

Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.

2. Хворостухин Л.А., Курицына В.В. Управление параметрами качества прецизионных деталей двигателей летательных аппаратов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. № 10. С. 19-28.
3. Курицына В.В. Обеспечение качества ответственных деталей гидроагрегатов поверхностно-пластическим деформированием // Технология машиностроения. 2012. № 10. С. 32-37.
4. Курицына В.В., Лиокумович Д.С., Силюянова М.В. Инструментальные средства MatLab Simulink в системе технологического менеджмента качества точного машиностроения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 1. С. 22-31.
5. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

Физико-математическое моделирование тепловых режимов термостойких материалов и покрытий

¹Мерзликин В.Г., ¹Максимов А.Д., ²Товстоног В.А., ²Елисеев В.Н., ³Крохалев И.Н
¹ Университет машиностроения, ²МГТУ им. Н.Э. Баумана, ³ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга
8(909)989-55-32 MerzlikinV@mail.ru

Аннотация. Представлена разработка экспериментального теплового стенда для исследований и модельных (близких к натурным) испытаний материалов и покрытий при имитации сложного теплообмена с существенной долей лучистой компоненты в различных типах камер сгорания, при эксплуатации элементов турбин, различных теплоэнергетических устройств, аэрокосмических аппаратов.

Ключевые слова: камера сгорания, радиационно-конвективный теплообмен, натурно-модельные испытания, моделирование спектра и потока излучения, индикаторная диаграмма, тепловой стенд, теплоизолирующие материалы и покрытия.

Улучшение термостойкости теплозащиты элементов теплоэнергетического оборудования, повышение эффективности и сокращение выбросов токсичных газов для двигателей и турбин, высокоскоростных дизельных двигателей в течение длительного периода функционирования является актуальной задачей. Но до сих пор не получила широкого применения корректная оценка параметров сложного теплообмена с существенной долей лучистой компоненты, например, в теплоизолированных камерах сгорания дизелей [1, 2]. Подобная проблема актуальна в других областях машиностроительного производства, например, при разработках авиационных двигателей [3 - 5]. Это предопределяет разработку термобарьерных (теплозащитных, теплоизолирующих) материалов и покрытий как непрозрачных, так и полупрозрачных при сложном теплообмене для теплонагруженных элементов различных теплоэнергетических установок и транспортных средств [4 - 7].

Важным этапом разработок новых и штатных конструкционных материалов является проведение экспериментальных исследований их тепловых режимов в модельных условиях эксплуатации [8 - 11]. С этой целью Университетом машиностроения совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана была разработана установка имитации высокоинтенсивного радиационно-конвективного воздействия, характерного для камер сгорания быстроходных дизельных двигателей [12].

Установка предназначена для диагностики характеристик термостойкости и термостойкости металлов, композиционных и керамических материалов, покрытий, а также возможно применение для создания и обработки керамических и композиционных материалов, например, методом селективного лучевого спекания, а также для нагрева поверхностей различ-

ных объектов до требуемой температуры методом лучистого и конвективного теплообмена.

Рассмотренный терморadiационный метод обработки и испытания металлов и материалов в заданном спектральном диапазоне длин волн позволяет создать установку светолучевых испытаний и обработки. Установка сконструирована на основе комплекса мощных водоохлаждаемых трубчатых галогенных ламп. Эти лампы генерируют заданный селективный поток излучения, близкий по спектру собственной терморadiации элементов различного энергетического оборудования и/или внешней среды, для обеспечения натурно-модельных испытаний облучаемых искусственных и естественных материалов и сред [13 – 16].

Основные эксплуатационные характеристики автомобилей с поршневыми и роторно-поршневыми двигателями регистрируются с помощью моторных стендов.

При контрольных испытаниях определяются:

- внешние скоростные характеристики мощности;
- нагрузочная характеристика при нескольких различных частотах вращения;
- характеристики холостого хода.

Особенности конструкции теплоизолированных фрагментов и деталей камеры сгорания дизелей при установившихся, неустановившихся и переходных режимах обуславливают резкие колебания теплоподвода и теплоотвода. Это приводит к неравномерному распределению температур в основных деталях цилиндра и перегреву их отдельных зон. Периодический характер протекания рабочего процесса предопределяет пульсирующее воздействие тепловых потоков на детали цилиндра. Так, в течение каждого термодинамического цикла наблюдаются колебания температуры рабочего тела в цилиндре от наименьшей величины 290 – 340 К во время наполнения цилиндра до максимальной величины во время сгорания 2300 – 2500 К.

