

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА НАГРЕВА КАТАЛИТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

Н.Г. Певнев, А.В. Залознов
ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Аннотация. В настоящей статье рассмотрен нестационарный процесс теплопередачи на стадии прогрева трехкомпонентного каталитического нейтрализатора (КН) отработавших газов двигателя внутреннего сгорания. Разработана и описана математическая модель расчета времени прогрева твердой структуры КН. Исходными данными являются конструктивные параметры и скоростной режим работы двигателя, температура окружающего воздуха, геометрические и теплофизические параметры КН. Алгоритм расчета времени прогрева КН включает последовательно тепловой расчет двигателя внутреннего сгорания, расчет тепловых потерь в выпускном коллекторе, расчет тепловых потоков в КН. Описанная математическая модель позволяет производить расчеты времени прогрева КН до его рабочей температуры при разных задаваемых исходных данных. Анализ получаемых результатов дает возможность определить условия для сокращения времени прогрева КН и, как следствие, для повышения эффективности его работы.

Ключевые слова: трехкомпонентный нейтрализатор, эффективность нейтрализации, нестационарный процесс теплопередачи, время прогрева каталитического нейтрализатора.

ВВЕДЕНИЕ

Экологическая безопасность автомобильного транспорта, в соответствии с Правилами ЕЭК ООН для удовлетворения требований Евро-3, ..., Евро-6, сегодня в значительной степени определяется свойствами систем питания и нейтрализации вредных выбросов в отработавших газах (ОГ) ДВС, которыми оснащаются современные транспортные средства.

В частности, к устройствам, входящим в систему обезвреживания ОГ, относятся трёхкомпонентные каталитические окислительно-восстановительные нейтрализаторы с λ -зондом, которые на сегодняшний день являются наиболее распространённой и эффективной системой очистки ОГ. Скорость и эффективность процессов нейтрализации ОГ зависит от температуры катализатора. Чем выше температура катализатора, тем выше скорость химических реакций, сопровождающих процесс катализа, и качественнее нейтрализация вредных веществ. Эта температура определяет эффективность его работы в процессе всего ездового цикла испытаний (Правила 83 ЕЭК ООН). Современный каталитический нейтрализатор (КН) позволяет уловить более 90 % токсичных соединений, содержащихся в

ОГ бензинового двигателя. Но несмотря на очевидный эффект от использования таких нейтрализаторов они обладают малой эффективностью при пуске и прогреве. Не успевший прогреться до рабочей температуры КН практически бездействует. Следует учитывать, что нейтрализатор начинает обезвреживать не менее 50% вредных выбросов, снижая концентрации СО и СН в ОГ, при его прогреве как минимум до 220–250 °С. [1]

Поскольку КН начинает эффективно работать только при достаточно высоких температурах, то в целях улучшения его рабочих характеристик необходимо проведение углубленного исследования, что позволит разработать мероприятия, сокращающие время прогрева нейтрализатора и, следовательно, увеличить его эффективность. Теоретическая база для исследования требует создания математической модели процессов теплообмена и физико-химических процессов гетерогенного катализа.

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КАТАЛИТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА

Различают три вида передачи теплоты: теплопроводностью; конвективным теплооб-

меном; излучением. В большинстве случаев в различных тепловых процессах имеют место одновременно все три вида теплопередачи с преобладанием какого-либо из них.

Бортовой КН можно рассматривать как однородную проточную термодинамическую систему, рабочим телом которой являются отработавшие газы двигателя, протекающие по каналам каталитических блоков. Исследуемый процесс прогрева КН является неустановившимся, температурное поле изменяется с течением времени. Таким образом, изучаемые процессы теплоотдачи являются нестационарными. [2]

Оценка времени прогрева КН до рабочей температуры основывается на уравнении теплового баланса, выражающее закон сохранения энергии:

$$Q_{\text{ОГ}}^{\text{вход}} + Q_{\text{КАТ}} = Q_{\text{ОГ}}^{\text{выход}} + Q_{\text{ОКР}} + Q_{\text{НАГР}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{ОГ}}^{\text{вход}}$ – тепловой поток, приносимый с отработавшими газами в каталитический нейтрализатор;

$Q_{\text{КАТ}}$ – тепловой поток, выделяемый в реакторе КН в результате экзотермической реакции окислительного катализа;

$Q_{\text{ОГ}}^{\text{выход}}$ – тепловой поток, уносимый с отработавшими газами;

$Q_{\text{ОКР}}$ – тепловой поток, передаваемый в окружающую среду;

$Q_{\text{НАГР}}$ – тепловой поток, расходуемый на нагрев структуры конвертора.

