

## 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  $\varepsilon$  – степень черноты излучателя;  $\delta_0$  – 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  $T_\infty$ .

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  $T_\infty$  – 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.

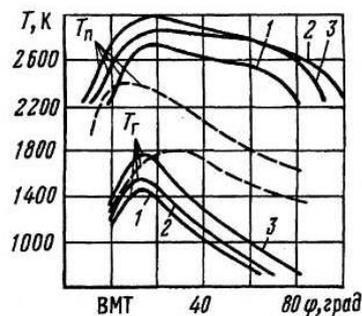


Рисунок 1 – Температуры пламени  $T_n$  (по результатам оптического индицирования) и газа  $T_r$  (рассчитанные по индикаторной диаграмме): — Эпплер, Батурин 1 –  $p_e = 0,23 \text{ МПа}$ ; 2 –  $p_e = 0,46 \text{ МПа}$ ; 3 –  $p_e = 0,58 \text{ МПа}$ ; ---- Трибель

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).

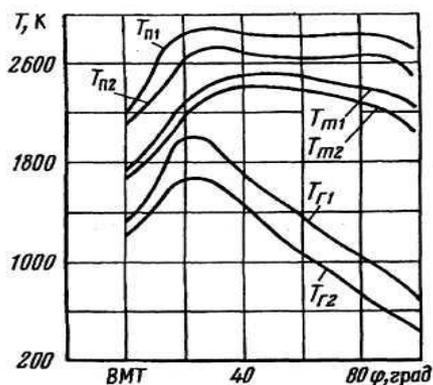


Рисунок 2 – Изменение среднеоптической  $T_n$  и средне-массовой  $T_m$  температур пламени и температуры газов  $T_r$  в цилиндре дизеля 8ЧН 13/14:  $1-n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_e = 0,6 \text{ МПа}$ ;  $2-n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_e = 0,23 \text{ МПа}$

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  $\varphi$  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 %.

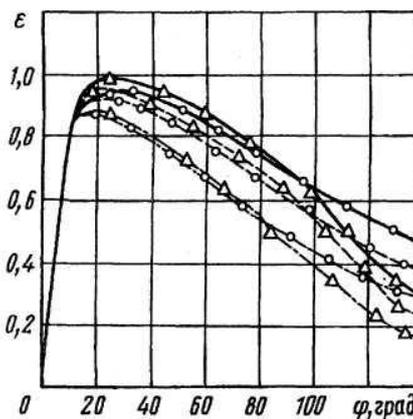


Рисунок 3 – Изменение степени черноты рабочего тела по углу поворота коленчатого вала в зависимости от среднего эффективного давления:

- $p_e = 0,58 \text{ МПа}$
- — — — — ;
- - - - -  $p_e = 0,46 \text{ МПа}$
- · — · — · ;
- .....  $p_e = 0,236 \text{ МПа}$
- 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  $\delta_0$  – 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).

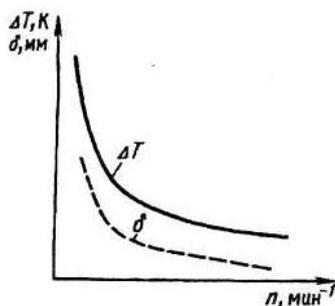


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды колебаний температуры поверхности и глубины проникновения температурной волны от частоты вращения двигателя

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.

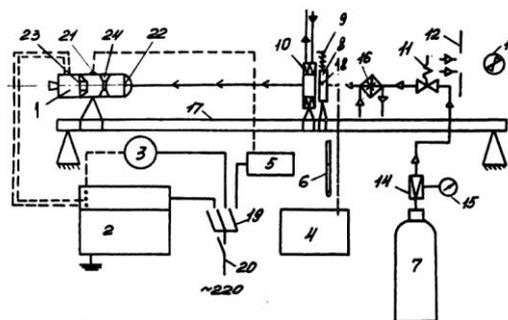


Рисунок 5 – Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – преобразователь первичный ППТ-131-01; 2 – преобразователь вторичный ПВВ-0100; 3 – прибор комбинированный цифровой Ш 4313; 4 – потенциометр постоянного тока ПП-83; 5 – потенциометр КВП1-503; 6 – термометр ртутный; 7 – баллон с газом; 8 – 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.

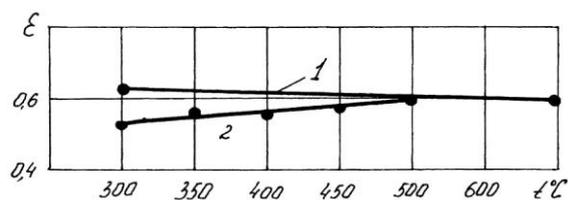


Рисунок 6 – Зависимость степени черноты образца из латуни (73,2%Cu+26,7%Zn) от его температуры: 1 – латунь окисленная при 600°C (0,61±0,59); 2 – латунь окисленная – эксперимент