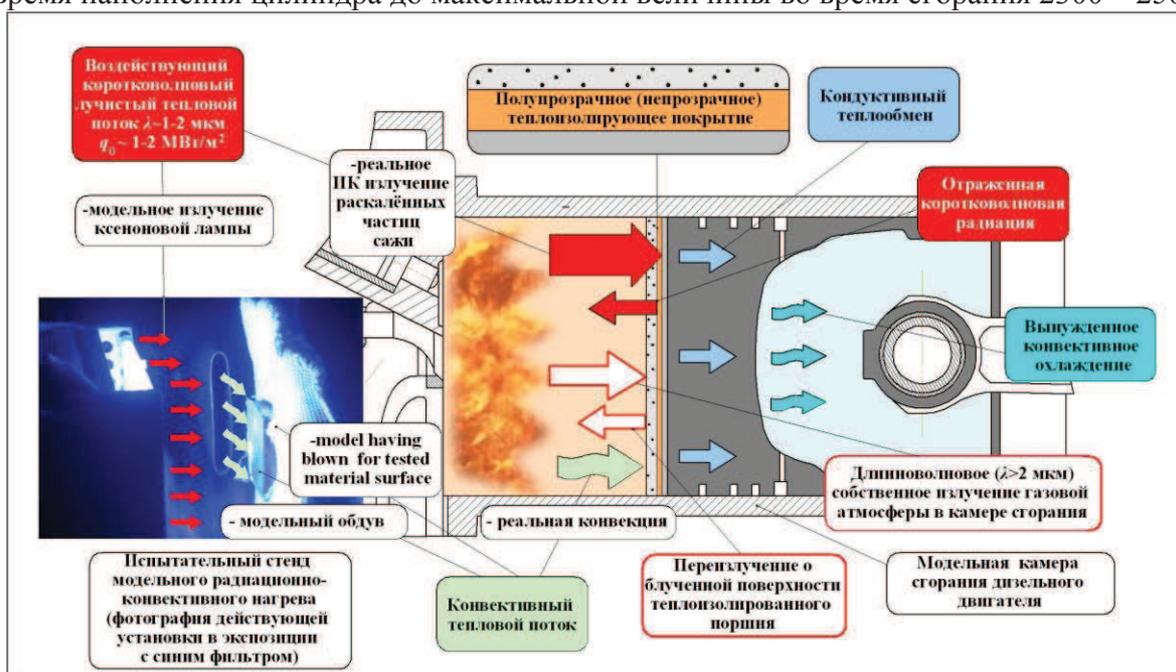


Рисунок 1. Сравнение элементов теплового баланса действующего экспериментального стенда радиационного и конвективного нагрева исследуемых материалов (см. фотографии слева) с модельным сложным теплообменом в теплоизолированной камере сгорания дизеля (см. принципиальную схему справа)

Таких циклов в цилиндре быстроходного дизеля на эксплуатационных режимах работы реализуется от 5 до 20 в секунду. В каждом цикле сочетаются все три основные формы теплопередачи: лучеиспускание, теплопроводность и конвективный теплообмен, которые взаимодействуют и создают сложную картину процесса теплопередачи. Таким образом, проведение полной диагностики тепловых режимов является сложным процессом [8 – 10, 19].

Для выбора требуемого режима испытаний можно также провести предварительные

теоретические оценки тепловых режимов, но начальные и граничные условия, как правило, или неопределенны [8 – 11, 16 – 18], или требуют отдельного исследования [19].

Поэтому требуется вводить в практику натуральных испытаний двигателя предварительный этап (предшествующий тестированию на традиционных моторных стендах) натурно-модельных испытаний и физического моделирования процессов воздействия лучистых и конвективных компонент теплового потока на прогрев или плоских образцов конструкционных материалов, или полноразмерных элементов камеры сгорания (рисунок 1).

Экспериментальный стенд радиационно-конвективного нагрева

Методология моделирования конвективного нагрева материалов различных изделий является хорошо исследованным процессом и применяется с использованием различных теплоэнергетических стендов в авто-, авиа- и космической индустриях [8 – 10, 19 – 23]. Принципиальные технологические проблемы возникают при создании искусственных источников высокоинтенсивного излучения [4, 5, 19, 24, 25].