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА $Q_{\text{ОГ}}^{\text{вход}}$, ПРИВНОСИМОГО ВХОДЯЩИМИ ОГ В КН

Составляющими теплового потока $Q_{\text{ОГ}}^{\text{вход}}$ являются:

$$Q_{\text{ОГ}}^{\text{вход}} = Q_{\text{Г}} - Q_{\text{КОЛ}} \quad (2)$$

где $Q_{\text{Г}}$ – тепловой поток, покидающий камеры сгорания ДВС с отработавшими газами;

$Q_{\text{КОЛ}}$ – тепловые потери в окружающую среду через стенки выпускного коллектора на участке от двигателя до КН.

Расчет $Q_{\text{Г}}$. На основе заданных исходных данных (тип двигателя, мощность N_e , частота вращения коленчатого вала n , число i и расположение цилиндров, отношение S/D хода поршня к его диаметру, степень сжатия ε , тип

топлива и его физико-химические параметры) проводят тепловой расчет двигателя, в результате которого возможно определить как саму величину теплового потока $Q_{\text{Г}}$, так и составляющие характеристики величины теплового потока – массовый расход $G_{\text{ОГ}}$ и температура ОГ на выходе из камер сгорания. [3]

Расчет $Q_{\text{КОЛ}}$. Поток горячих отработавших газов, проходя через каналы выпускного коллектора, теряет часть тепловой энергии, охлаждаясь вследствие теплопередачи через стенки в окружающую среду.

Выпускной коллектор фактически является рекуперативным теплообменным аппаратом, в котором теплота от проходящих горячих ОГ передается к холодной окружающей атмосфере через разделяющую их непроницаемую стенку. В настоящей математической модели считаем, что теплообмен происходит в стационарном режиме, т.е. структурный материал выпускного коллектора уже прогрет до равновесной температуры, соответствующей текущему режиму работы двигателя. Таким образом, нестационарный режим прогрева стенок выпускного коллектора не учитывается.

Тепловой поток, рассеиваемый в атмосфере, рассчитывается по уравнению теплопередачи для рекуперативного теплообменного аппарата [2]:

$$Q_{\text{КОЛ}} = kF\Delta T \quad (3)$$

где ΔT – средняя разность температур (средний температурный напор), град.

F – площадь поверхности теплообмена, м². Для круглой трубы выпускного коллектора рассчитываем по формуле:

$$F = \pi dl \quad (4)$$

где l – длина трубы выпускного коллектора, м.

d – расчетный диаметр, м. При определении расчетного диаметра d необходимо учитывать следующее правило: в качестве расчетного диаметра принимать диаметр со стороны меньшего значения коэффициента теплоотдачи.

k – средний коэффициент теплопередачи через стенку, разделяющую теплоносители, Вт/(м²·К). Так как коэффициент k сам является функцией температуры, то для повышения точности расчетов дифференцируем уравнение (3) по длине трубы выпускного коллектора. При этом можно принять допущение, что сред-

ний температурный напор ΔT на каждом элементарном участке длины коллектора остается величиной постоянной. Соответственно, постоянным можно считать и коэффициент k .

Коэффициент теплопередачи для тонкостенных труб, для которых выполняется условие $d_{\text{нар}}/d_{\text{вн}} < 2$, можно рассчитывать по формулам теплопередачи через плоскую стенку. В этом случае погрешность расчета не превышает 4 %. При этом $\delta = (d_{\text{нар}} - d_{\text{вн}})/2$ – толщина стенки трубы, м.

Коэффициент теплопередачи через плоскую стенку рассчитывают по формуле [2]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (5)$$

где δ – толщина стенки выпускного коллектора;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки коллектора. Выбирается по справочным данным [4].

