

Методика регистрации оптических и терморадационных характеристик с компенсацией влияния индикатрисы отражения теплоизолирующих и теплозащитных материалов и покрытий камер сгорания быстроходных дизелей

к.т.н. доц. Мерзликин В.Г., к.т.н. с.н.с. Сутугин В.Г., к.т.н. с.н.с. Стифеев Л.К., Худяков С.В.
МГТУ «МАМИ», ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», РЭУ им. Г.В.Плеханова
(495) 223-05-23, доб. 1327

Аннотация. Разработан экспериментальный стенд для регистрации коэффициентов отражения и пропускания полупрозрачных теплоизолирующих (теплозащитных) материалов и покрытий на их основе в видимой и ИК-областях спектра, характерных для лучистой компоненты теплового потока, воздействующего на внутренние стенки камер сгорания дизелей, лопатки турбин и поверхность аэрокосмических аппаратов. Отличительной особенностью стенда является включение в его состав спектрофотометрического шара для компенсации влияния индикатрисы отражения. Проведены расчетно-теоретические оценки показателей рассеяния и поглощения экспериментальных и модельных образцов полупрозрачного керамического материала на основе стабилизированного диоксида циркония для фиксированных длин волн 0,63 мкм; 1,15 мкм; 3,39 мкм зондирующего излучения лазера.

Ключевые слова: камера сгорания дизеля, покрытия внутренних стенок, теплоизолирующие и теплозащитные материалы

В традиционных исследованиях сложного теплообмена и лучистого теплопереноса для элементов теплозащиты стенок камер сгорания дизелей [1 - 3] и турбин, лопаток авиационных турбин [4-6], корпусов аэрокосмических аппаратов [7, 8], ловушек перегретого теплоносителя ядерного реактора [9] обычно требуется рассмотреть воздействие интегрального теплового потока с учетом вклада проникающей лучистой компоненты в коротковолновом диапазоне длин волн $\sim 1-3$ мкм в нагрев теплоизолирующих и теплозащитных покрытий. Применяемые керамические теплоизолирующие покрытия являются частично прозрачными для указанного лучистого воздействия. Но, как правило, этим эффектом пренебрегается при разработках теплозащиты ДВС [1, 2, 10-12], хотя применение подобных покрытий в условиях сложного теплообмена актуально в смежных областях науки и техники.

При разработках нового поколения быстроходных дизелей на мировом конгрессе FISITA-2010 [13] и 10-ой конференции международного союза автоинженеров 10SAE-2011 [14] были определены фундаментальные направления достижения евростандартов при эксплуатации двигателей, ориентированные на уменьшение расхода топлива и снижение токсичности выхлопных газов. По нашему мнению, за последние 20 лет совершенствование для этой цели конструкций форсунок и других элементов камеры сгорания, а также состава топлива начинает себя исчерпывать [15]. 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 при разработках теплозащиты ракетно-космических объектов при входе в плотные слои атмосферы [16].

В РФ наиболее успешные практические разработки по применению керамических теплозащитных покрытий были проведены ФГУП ММП «Салют», позволившие уже в течение нескольких лет выпускать авиационные газотурбинные двигатели с теплозащитными многослойными керамическими покрытиями лопаток на основе стабилизированного диоксида циркония с применением электро-лучевого способа нанесения [6, 17]. В ФГУП «ВИАМ» ГНЦ создана технология нанесения керамического слоя теплозащитного покрытия плазмохимическим методом на базе магнетронных распылителей повышенной частоты.

В США подобными исследованиями занимаются в различных исследовательских центрах, например, в лаборатории перспективных материалов (Advanced Materials Research Laboratory, AMRL) университета Southern University, Baton Rouge. Наиболее близко к решению поставленных задач подошли специалисты NASA [4].

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 [5].

В МГТУ им. Н.Э.Баумана и МГТУ «МАМИ» осуществляется разработка полупрозрачных теплоизолирующих покрытий (ПТИП), приоритет которых защищен патентами РФ № 2240430 (2004), № 2 323357 (2008), № 2410196 (2011) [18, 19].

Для оценки оптических характеристик подобных материалов и покрытий на их основе был разработан оптический стенд для экспериментальных измерений коэффициентов отражения и пропускания. Эти данные позволяют оценить показатели поглощения и рассеяния, обуславливающие функцию теплового источника при решении нелинейных задач лучистого теплопереноса [4, 5, 7, 8, 13-16, 20, 21].

