

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НОРМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

А.А. Зуев

Статья посвящена одной из актуальных проблем современного двигателестроения – исследованию основных параметров локального радиационного теплообмена в поршневых двигателях.

This article is devoted to one of current issues of modern combustion engine construction – explore of principle parameters of local radiation heat exchange in the plunger engine.

Доля радиационного теплообмена в КС дизельного ДВС настолько высока, что использование аддитивного подхода при определении полного теплового потока, переданного от рабочего тела в стенки КС, недопустимо. Это обстоятельство было рассмотрено в работе [1].

Причем, вся лучистая теплота передается в течение короткого промежутка времени на линии сгорания-расширения, поэтому тепловоспринимающие поверхности КС испытывают достаточно мощные циклические «тепловые удары» [2].

Величина собственного теплового потока излучения газового объема в прикладных задачах для реального тела (к нему относятся большинство технических материалов) однозначно определяется в соответствии с законом Стефана – Больцмана:

$$E = \varepsilon \delta_0 T^4, \quad (1)$$

где ε – степень черноты излучателя; δ_0 – константа излучения абсолютно черного тела; T – температура излучателя.

Лучистый теплообмен в цилиндре дизеля изучал Л.М. Белинский [3]. В его исследованиях главное внимание было уделено эксперименту по оптическому методу измерения излучения в КС дизеля. Им было установлено, что излучение в КС в целом является сплошным, т.е. оно подобно излучению твердого тела, следовательно, излучают в основном твердые микрочастицы сажи, имеющие температуру отличную от температуры рабочего тела T_∞ .

Эту температуру, названную температурой пламени T_n , он предложил определять по эмпирической зависимости:

$$T_n = T_\infty \exp \left[0,106 \cdot (2 \bar{B}_0)^{0,24} \right], \quad (2)$$

где T_∞ – температура рабочего тела за пограничным слоем, К.

На основании вышеизложенного температура пламени равна теоретической температуре горения топлива, $T_n = T_{теор}$. Под теоретической температурой горения понимают максимальную температуру, достигаемую при горении в адиабатных условиях (т.е. когда вся теплота подводится к рабочему телу, при заданных исходной температуре и коэффициенте избытка воздуха). Для дизельного топлива $T_{теор} = 2100 \text{ K}$.

Метод исследования лучистого теплообмена в ДВС, предложенный Л.М. Белинским, в дальнейшем был развит рядом ученых [П. Флин, А. Эпплер, С.А. Батурин, В.А. Сеницын, В.Н. Ложкин].

На рис.1 представлен характер изменения температуры T_n , T_r в цилиндре дизеля в зависимости от нагрузки по результатам оптического индицирования и расчета индикаторной диаграммы.

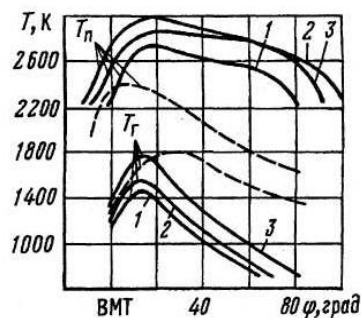


Рисунок 1 – Температуры пламени T_n (по результатам оптического индицирования) и газа T_r (рассчитанные по индикаторной диаграмме): — Эпплер, Батурин 1 – $p_e = 0,23 \text{ МПа}$; 2 – $p_e = 0,46 \text{ МПа}$; 3 – $p_e = 0,58 \text{ МПа}$; ---- Трибель

При исследовании процессов сложного теплообмена в качестве определяющей используют также среднемассовую температуру газа T_m . В качестве определяющей С.А. Батурин, В.Н. Ложкин [4] использовали температуру частиц сажи, определенная таким образом T_m температура слабо меняется при изменении нагрузочного режима работы дизеля (рис.2).