α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей;

Коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего потока ОГ и со стороны холодного окружающего воздуха (α_1 и α_2 соответственно) находим по эмпирическим критериальным формулам, подбираемым в зависимости от вида теплообмена, характера и режима течения, расположения поверхности теплообмена. Общая формула для расчета коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu_d \lambda_r}{d} \quad (6)$$

где Nu_d – число Нуссельта. Рассчитываем по критериальным уравнениям.

λ_r – теплопроводность газовой среды (отработавшие газы или воздух). Выбирается по справочным данным в зависимости от температуры [4].

d – диаметр трубы.

Расчет коэффициента теплоотдачи α_1 от потока ОГ к стенке выпускного коллектора. Считаем, что теплоотдача внутри каналов выпускного коллектора происходит в условиях вынужденной конвекции при турбулентном режиме течения ОГ при горизонтальном расположении труб. Тогда, расчет числа Нуссель-

та возможно произвести по критериальному уравнению М.А. Михеева [4]:

$$Nu_1 = 0,021 Re^{0,8} Pr_f^{0,43} \quad (7)$$

Расчет коэффициента теплоотдачи α_2 от стенки выпускного коллектора в окружающую среду. Допускаем, что теплоотдача снаружи выпускного коллектора происходит в условиях свободной конвекции (свободного движения) в окружающее неограниченное пространство.

В развитии свободного движения форма тела играет второстепенную роль. Здесь большее значение имеют протяженность поверхности, вдоль которой происходит движение, и ее положение. Закономерность изменения числа Нуссельта для расчета средней теплоотдачи для горизонтальных труб диаметром d , расположенных в воздухе, имеет вид (формула И.М. Михеевой [4]):

$$Nu_2 = 0,46 Gr_{d,f}^{0,25} \quad (8)$$

Вычисляя числа Нуссельта и подставляя их значение в формулу (6), определяем локальные коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 , характерные для конкретного температурного напора ΔT , соответствующего участка длины выпускного коллектора. После этого возможно рассчитать средний коэффициент k теплопередачи через стенку коллектора, разделяющую ОГ и атмосферу. Подставляя значение коэффициента в формулу (3), определяем потери тепла $Q_{\text{кол}}$ от выпускного коллектора в окружающий воздух.

Подставляя рассчитанные значения Q_r и $Q_{\text{кол}}$ в формулу (2), получаем значение $Q_{\text{ОГ}}^{\text{вход}}$.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА НАГРЕВА КН

А) температура $T_{\text{окр}}$, коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{в}}$ окружающего воздуха.

Б) физические параметры материала стенок КН – плотность $\rho_{\text{мат}}$, удельная теплоемкость $C_{\text{мат}}$, коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{мат}}$

В) температура $T_{\text{ог}}$ и массовый расход $G_{\text{ог}}$ потока ОГ на входе в КН;

Г) теплофизические параметры потока ОГ, зависящие от его температуры: плотность $\rho_{\text{ОГ}}$, удельная теплоемкость $C_{\text{ОГ}}$, коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ОГ}}$, кинематическая вязкость $\nu_{\text{ОГ}}$. Выбираются по справочным данным в зависимости от температуры [4].

Число Прандтля Pr . Критерий Прандтля является теплофизической характеристикой теплоносителя. Характеризует соотношение между скоростью обмена механической энергией между частицами (за счет вязкости) и скоростью обмена тепловой энергией (за счет теплопроводности) – мера подобия температурных и скоростных полей в потоке.

Д) Геометрические параметры КН. Внутреннее устройство твердой структуры КН выполнено в виде монолитного блока различной формы и размеров, в котором имеется множество продольных каналов (Рисунок 2). Поперечное сечение катализатора представляет из себя сотовую структуру, образованную стальными или керамическими стенками.

В настоящее время наиболее часто применяемыми (примерно 85% от общего количества) являются КН, изготовленные на керамических носителях, имеющие удельную плотность каналов в пределах от 15 до 78 шт./см², что соответствует индивидуальным размерам ячейки L около 1,25 мм. Толщина стенок каналов в керамической основе δ составляет около 0,15 мм (Рисунок 3).