Измерения коэффициентов отражения экспериментальных модельных образцов полупрозрачных теплоизолирующих материалов проводились на установке, изображенной на рисунке 1. В качестве источников излучения использовались трехцветный гелий-неоновый лазер ЛГ-126, рабочие длины волн этого лазера 0,63 мкм; 1,15 мкм; 3,39 мкм; твердотельный лазер ЛТ-2 с длиной волны 1,06 мкм; твердотельный лазер УЛТ-3 с длиной волны 2,79 мкм. Зондирующее излучение попадало сквозь центральное отверстие зеркальной полусферы на образец, диффузно отражалось им и собиралось фокусирующим зеркалом в фотометрическом шаре, оснащенный фотодиодом ФД-24К для измерений на длинах волн 0,63, 1,06, и 1,15 мкм, либо фоторезистором ФР-188 для измерений на длинах волн 2,79 и 3,39 мкм [22 -23].

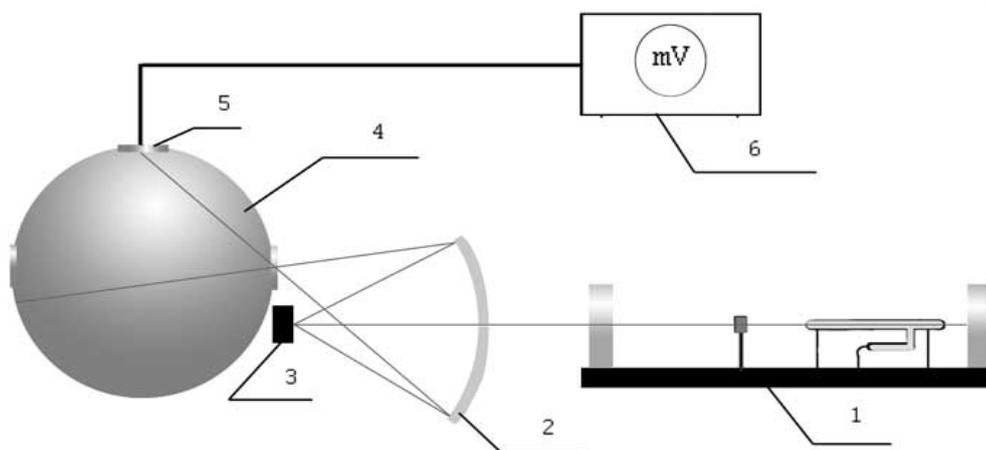


Рисунок 1 – Блок-схема оптического стенда для измерения коэффициентов отражения образцов полупрозрачных теплоизолирующих (теплозащитных) образцов материалов (1 – зондирующий лазер, 2 – отражательная полусфера с отверстием для зондирующего излучения, 3 – исследуемый образец, 4 – спектрофотометрический шар из пористого фторопласта, 5 – фотоприемник, 6 – микровольтметр)

В первом случае фотометрический шар был из пористого фторопласта, а во втором – из алюминия, обработанного пескоструйным способом. Фокусирующее зеркало представляло собой стеклянный сферический сегмент с радиусом и диаметром сечения сферы 0,4 м. На рабочую поверхность зеркала был напылён алюминий, имеющий предельный коэффициент отражения порядка ~90% в видимой, ближней и средней ИК-областях спектра [24]. Сигналы

фотоприемников принимались в зависимости от уровня сигнала наномикровольтметром Ф-136 или В7-21. Соотношение сигнал-шум при работе в затемненном помещении при отсутствии посторонних источников света не превышал 1%. Измерения на длинах волн 0,63 и 1,06 мкм дублировались для проверки на фотометре ФМШ-56.

Использование фотометрического шара позволяло устранить погрешность измерений, связанную с разной чувствительностью фотоприёмников к падающему излучению с различными индикатрисами, что повышает точность измерений оптических и терморadiационных характеристик и оценок функции теплового радиационного источника тепла для вычисления температурных полей стенок камеры сгорания быстроходного дизеля.

Кроме того, использовалась упрощенная схема, изображенная на рисунке 2, позволяющая измерять не только коэффициенты отражения, но и пропускания. В этом случае при измерениях коэффициентов отражения в позиции 3 поочередно помещались эталон сравнения и исследуемый образец. При измерении коэффициентов пропускания в позиции 3 располагался эталон сравнения, а исследуемый образец в позиции 4.