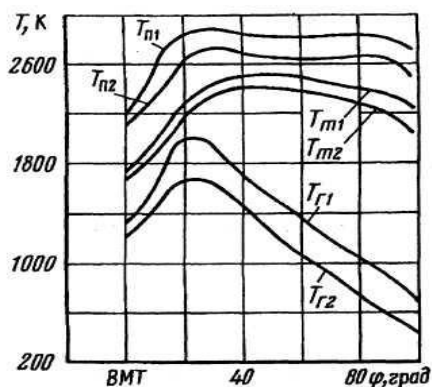


Рисунок 2 – Изменение среднеоптической T_n и средне-массовой T_m температур пламени и температуры газов T_g в цилиндре дизеля 8ЧН 13/14: $1-n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,6 \text{ МПа}$; $2-n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,23 \text{ МПа}$

Очень часто в практических расчетах теплообмена в камере сгорания используют условную температуру – результирующую температуру газов.

Результирующую температуру $T_{г.рез}$ приближенно можно определить также по формуле:

$$T_{г.рез} = T_{г.ср} + (0,6 \dots 0,8)(T_{г.ср} - 273).$$

На основе анализа экспериментальных данных была получена эмпирическая формула для определения степени черноты рабочего тела в зависимости от угла поворота коленчатого вала φ и среднего эффективного давления p_e :

$$\varepsilon = 2^{-0,21 p_e} (0,6866 - 0,3274 \cdot p_e) \cdot \varphi^{0,1537 + 0,265 p_e} \cdot \exp[(-0,014388 + 0,006162 \cdot p_e) \cdot \varphi] \quad (3)$$

На рис. 3 представлены результаты сравнения расчетных данных, полученных по предложенной формуле, и экспериментальных исследований А. Эплера и С.А. Батурина, разница не превышает 5 %.

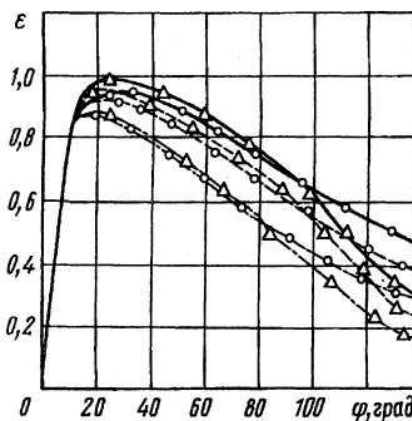


Рисунок 3 – Изменение степени черноты рабочего тела по углу поворота коленчатого вала в зависимости от среднего эффективного давления:

- $p_e = 0,58 \text{ МПа}$
- — — — — ;
- - - - - $p_e = 0,46 \text{ МПа}$
- · — · — · ;
- $p_e = 0,236 \text{ МПа}$
- Δ — ;
- ° — расчет

Современная теория лучистого теплообмена включает наличие расчетных методов, позволяющих определять локальные характеристики теплового излучения и применять эти методы для анализа лучистых взаимодействий на границах КС в цилиндре дизеля. Один из этих методов, разработанный профессором Ю.А. Суриновым [5], получил название «зонального».

Эффективное излучение представляет собой сумму собственного и отраженного потоков излучений.

$$E_{эф}(M_k) = E_{соб.}(M_k) + E_{отр.}(M_k), \quad (4)$$

$$\text{где } E_{соб.}(M_k) = \delta_0 \cdot \varepsilon(M_k) \cdot T(M_k), \quad (5)$$

где δ_0 – константа излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon(M_k)$ – степень черноты поверхности в точке M_k ; $T(M_k)$ – температура поверхности тела в точке M_k .

В рабочем цикле ДВС температура газа изменяется в широких пределах. Её значение, осредненное по объему КС, может достигать 2500 К, локальные значения могут быть и выше. При этом температура поверх-

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НОРМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

ности деталей $T(M_k)$, изготовленных из традиционных для двигателестроения материалов, колеблется в диапазоне 5 – 30 К. Если используют различные теплоизолирующие материалы с низкой теплопроводностью, что амплитуда колебаний может быть значительно больше.

Амплитуда колебания температуры зависит не только от теплофизических свойств применяемых материалов, но и в значительной степени определяется частотой вращения коленчатого вала двигателя. Чем выше частота вращения, тем меньше интервал времени между чередующимися рабочими циклами, амплитуда колебания температуры поверхности при этом уменьшается (рис. 4).