Все более широкое распространение получают каталитические блоки на металлических носителях (Рисунок 1), имеющие удельную плотность каналов в пределах от 15 до 78 шт./см², что соответствует индивидуальным размерам ячейки L от 1,1 до 2,5 мм. Все чаще используются каталитические блоки с высокой удельной плотностью каналов. Толщина стенок каналов в металлической основе δ составляет около 0,05 мм. [5].

Для расчетов в настоящей математической модели принимаем следующие значения геометрических параметров КН:

- индивидуальный размер ячейки $L = 1,15$ мм;
- удельная плотность каналов составляет $n = 1/L^2 = 0,75$ шт./мм²;
- толщина стенок каналов $\delta = 0,1$ мм;
- радиус скругления $R = 0,02$ мм;
- толщина воздушного теплоизолирующего зазора между тепловым экраном КН и

внутренним корпусом каталитического блока $\delta_{\text{т.з.}} = 2$ мм;

- толщина виброизолирующего материала между внутренним корпусом КН и каталитическим блоком $\delta_{\text{вибро}} =$ мм.

При известных внешних геометрических размерах КН возможно вычислить геометрические параметры внутренней структуры каталитического сотового блока, рассчитать количество газопроводящих каналов.

Для наиболее распространенных КН цилиндрической формы.

Площадь поверхности корпуса нейтрализатора:

$$F_{\text{корпуса}} = \pi d_{\text{корпуса}} l_{\text{корпуса}} \quad (9)$$

где $l_{\text{корпуса}}$ – длина корпуса каталитического нейтрализатора.

$d_{\text{корпуса}}$ – внешний диаметр корпуса каталитического нейтрализатора.

Диаметр каталитического блока:

$$d_{\text{блока}} = d_{\text{корпуса}} - 2(\delta_{\text{т.з.}} + \delta_{\text{вибро}}) \quad (10)$$

Общая фронтальная площадь каталитического блока:

$$F_{\text{блока}} = \frac{\pi d_{\text{блока}}^2}{4} \quad (11)$$

Количество каналов в монолитном блоке КН, шт.:

$$N = n F_{\text{блока}} \quad (12)$$

Открытая фронтальная площадь одного газопроводящего канала:

$$F_{\text{кан}} = (L - \delta)^2 - (4 - \pi)R^2 \quad (13)$$

Полный смоченный периметр одного газопроводящего канала:

$$\Pi_{\text{кан}} = 4(L - \delta) - 8R + 2\pi R \quad (14)$$

Эквивалентный диаметр канала катализатора. Размер, который определяет развитие процесса теплопередачи. При конвективном теплообмене в каналах прямоугольного, неправильного или сложного сечения в каче-



Рисунок 1 – Подборка доступной коммерческой линейки каталитических нейтрализаторов на металлической подложке Emites.

