No 917311, 1992.
40. Krass M.S., Merzlikin V.G., Sidorov O.V., Gutierrez Oheda M., Adzhiev A.H. Radiant inversion of the temperature field in the snow cover of high mountain glaciers. M. IG RAN. Materialy glyaciologicheskikh is-sledovanij [RAS. Glaciological research materials]. 2007. Vyp. 121, pp. 34–41 (in Russ.).
41. Merzlikin, V.G., Ilushin, Ya.A., Olenin, A.L., Sidorov, O.V., Tovstonog, V.A. The criterial optics of oceans and glaciers with technogenic pollutions. Proc. of American Inst. of Physics 1810: 120004, March 2017. DOI: 10.1063/1.4975578.
42. Koh G., Jordan R. Sub-surface melting in seasonal snow cover. J. of Glaciology. 1995. Vol. 41 (139). P. 474–482.

43. Ramu P., Saravanan C.G. Effects of ZrO₂-Al₂O₃ and SiC coating on diesel engine to study the combustion and emission characteristics. 2009. SAE International Paper 2009-01-1435.
44. Gutierres Markos O. Metod snizheniya teplovyh poter' i teplonapryazhennosti dizelej s ispol'zovaniem poluprozrachnyh keramicheskikh pokrytij. Avtoreferat dissertaciya kandidata tekhnicheskikh nauk [The method of reducing heat loss and thermal density of diesel engines using translucent ceramic coatings. Abstract for dissertation for degree of Candidate of Technical Sciences]. Moscow: Izd. MGТУ «MAMI» Publ. 2007. 26 s.
45. Rusu I., Georgesku S., Bachiу K., Aurelian B. Multilayer thermal barriers obtained from the use of APS-and HVOF-technologies. Mashinostroenie i transport. Naukovipraci. VNTU. 2009. No 4 (in Russ.).