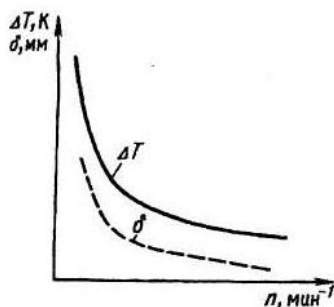


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды колебаний температуры поверхности и глубины проникновения температурной волны от частоты вращения двигателя

Для быстроходных дизелей амплитуда колебаний температуры, как правило, достигает 5 – 10 К, а для тихоходных 15 – 40 К (имеется в виду, что детали изготовлены из традиционных материалов).

Известно, что для основных деталей ДВС из традиционных материалов существуют допустимые температурные границы (таблица 1) [6], переход через которые может привести к нежелательным последствиям (к изменению структуры материала, ухудшающего его физико-механических свойств и т.п.).

Таблица 1 – Предельные значения температур материалов деталей

Материал детали	Максимальная $t, ^\circ$
Жаростойкие, жаропрочные стали и сплавы	600 – 650
Алюминиевые сплавы	250 – 350
Серые чугуны	400 – 500

Высокопрочные чугуны	500 – 550
----------------------	-----------

Степень черноты $\varepsilon(M_k)$ поверхностей в КС экспериментально исследовались автором [7]. На рис.5 представлена экспериментальная установка для определения интегральной излучательной способности твердых тел, изготовленная на базе современного агрегатного комплекса АПИР-С, в основе работы которого положен метод радиационной пирометрии. В качестве приемника излучения использован преобразователь пирометрического полного излучения ПП-131 01, имеющий спектральный диапазон чувствительности 0,4 – 8 мкм.

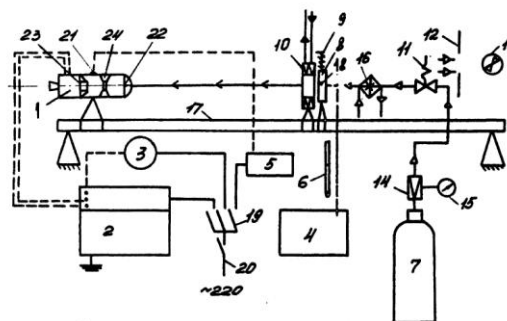


Рисунок 5 – Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – преобразователь первичный ППТ-131-01; 2 – преобразователь вторичный ПВВ-0100; 3 – прибор комбинированный цифровой Ш 4313; 4 – потенциометр постоянного тока ПП-83; 5 – потенциометр КВП1-503; 6 – термометр ртутный; 7 – баллон с газом; 8 – опытный образец; 9 – винт подвижной; 10 – экран; 11 – вентиль запорный; 12 – заслонка; 13 – вентилятор осевой; 14 – клапан редакционный БПО-5-2; 15 – манометр; 16 – устройство газогорелочное; 17 – штатив; 18 – термopара; 19 – переключатель; 20 – включатель; 21 – термopара поверхностная; 22 – линза; 23 – полевая диафрагма; 24 – опертурная диафрагма

На основании серии экспериментальных циклов разработана методика проведения эксперимента и получена «рабочая» зависимость для расчета интегральной нормальной степени черноты.

С целью дальнейшего сравнения полученных экспериментальных данных по методике первоначально исследовались образцы металлов, которые имеют наиболее полное литературное описание по степени черноты. На рис. 6, 7, 8 приведены некоторые результаты образцов по степени черноты, показывающих хорошую сходимость с литературными данными. Это позволяет нам сделать вывод о том, что данная установка пригодна для определения интегральной нормальной

степени черноты деталей цилиндро-поршневой группы камеры сгорания в двигателях внутреннего сгорания.