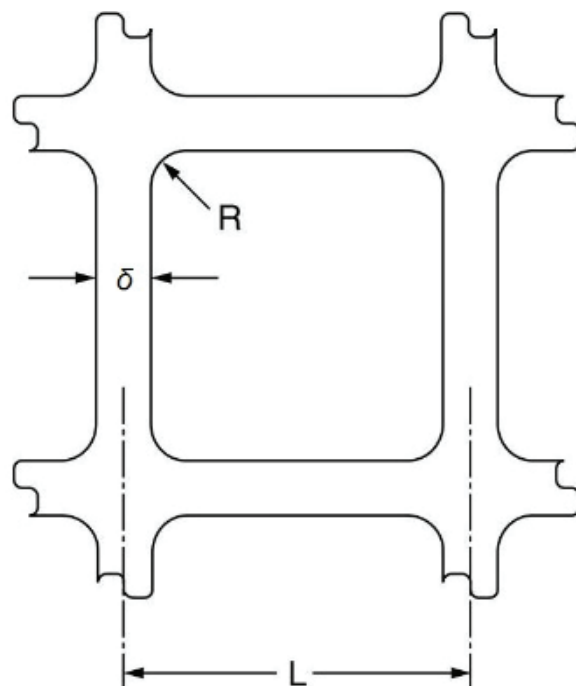


Рисунок 3 – Геометрические параметры квадратной ячейки в сечении

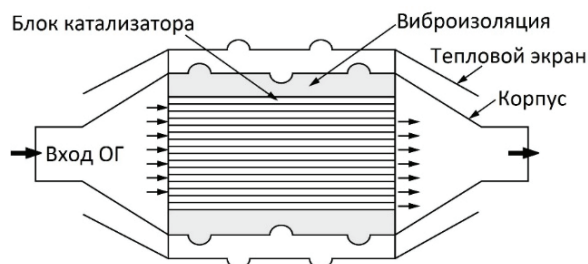


Рисунок 2 – Внутреннее устройство КН в продольном сечении

стве определяющего размера целесообразно использовать эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}$, равный учетверенной площади поперечного сечения канала $F_{\text{кан}}$, деленной на полный смоченный периметр сечения $\Pi_{\text{кан}}$:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4F_{\text{кан}}}{\Pi_{\text{кан}}} \quad (15)$$

Площадь поверхности стенок КН:

$$F_{\text{стенок}} = \Pi_{\text{кан}} N l_{\text{корпуса}} \quad (16)$$

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА $Q_{\text{НАГР}}$, РАСХОДУЕМОГО НА НАГРЕВ СТРУКТУРЫ КН

Так как процесс нагрева твердой структуры КН происходит за счет теплопередачи от горячих ОГ, то его можно разделить на две фазы, протекающие одновременно во времени: фазу конвективного теплообмена от горячего газа к поверхности твердой структуры и фазу теплопроводности от внешней границы стенки в ее сердцевину. [6]

Для правильной оценки и вычисления времени прогрева структуры КН до рабочей температуры необходимо оценить вклад каждой фазы процесса теплопередачи.

Нестационарные процессы теплопередачи описываются системой дифференциальных уравнений и условиями однозначности с большим количеством переменных. Попытки аналитического решения полной системы уравнений наталкиваются на серьезные трудности. Эти трудности помогает разрешить теория подобия. С помощью теории подобия размерные физические величины можно объединить в безразмерные комплексы, и рассматривать их как новые переменные. При введении в уравнения безразмерных комплексов число величин под знаком искомой функции формально

сокращается, что упрощает исследование физических процессов. Кроме того, новые безразмерные переменные отражают влияние не только отдельных факторов, но и их совокупности, что позволяет легче определить физические связи в исследуемом процессе.

Теория подобия устанавливает также условия, при которых результаты лабораторных исследований можно распространить на другие явления, подобные рассматриваемому. [7]

Фаза нестационарного процесса теплопроводности от внешней границы стенки КН в ее сердцевину. Для анализа этой фазы рассмотрим безразмерный критерий Био, который является важной характеристикой процесса теплопроводности:

$$Bi = \frac{\alpha_{OG} \cdot \delta}{2\lambda_{MAT}} \quad (17)$$

где α_{OG} – коэффициент теплоотдачи от потока ОГ к поверхности стенки, Вт/(м² · К)

Учитывая в настоящем исследовании очень малую величину толщины стенок КН, высокий коэффициент теплопроводности твердого материала структуры и относительно небольшой коэффициент теплоотдачи от газа к материалу, можно определить, что значение числа Био очень мало и практически стремится к нулю (примерно $Bi \sim 10^{-4} - 10^{-5}$). При таких значениях критерия Био температура на поверхности стенки КН незначительно отличается от температуры в ее сердцевине. Это указывает на то, что температура по толщине стенки КН распределяется практически мгновенно равномерно. В этом случае процесс нагрева твердого материала определяется интенсивностью теплоотдачи на поверхности стенок КН. Иначе говоря, процесс выравнивания температуры в теле происходит существенно интенсивнее, чем конвективный теплообмен на поверхности. Задача становится внешней. Соответственно время температуропроводности внутри тела чрезвычайно мало и имеет небольшое значение в искомом времени нагрева твердой структуры КН. [2]

Фаза нестационарного конвективного теплообмена от горячего газа к поверхности твердой структуры оказывает основное влияние на время прогрева КН. При этом перенос теплоты осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью. Под конвекцией теплоты понимают перенос теплоты при перемещении макрочастиц жидкости или газа в пространстве из области с одной темпера-

турой в область с другой. Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно происходит соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры. Конвективный теплообмен между потоком газа и поверхностью соприкасающегося с ним тела называется теплоотдачей.