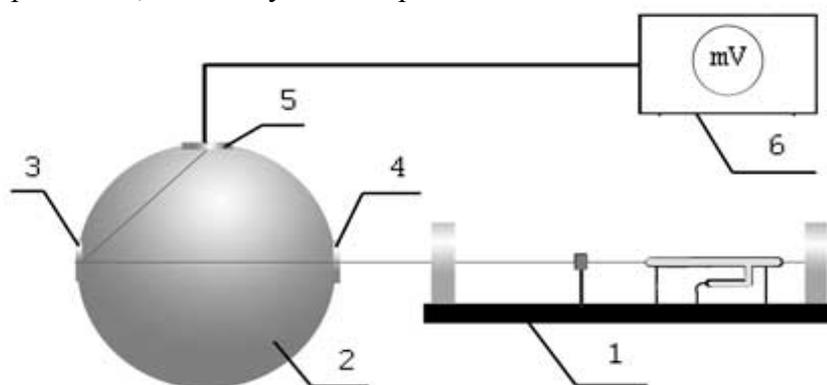


Рисунок 2 – Блок-схема оптического стенда для измерения коэффициентов пропускания образцов полупрозрачных теплоизолирующих (теплозащитных) материалов (1 – зондирующий лазер, 2 – спектрфотометрический шар из пескоструйного алюминия, 3 – эталонный непрозрачный образец, 4 – исследуемый полупрозрачный образец, 5, 6 – см. обозначения на рисунке 1)

Перед проведением измерений проводилась калибровка показаний фотоприемников, для этого на эталонный образец подавалось излучение различной мощности. Ослабление излучения осуществлялось с помощью либо светофильтров, либо дисковых ослабителей. Точность измерений при использовании фотодиода ФД-24к была не хуже 2%, а при использовании фотосопротивления ФР-188 не хуже 0,5%.

В качестве образцов сравнения (эталонов) использовались кварцевая керамика, изготовленная из особо чистого синтетического порошка марки ОСЧ-14, и обработанный пескоструйным способом алюминий марки АМц [24].

В данной работе исследовались образцы гранулированных порошков окиси циркония, стабилизированные окисью иттрия (изготовитель фирма «SIGMUND LIDNER GmbH», ФРГ). Для изготовления экспериментальных таблеток из этого порошка в качестве связующего использовалось калиевое жидкое стекло высокой чистоты.

Оптические показатели поглощения и рассеяния рассчитывались по методике, разработанной авторами в двухпоточковом приближении решения уравнения лучистого переноса [25]. Полученные значения показателя поглощения связующего жидкого стекла на длинах волн зондирующего излучения более чем на порядок меньше, чем аналогичный показатель для окиси циркония. Поэтому вклад этого связующего в поглощение модельными образцами керамик был несущественный.

В таблице представлены результаты экспериментальных измерений и расчетные значе-

ния коэффициентов отражения и пропускания экспериментальных образцов керамики в виде высушенных таблеток диоксида циркония с использованием связующих слабопоглощающих клеев. Обращает на себя внимание значительная величина коэффициента отражения модельных керамических образцов вплоть до длины волны 3,39 мкм. Подобными отражательными способностями обладают материалы с низким поглощением, например, образцы корунда или кварца. Но технологические образцы этих материалов имеют полосы прозрачности, ограниченные 2-3 мкм в ближней ИК области спектра с существенным уменьшением значения коэффициента отражения, т.е. обусловленном ростом поглощения [23].

Таблица.

Оптические модели и характеристики экспериментальных и модельных образцов полупрозрачных теплоизолирующих материалов на основе стабилизированной окиси циркония для различных длин волн зондирующего лазерного излучения в видимом и ИК-диапазонах (экспериментальные данные выделены жирным шрифтом)

λ , мкм	Оптические модели для экспериментальных $M_{ex}(\kappa / \sigma - A\%)$ и модельных $M(\kappa / \sigma - A\%)$ образцов	Показатели поглощения и рассеяния		Коэффициент отражения толстого образца расчет / эксперимент	Расчетные коэффициенты отражения и пропускания для толщины образцов $H=7$ мм	
		κ , 1/м	σ , 1/м		A	$r(H)$, %
0,63	$M_{ex}(0,6 / 5080-98,5)$	0,6	5080	0,985 / 0,970	97	2,6
0,927	-	-	-	- / 0,80-0,91*	-	-
1,15	$M_{ex}(6/2430-93,2)$	6	2430	0,932 / 0,920	92	4,3
	$M1(1/100-87)$	1	100	0,87	41	58
	$M2(30/3000-87)$	30	3000		87	1,2
	$M3(10/1000-87)$	10	1000		84	10
	$M4(5/500-87)$	5	500		76	21
	$M5(5/1000-91)$	5	1000	0,91	85	11
$M6(5/100-73)$	5	100	0,73	40	57	
~2	-	-	-	88-97*	-	-
2,50	-	-	-	90*	-	-
3,39	$M_{ex}(14/2400-89,5)$	14	2400	0,895 / 0,890	89	3,3