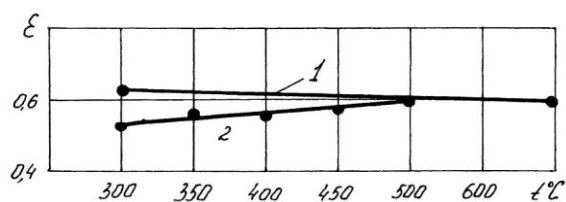


Рисунок 6 – Зависимость степени черноты образца из латуни (73,2%Cu+26,7%Zn) от его температуры: 1 – латунь окисленная при 600°C (0,61±0,59); 2 – латунь окисленная – эксперимент

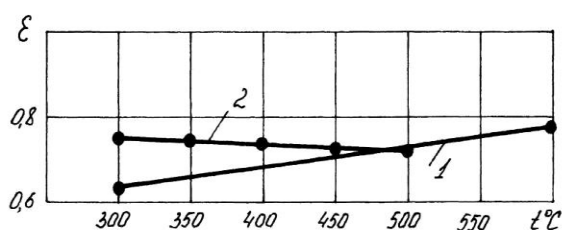


Рисунок 7 – Зависимость степени черноты образца из чугуна СЧ21-40 от его температуры: 1 – чугун окисленный при 600°C (0,64±0,76); 2 – чугун окисленный – эксперимент

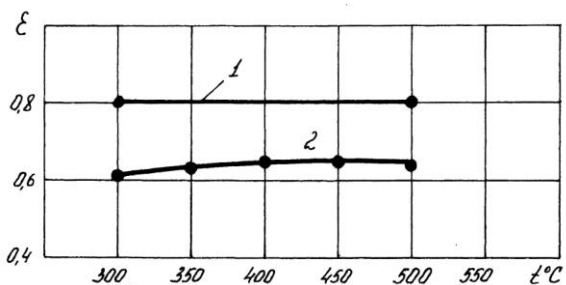


Рисунок 8 – Зависимость степени черноты образца из стали 20 от его температуры: 1 – сталь окисленная при 600°C (0,8); 2 – сталь окисленная – эксперимент

На рисунке 9 представлены результаты исследования опытных образцов из металла сталь 20 и Al – 30. Образцы имели теплоизоляционное покрытие Al_2O_3 , толщина покрытия 0,6 мм. Из рисунка 9 видно, что материал образца не влияет на степень черноты, характер изменения кривой 1 (сталь 20) и 2 (Al – 30) совпадают. Кривая 3, построенная по литературным данным, изложенным в работе А.Г. Блоха [8], отражает зависимость степени черноты оксида алюминия от температуры.

Необходимо отметить общую тенденцию изменения экспериментальных и литературных данных.

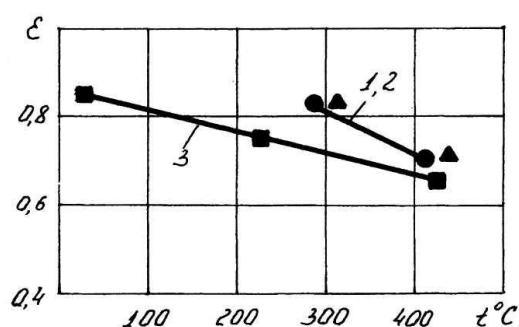


Рисунок 9 – Зависимость степени черноты материалов, покрытых оксидом алюминия: ■ – спеченый порошок Al_2O_3 ; ● – материал Al – 30 покрыт Al_2O_3 (толщина покрытия 0,6 мм); ▲ – материал Сталь 20 покрыт Al_2O_3 (толщина покрытия 0,6 мм)

При проведении «целевых» исследований решались следующие задачи:

- получить достоверные экспериментальные данные по степени черноты для различных поверхностей КС – как для дизельных, так и для бензиновых двигателей разного типа и назначения,

- определить зависимость ϵ_{cm} от температуры исследуемой поверхности.

Экспериментальному исследованию подвергались образцы из поршней дизельных двигателей А-41, Д-37, ЯМЗ-740, взятые после 50 часов работы двигателя в условиях реальной эксплуатации. На рисунке 10 представлена зависимость ϵ_{cm} образца из поршня двигателя А-41.