При расчетах теплоотдачи используют закон Ньютона-Рихмана:

$$Q_{НАГР} = \alpha_{OG} F_{СТЕНОК} (T_{OG} - T_C) \quad (18)$$

где T_C – температура стенки КН;

Процесс теплоотдачи является сложным процессом, а коэффициент теплоотдачи является сложной функцией различных величин, характеризующих этот процесс. В общем случае является функцией формы, размеров, температуры поверхности нагрева, скорости газа, его температуры, физических свойств газа – коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости, плотности, коэффициента вязкости и других факторов. Значение с достаточной точностью можно определить зная число Нуссельта:

$$\alpha_{OG} = \frac{Nu_d \cdot \lambda_{OG}}{d_{ЭКВ}} \quad (19)$$

где Nu_d – число Нуссельта, безразмерный критерий, характеризующий интенсивность теплообмена на границе стенка – газ.

Уравнение подобия для процессов конвективного теплообмена при вынужденном вязкостно-гравитационном движении теплоносителя в горизонтальных трубах и каналах имеет общий вид:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr) \quad (20)$$

В частности число Нуссельта при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме течения может быть рассчитано по критериальному уравнению М.А. Михеева [4]:

$$Nu_d = 0,15 Re_d^{0,32} Pr_{OG}^{0,33} (Gr Pr_{OG})^{0,1} \varepsilon_t \varepsilon_l \quad (21)$$

где Pr_{OG} – число Прандтля, соответствующее температуре потока ОГ.

ε_t – температурная поправка

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_{OG}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (22)$$

Pr_c – число Прандтля, соответствующее температуре стенки канала;

ε_l – поправочный коэффициент, учитывающий влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена. При соотношении длины канала к его диаметру более 50 коэффициент ;

Re – критерий Рейнольдса, определяющий гидромеханическое подобие течений теплоносителей. Характеризует соотношение инерционных сил и сил вязкостного трения. Определяется по формуле [7]:

$$Re_d = \frac{\omega_{ог} \cdot d_{экв}}{\nu_{ог}} \quad (23)$$

где $\omega_{ог}$ – скорость движения газа. Если принять в настоящей модели движение газа равномерным, то по известным величинам массового расхода $G_{ог}$, плотности ОГ $\rho_{ог}$ и площади сечения катализатора можно вычислить значение скорости $\omega_{ог}$ по формуле:

$$\omega_0 = \frac{G_{ог}}{\rho_{ог} N F_{кан}}.$$

При движении жидкостей и газов в трубах и каналах существуют ламинарный ($Re_d \leq 2300$), турбулентный ($Re_d \geq 10^4$) и переходный от ламинарного к турбулентному ($Re_d \leq 10^4$) режимы течения флюида. Анализируя рассчитанные числа Рейнольдса, значения которых определены в интервале 20-100, то в рассматриваемых системах каталитических нейтрализаторов явно выраженный ламинарный режим течения потока отработавших газов [2].

Gr – критерий Грасгофа. Характеризует подъемную силу, возникающую в жидком или газообразном теплоносителе вследствие разности плотностей.

$$Gr = \frac{g d_{экв}^3}{\nu_{ог}^2} \beta \Delta T \quad (24)$$

где $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с²;

β – температурный коэффициент объемного расширения среды. Для газов определяется

$$\beta = \frac{1}{T_{ог}} \quad (25)$$

ΔT – характерный температурный напор, град. Разница температур в центре потока ОГ и вблизи стенки.