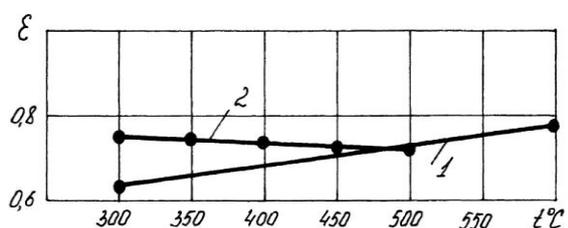


Рисунок 7 – Зависимость степени черноты образца из чугуна СЧ21-40 от его температуры: 1 – чугун окисленный при 600°C (0,64±0,76); 2 – чугун окисленный – эксперимент

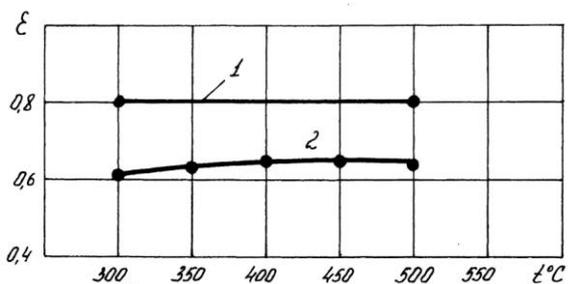


Рисунок 8 – Зависимость степени черноты образца из стали 20 от его температуры: 1 – сталь окисленная при 600°C (0,8); 2 – сталь окисленная – эксперимент

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.

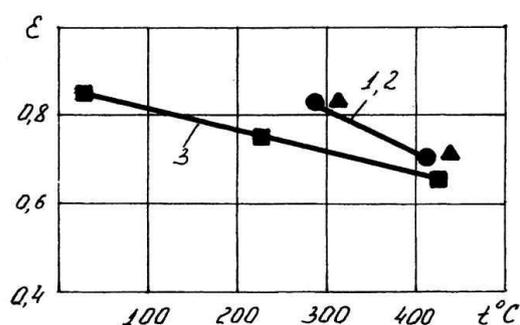


Рисунок 9 – Зависимость степени черноты материалов, покрытых оксидом алюминия: ■ – спеченый порошок  $Al_2O_3$ ; ● – материал Al – 30 покрыт  $Al_2O_3$  (толщина покрытия 0,6 мм); ▲ – материал Сталь 20 покрыт  $Al_2O_3$  (толщина покрытия 0,6 мм)

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  $\epsilon_{cm}$  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  $\epsilon_{cm}$  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  $\epsilon_{cm}$  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

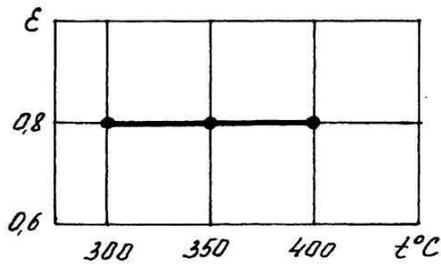


Рисунок 10 – Зависимость степени черноты образца из поршня двигателя А-41 от температуры исследования: КС – типа ЯМЗ

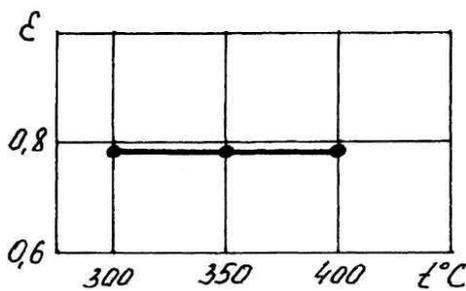


Рисунок 11 – Зависимость степени черноты образца из поршня двигателя Д-37 от температуры исследования: КС – полуразделенная

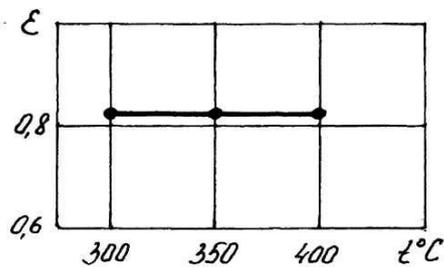


Рисунок 12 – Зависимость степени черноты образца из поршня двигателя ЯМЗ-740 от температуры исследования: КС – ЯМЗ-740

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.

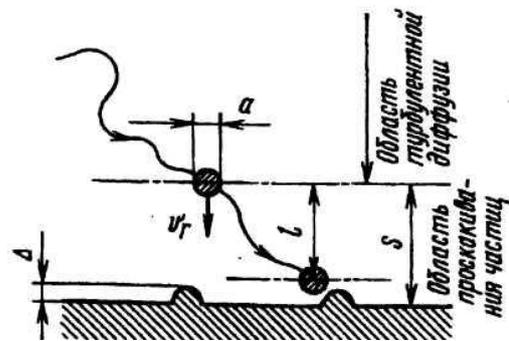


Рисунок 13 – Схематическое изображение осаждения частиц сажи на поверхности стенки

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

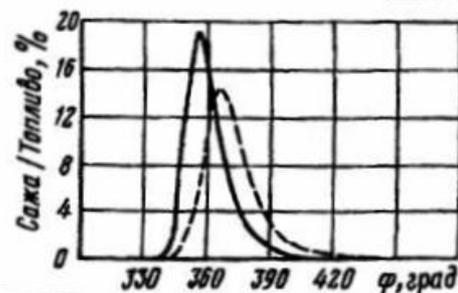


Рисунок 14 – Типичные диаграммы скоростей образования (—) и выгорания (---) сажи в быстроходном дизеле

### 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.