Первоначально в качестве источников излучения применяли угольно-дуговые лампы, достаточно хорошо имитировавшие спектральное распределение энергии в диапазоне длин волн $\sim 0,4 - 2$ мкм, где недостаток мощности можно было компенсировать с помощью дополнительных источников. Однако этот вид ламп имел ряд существенных недостатков: в частности, из-за быстрого сгорания положительного электрода (для дуги мощностью 10 кВт скорость сгорания составляла 0,5 м/ч). Постоянно приходилось заменять электрод новым. Кроме того, механизм его подачи достаточно сложен, нужно было защищать элементы оптической системы (зеркала, отражающие и преломляющие свет, линзы и пр.) от загрязнения продуктами сгорания. Поэтому начали применять лампы с газовым наполнением (ксеноновые, ртутно-ксеноновые), сочетающие в себе яркость угольной дуги с удобством эксплуатации. Вместе с тем и эти лампы имели недостатки. Так, в видимой и ИК областях спектра они имитировали излучение хуже, чем угольно-дуговые лампы. В процессе развития оба типа ламп совершенствовались – разрабатывался нерасходуемый отрицательный электрод в угольно-дуговой лампе, улучшалась имитация заданного спектра за счет введения дополнительных газов в ксеноновые и ртутно-ксеноновые лампы и т.д. Иногда исследователи идут по пути совмещения работы нескольких (обычно двух) типов источников излучения. Один из них обеспечивает воздействие в разных областях спектра: в УФ – ртутные газоразрядные лампы; в видимой и ИК областях спектра – кварцевые вольфрам-галогенные лампы. Это позволяет добиться лучшего согласования с условиями реального воздействия излучения.

Модельный терморadiационный нагрев (характерный для теплоизолированных камер сгорания быстроходных дизелей) может быть обеспечен источником излучения с плотностью подводимого теплового потока $\sim 1 - 2$ МВт/м² на поверхности с площадью в сотни см². Подобные испытания проводятся при разработках авиационной и ракетно-космической техники [4, 5, 24 – 27]. В практике высокотемпературных теплопрочностных испытаний авиационно-космических конструкций с развитой поверхностью нагрева широко используют блоки трубчатых галогенных ламп накаливания с кварцевой колбой, однако, даже при использовании наиболее мощных (по удельной мощности на единицу длины) ламп, значения достижимых температур не превышают $\sim 1600 - 1700$ К.

В связи с этим при тепловых и теплопрочностных испытаниях конструкций предлагается применять принцип зонного нагрева с использованием блоков трубчатых водоохлаждаемых газоразрядных источников излучения. Каждый из них обеспечивает нагрев до достижимого уровня температур в своих зонах, т.е. в зонах с температурами не более 1600 – 1700 К использовать нагревательные блоки обычных одно оболочечных ламп, а в зонах с большими температурами – водоохлаждаемые газоразрядные лампы (источники излучения ГИИ), позволяющие генерировать потоки излучения плотностью более 2 МВт/м² и с температурами до ~ 2500 К [28]. Возможность реализации такого подхода подтверждается проведенными исследованиями и опытом применения указанных источников излучения для испытаний теп-

Литература

1. Чирков А.А. Об уровне научных исследований теплопередачи в двигателях внутреннего сгорания. Ярославский технологический институт. – М. «Вестник машиностроения». - 1962. - № 6. – С. 112-124.
2. Pflaum W. Die Wärmeübertragung bei Dieselmotoren mit unci ohne Auflager. «Motor Technische Zeitung». - 1961. - № 3. - S. 570.
3. Dannecker R., Noll B., Hase M., Krebs W., K Schildmacher.-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. URL: <http://inzhenery.ru/slovar/sapr/vliyanie-teploobmena-izlucheniema-sumarnyy-teplovoy-potok-v-stenku-modelnoy-kamery-sgoraniya-gazov.html> (дата обращения 12.12.2012).
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. P. 1059-1068.
6. Товстоног В.А., Мосалов Ф.Ф., Мерзликин В.Г. Постановка и решение задач радиационно-кондуктивного теплообмена в многослойных рассеивающих средах. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. №1. С.12–29.
7. Merzlikin V., Sidorov O., Cheranov 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 Vehicle (ICE2011). 11 September 2011, Capri - Naples, Italy. Book of abstracts, 2011. P 41. Conference CD-ROM. Paper No 11ICE-0173. 10 p.p.
8. Бажайкин А.Н. Характеристики воспламенения и горения топливной струи в теплоизолированных камерах сгорания. // ЦНИДИ. Журнал Двигателестроение. 1992.
9. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 592 с.
10. 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.
11. Зуев А.А. О возможности уменьшения теплового потока через поршень тракторного двигателя. Л. Записки ленинградского технологического института. 1967. – Т. 108. Вып. 2.
12. Физическое и математическое моделирование оптикофизических характеристик теплоизолирующих покрытий камеры сгорания при высокоинтенсивном конвективном и радиационном нагреве. Отчет о НИР по гранту Москвы, мер. 1.1.1. М.: МГТУ «МАМИ», 2005. 87 с.
13. Мерзликин В.Г., Товстоног В.А., Максимов Ю.В. и др. Излучатель тепловой энергии. Правообладатель Университет машиностроения. Заявка на устройство. Регистрационный № 2013123324 от 22.05.2013.
14. Мерзликин В.Г., Товстоног В.А., Максимов Ю.В. и др. Способ тепловых испытаний материалов и изделий. Заявка на способ. Правообладатель Университет машиностроения. Регистрационный № 2013123326 от 22.05.2013
15. Мерзликин В.Г., Максимов Ю.В., Максимов А.Д., Товстоног В.А., Чирин К.В., Елисеев В.Н. Физико-химическая установка для обработки металлов и материалов. Экспонат на 14-й Международной специализированной выставке «Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности» (27 - 31 мая 2013 г.). М.: - Каталог выставки «Металлообработка 2013». Изд. ЦВК «Экспоцентр». Стенд 84В47 (Университет машиностроения). С. 115.