Полученные значения степени черноты $\epsilon_{cm} = 0,8$ показывают стабильное значение при температуре от 300 до 400°C. Аналогичный характер распределения имеют данные ϵ_{cm} образца из поршня двигателя Д-37 (рис.11), где мы отмечаем значения степени черноты равное $\epsilon_{cm} = 0,76$ при температурах 300 - 400°C. Образец из поршня двигателя ЯМЗ-740 имеет $\epsilon_{cm} = 0,82$ в интервале исследуемых температур (рис.12).

Таким образом, при данной постановке задачи и условиях, в которых проводились исследования, были получены довольно стабильные значения в пределах $\epsilon_{cm} = 0,78 - 0,82$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НОРМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

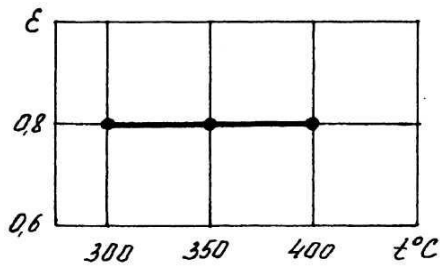


Рисунок 10 – Зависимость степени черноты образца из поршня двигателя А-41 от температуры исследования: КС – типа ЯМЗ

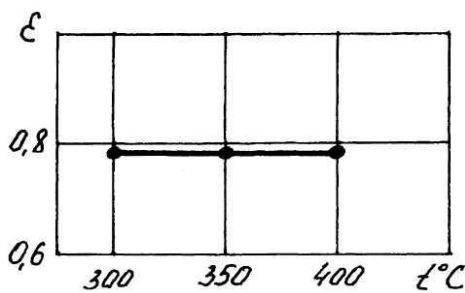


Рисунок 11 – Зависимость степени черноты образца из поршня двигателя Д-37 от температуры исследования: КС – полуразделенная

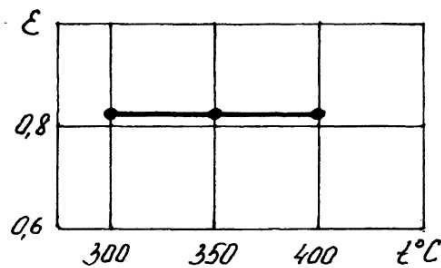


Рисунок 12 – Зависимость степени черноты образца из поршня двигателя ЯМЗ-740 от температуры исследования: КС – ЯМЗ-740

Представляет практический интерес процессы образования нагароотложения и сажеобразования на поверхностях КС. В исследованиях проводимых ранее автором эти вопросы не рассматривались. Нагар образуется в результате неполного сгорания топлива и смазочного масла в обедненных кислородом зонах, оказывает существенное влияние на протекание рабочего процесса.

Механизм сажеобразования рассмотрен в работе [9]. При сжигании 1 кг дизельного топлива в среднем получается 3 – 5 г сажи. Размеры частиц сажи составляют 0,01 – 1,0 мкм. Визуальные наблюдения с помощью электронного микроскопа показали, что фор-

ма частиц сажи близка к сферической. Часто они сгруппированы в ансамбль из нескольких шарообразных частиц, напоминающих по внешнему виду кластер или рыхлый комок [9].

Из области турбулентной диффузии, представляющей собой совокупность вихрей, охватывающих частицы газа и сажи, вырывается частица сажи, обладающая наиболее высокой энергией. Покидая окружающий ее вихрь, она перемещается на расстояние S, пока не попадет на поверхность стенки (рис.13). Частицы на поверхности стенки (т.е. образование нагароотложения) наиболее сильно удерживаются на тех участках, где в результате окисления топлива и смазочного масла образуются тонкие смолисто-лаковые пленки.

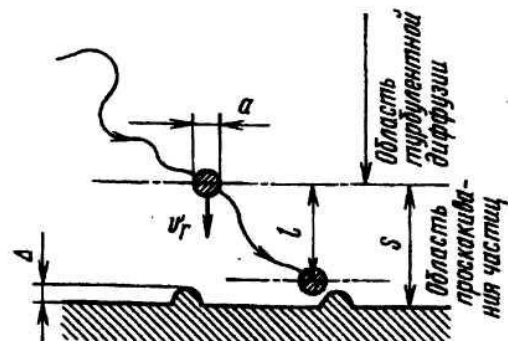


Рисунок 13 – Схематическое изображение осаждения частиц сажи на поверхности стенки

Диagramма образования и выгорания сажи в быстроходном дизеле при его работе в режиме полной нагрузки приведены на рис.14 [10].