*Оптические данные по справочнику [23]

Выводы

Экспериментальные оценки оптических параметров экспериментальных образцов полупрозрачного покрытия на основе диоксида циркония дали следующие результаты для показателей поглощения $\kappa \sim 10-30 \text{ м}^{-1}$ и рассеяния $\sigma \sim (3-10)10^3 \text{ м}^{-1}$ с коэффициентом отражения полубесконечного слоя (альбеда) $A \sim 90-92\%$ для диапазона длин волн $\lambda \sim 1 - 3$ мкм, характерного для лучистой компоненты теплового потока в камере сгорания дизеля.

Таким образом, при использовании очищенных (с низким содержанием поглощающих примесей) материалов на основе диоксида циркония, разрабатываемые керамические полупрозрачные теплоизолирующие покрытия, например, для камер сгорания дизельных двигателей могут быть использованы как эффективные объемные поглотители лучистой компоненты теплового потока. Это позволит обеспечить прогрев подповерхностной области и снижение перегрева внутренней поверхности камеры сгорания, в которой может генерироваться до 50% [28, 29] лучистой компоненты теплового потока при работе быстроходных дизель-

ных двигателей.

Подобные полупрозрачные материалы могут применяться как теплоизолирующие покрытия, аккумулирующие проникающее лучистое тепло в период горячей фазы [14, 15]. Тогда в течение холодной фазы можно прогнозировать достаточно эффективный сток кондуктивного тепла обратно в камеру сгорания из прогретого теплоизолирующего покрытия. Это позволит влиять на рост КПД и регулировать температуру, а следовательно, концентрацию образующихся наиболее токсичных диоксидов азота перспективных типов камер сгорания с низкими тепловыми потерями [11, 12].

Исследуемые полупрозрачные материалы могут обладать различными оптическими свойствами, обусловленными своим структурным составом за счет определенной технологии нанесения покрытий [26 - 28]. При этом теплофизические характеристики предлагаемых покрытий с различной структурой менее подвержены изменениям. Тогда моделирование рассеивающих характеристик и слабопоглощающих теплоизолирующих (теплозащитных) покрытий позволит контролировать процесс поглощения излучения и, следовательно, регулировать температурный режим, влияющий на эффективность и экологические характеристики камер сгорания.

Литература

1. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: Учебное пособие для вузов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.- С. 592.
2. 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.p.
3. Merzlikin V., Gutierrez Ojeda M., Sidorov O., Timonin V. New Selectively Absorbing and Scattering Heat-Insulating Coatings of the Combustion Chamber for the Low-Heat-Rejection Diesel. SAE Techn. Pap. Ser., № 2007-01-1755 (2007).
4. Siegel. R. Internal Radiation Effects in Zirconia Thermal Barrier Coatings, AIAA J. Thermophysics Heat Trans. 1996. - Vol. 10, no. 4, p. 707-709.
5. Manara J., Arduini-Schuster M., Rätzer-Scheibe H.-J. and Schulz U. Infrared-optical properties and heat transfer coefficients of semitransparent thermal barrier coatings. Surface and Coatings Technology. 2009. - Vol. 203, Issue 8, 15 January, p. 1059-1068.
6. Поклад В.А., Крюков М.А., Рябенко Б.В., Козлов Д.Л. Способ получения многослойного теплозащитного покрытия на деталях из жаропрочных сплавов. Патент № 2007146968, 2007. Зарегистрировано 27 июня 2009 г.
7. Howe J.T., Green M.J., Weston K.C. Thermal shielding by subliming volume reflectors in convective and intense radiative environments AIAA Journal, vol. 11, No 7 NASA Ames research center. Moffet Field, Calif. U.S.A. 1973.
8. Петров В.П., Рябцев Е.И., Сутугин В.Г., Мерзликин В.Г. Оптические свойства высокоотражающей керамики. Тем. сб. «Вопросы авиационной науки и техники». Сер. авиационные материалы. – 1989.- С.39-43.
9. 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.
10. Amann С.А. Перспективы и проблемы дизельного двигателя с низкими тепловыми потерями. Совр. машиностроение. Серия А, 1989. № 5, с.13-21.
11. Рябов Д.И., Свиридов Ю.Б. Исследования некоторых свойств сгорания распыленных топлив. Новости АН СССР. 1958. – ОТН.
12. Pflaum W., Molenhauer K. Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschinen. Wien, N.-York. Springer-Verlag. 1977. - 347 s.
13. Merzlikin V.G., Sidorov O.V., Cheranov S.V., Rettberg R. Development of principles and methods of estimation of thermal condition of semitransparent coatings in complex heat exchange combustion chambers for low-heat-rejection diesel engines. FISITA World Automotive Con-