16. Мерзликин В.Г., Худяков С.В., Предигер В., Сажин С.С. Оптимизация спектральных характеристик терморadiационных источников и облучаемых сред и материалов в природе и технике. М.: Сб. трудов межд. научно-практ. конф. «Инновации: перспективы, проблемы, достижения» под ред. А.А. Гажура. Разд. 3 «Инновации в организации и управлении производством, образованием и наукой». 27 мая 2013 г. ISBN 978-5-81215-1889-6. С. 371 – 382.
17. Мерзликин В.Г., Бекаев А.А., Сутугин В.Г., Кузнецов Ю.А. Полупрозрачное теплозащитное покрытие с отражающим оксидированным подслоем. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. №4, 2012. С. 16-29.
18. Товстоног В.А., Мерзликин В.Г. Методика и программное обеспечение для расчета радиационных и температурных полей плоских образцов многослойных полупрозрачных материалов при сложной радиационно-конвективной тепловой нагрузке. М.: МГТУ «МАМИ», электронное учебное пособие, ISBN 5-94099-031-2, 2004.
19. Takeshi Sugihara, Kenjiro Shimano, Yoshiteru Enomoto, Yasuko Suzuki, Masahiko Emi. Direct Heat Loss to Combustion Chamber Walls in a D.I. Diesel Engine. - 8th Int. Conf. on Engines for Automobile - ICE2007, 16 September. 2007. - Capri - Naples, Italy. Book of abstracts, 2007. P. 6. - Conference CD-ROM, paper № 2007-24-0006, p.p. 12.
20. Имитация космического полета [Электронный ресурс]. URL: http://astronaut.ru/bookcase/books/sharp01/text/26.html?reload_coolmenus
21. Космос начинается на Земле [Электронный ресурс]. URL: <http://vbega.ru/book/e2e28ed.html>.
22. Комплекс стендов и оборудования ЦСКБ “Прогресс” для исследования и испытания КА и их систем [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sumspace.ru>.
23. ОАО “НПО “Молния”. Лабораторная и стендовая база [Электронный ресурс]. URL: tehotdel@npomolniya.ru; molniya@npomolniya.ru.
24. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Анализ технических возможностей создания высокоэффективных установок радиационного нагрева для тепловых испытаний объектов аэрокосмической техники. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. № 1. С. 57 – 70.
25. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Особенности моделирования тепловых режимов крупногабаритных космических. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. № 3. С. 22 – 32.
26. Товстоног В.А., Томак В.И., Цветков С.В., Чирин К.В. Экспериментальный комплекс для теплопрочностных испытаний материалов и элементов конструкций при высокоинтенсивном нагреве. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2009. № 1. С.67–76.
27. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Характеристики источников излучения и излучательных систем высокоинтенсивного нагрева. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2001. № 4. С. 3–32.
28. Merzlikin V., Eliseev V., Gazhur A., Prediger V. Stand modeling of radiant and convective impact for the heat-insulated combustion chamber. FISITA World Automotive Congress. Maastricht, 01 – 06 June 2014, congress CD-ROM, paper № F2014-CET-143, p.p. 1 - 8.

Опыт закалки хромистых сталей в вакууме

к.т.н. доц. Овсянников Б.Л., к.т.н. доц. Васильевский В.В., к.т.н. доц. Куломзин Е.К.

МИЭМ НИУ ВШЭ

8(499)-235-20-87, obl_d@mail.ru, 8(499) - 235-12-23, vvasil@hse.ru, ekulomzin@hse.ru

Аннотация. Изложен опыт и результаты исследований режимов закалки изделий из стали 40X13 в вакууме, в единичном и мелкосерийном производстве. По-