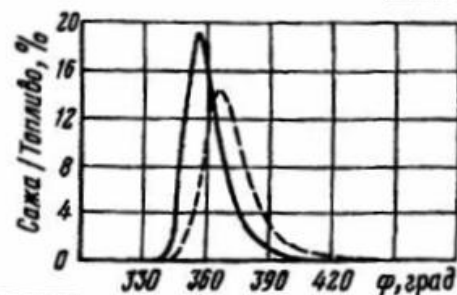


Рисунок 14 – Типичные диаграммы скоростей образования (—) и выгорания (---) сажи в быстроходном дизеле

ВЫВОДЫ

1. На базе современного агрегатного комплекта АПИР-С разработана и создана

экспериментальная установка для определения степени черноты твердых материалов и деталей ЦПГ. Установка надежна в работе.

2. Разработана методика эксперимента и получена рабочая формула для определения степени черноты. Достоверность результатов измерений и их обработка достигается тарировкой и подтверждается хорошим совпадением с известными литературными данными.

3. Определены реальные значения $\varepsilon_{см}$ деталей ЦПГ в объеме поставленных задач.

4. Установлено, что процесс горения твердых частиц в цилиндре дизеля представляет собой комплекс сложных взаимосвязанных физико-химических явлений, проходящих в условиях быстроменяющихся температур, давлений и концентраций реагирующих компонентов.

5. Экспериментально доказано, что происходит выгорание сажи на тепловоспринимающих поверхностях КС. Исходя из этого процессы образования и выгорания частиц сажи на поверхностях КС дизелей требуют более глубокого изучения.

6. Возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований и определить степень черноты деталей ЦПГ КС дизеля в период выгорания сажи. Именно этому и будут посвящены следующие экспериментальные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кавтарадзе, Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: учеб. пособие для вузов / Р.З. Кавтарадзе. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 592 с.: ил.

2. Сеницын, В. А. Аналитические методы исследования теплообмена в ДВС: учеб. пособие / В.А. Сеницын. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1993. – 69 с.

3. Белинский, Л. М. Теплоизлучение в камере сгорания быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия. Исследование рабочего процесса и подачи топлива в быстроходных двигателях / Л. М. Белинский, В. А. Сеницын. – Тр. НИИД. –Л.; М.: Машгиз, 1955. – С. 83-114.

4. Батулин, С. А. Исследование динамики сажевыделения и температуры пламени на неуставившихся режимах работы дизеля ЯМЗ-238 НБ / С. А. Батулин, В. Н. Ложкин // Исследование и совершенствование быстроходных дизелей. – Барнаул, 1978. – С. 46-53.

5. Суринов, Ю. А. Об итерационно-зональном методе исследования и расчета теплообмена в поглощающей и рассеивающей среде / Ю. А. Суринов // Изв. СО АН СССР. – 1978. – Вып. 2. - №8. – С. 106-125.

6. Костин, А. К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания / А. К. Костин, В. В. Ларионов, Л. И. Михайлов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 222 с.

7. Зуев, А. А. Экспериментальное определение локальной степени черноты деталей ЦПГ дизелей / А. А. Зуев; Межвуз. сб. научн. тр. – Барнаул, 1991. – С. 94-101.

8. Блох, А. Г. Тепловое излучение в котельных установках / А. Г. Блох. – Л.: Энергия, 1967. – 326 с.

9. Страдомский, М. В. Оптимизация температурного состояния деталей дизельных двигателей / М. В. Страдомский. – Киев, 1987.

10. Churchill, R. A. Low-Heat Rejections Engines-a concept review / R. A. Churchill, J. E. Smith, N. N. Clark // SAE Techn. Pap. Ser. – 1989. – № 890153. – P. 25-36.