- gress. Budapest, 30 May – 4 June 2010. Book of Abstracts, 2010. P.198. Congress CD-ROM, paper № F2010-C081, p.p. 8.
14. 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. Conference on Engines and [v1ækl] Vehicle. ICE2011, 11 September 2011, Capri - Naples, Italy. Book of abstracts, 2011. P 41. Conference CD-ROM, paper No11ICE-0173.10 p.p.
 15. Максимов Ю.В., Мерзликин В.Г., Сидоров О.В., Сутугин В.Г., Бекаев А.А. Оптические и терморadiационные характеристики теплоизолированных стенок и элементов камеры сгорания быстроходных дизелей. Изв. МГТУ «МАМИ» Научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ» № 2(10), с. 130-134, 2010.
 16. Товстоног В.А. Теплофизика рассеивающих материалов: прикладные проблемы и решения. Вестник МГТУ. Машиностроение, 2000.- №3. - С. 67-85.
 17. Абраимов Н.И. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. М. Машиностроение. 1993. -336 с.
 18. Мерзликин В.Г., Товстоног В.А., Гутиеррес Охеда М. Теплоизолирующее покрытие. Патент РФ № 2 323 357 зарегистрировано 27.04.2008, по заявке № 2006120298/06(022045), с приоритетом от 2006 г.
 19. Мерзликин В.Г., Товстоног В.А., Сидоров О.В. Способ получения полупрозрачного материала. Патент № 2410196. Зарегистрировано 27 января 2011г. с приоритетом 1 июля 2009 г.
 20. Мерзликин В.Г., Гутиеррес Охеда М., Безделкин В.В., Сидоров О.В., Сутугин В.Г. Полупрозрачная теплоизоляция для адиабатного дизеля (Новая концепция). Москва. Журнал автомобильная промышленность, № 7, стр. 34-36, 2007.
 21. Товстоног В.А., Мерзликин В.Г., Мосолов Ф.Ф. Постановка и решение задачи радиационно-кондуктивного теплообмена в многослойных рассеивающих средах. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2008, №2, с. 12- 27.
 22. Фотоэлектрические полупроводниковые приёмники излучения и фотоприёмные устройства. Справочник. — М.: НТЦ «Информтехника». 1991.
 23. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. «Приёмники оптического излучения». Справочник. - М.: Радио и связь. 1987.
 24. Новицкий Л.А. и др. Оптические свойства материалов при низких температурах. 1980. 243 с.
 25. Merzlikin V., Sidorov O., Sutugin V. Study of Optical Parameters of Semitransparent Materials for Heat-Insulating Coatings of Combustion Chamber.. 8th Int. Conference on Engines for Automobile - ICE2007, 16 September. 2007. - Capri - Naples, Italy. Book of abstracts, 2007. P. 68. Conference CD-ROM, paper № 2007-24-0066, p.p. 12.
 26. 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. № 4, 2009.
 27. Heimann R.B. and Lehmann H.D. Recently Patented Work on Thermally Sprayed Coatings for Protection Against Wear and Corrosion of Engineered Structures. Recent Patents on Materials Science 2008, 1, 41-55 41 1874-4656/08 \$100.00+.00 © 2008 Bentham Science Publishers Ltd.
 28. Лунев А.Н., Абусдель А.М., Ильенкова Т.А. Технология авиационного производства. Применение термобарьерных покрытий в современных газовых турбинах. Изв. вузов. Авиационная техника. КГТУ - КАИ, Казань. № 5. - 2005.