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА $Q_{окр}$, ПЕРЕДАВАЕМОГО В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ЧЕРЕЗ КОРПУС КН

Нагреваемый корпус каталитического нейтрализатора охлаждается, отдавая тепловую энергию в окружающую среду. Соответственно и поток горячих отработавших газов, проходя через каналы каталитического нейтрализатора, теряет часть тепловой энергии, охлаждаясь вследствие теплопередачи через стенки в окружающую среду.

Так как рассматриваемый процесс нагрева корпуса каталитического нейтрализатора является нестационарным, то и совместно протекающий процесс теплоотдачи от корпуса в окружающую атмосферу также является нестационарным. Температура корпуса изменяется от большей к меньшей по направлению движения потока ОГ внутри нейтрализатора. Иными словами, участки КН, расположенные ближе к выпускному коллектору, прогреваются раньше и имеют большую температуру, чем последующие. С течением времени горячий поток ОГ нагреет целиком весь корпус КН и, соответственно, вся поверхность корпуса нейтрализатора будет передавать тепло в окружающую среду. Таким образом, процесс теплоотдачи от корпуса КН в окружающую среду становится стационарным.

Установившийся тепловой поток, исходящий от нагретой всей поверхности корпуса КН и рассеиваемый в атмосфере, рассчитывается в соответствии с законом Ньютона-Рихмана по уравнению:

$$Q_{окр} = \alpha_B F_{корпуса} \Delta T \quad (26)$$

где α_B – коэффициент теплоотдачи от корпуса КН в окружающую среду;

ΔT – средняя разность температур между поверхностью корпуса КН и окружающим воздухом, град.

Для определения коэффициента теплоотдачи $Q_{ок}$, как и при расчете тепловых потерь от корпуса КН в атмосферу, допустим, что теплоотдача снаружи нейтрализатора происходит в условиях свободной конвекции (свободного движения) в окружающее неограниченное пространство. Коэффициент α_B находим по эмпирическим критериальным формулам. Об-

щая формула для расчета коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_B = \frac{Nu_d \lambda_B}{d_{\text{корпуса}}} \quad (27)$$

где Nu_d – число Нуссельта. Рассчитываем по критериальным уравнениям. Закономерность изменения числа Нуссельта для расчета средней теплоотдачи для горизонтальных труб, расположенных в воздухе, имеет вид (формула И.М. Михеевой [4]):

$$Nu_d = 0,46 Gr_{d,f}^{0,25} \quad (28)$$

где $Gr_{d,f}$ – число Грасгофа.

$$Gr = \frac{g d_{\text{корпуса}}^3}{\nu_B^2} \frac{1}{T_B} \Delta T \quad (29)$$

ΔT – разница температур стенки корпуса и окружающего воздуха.

Вычислив число Нуссельта и подставляя его значение в формулу (27), определяем коэффициент теплоотдачи α_B , характерный для конкретного температурного напора ΔT .

После этого, подставляя значение коэффициента α_B в формулу (26), возможно рассчитать потери тепла $Q_{\text{окр}}$ от корпуса каталитического нейтрализатора в окружающую атмосферу.

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА $Q_{\text{кат}}$, ВЫДЕЛЯЕМОГО В РЕАКТОРЕ КН В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО КАТАЛИЗА

Как известно, во время холодного пуска и прогрева наибольшая часть вредных выбросов – это СО и СН. Выбросы же NO_x достигают своего максимума лишь на прогревом двигателя. Поэтому в данной модели рассматривалось только окисление СО и СН. Необходимо также рассмотреть и окисление H_2 , так как эта реакция является дополнительным источником тепловой энергии.

Окисление водорода и окиси углерода происходит при более низких температурах, чем окисление углеводородов, для которых температура, при которой достигается заданная степень превращения, повышается по мере перехода от непредельных углеводородов к предельным и с уменьшением числа углеродных атомов в молекулах. Максимальное значение температуры соответствует окислению

наиболее стабильного из углеводородов – метана (CH_4).

Окисление углеводородов делится на два этапа: это быстрое окисление C_3H_6 (составляет 86 % от суммарного количества углеводородов) и медленное окисление CH_4 (составляет 14 % от суммарного количества углеводородов).

Наличие СН в отработавших газах двигателей объясняется тем, что смесь в камере сгорания является неоднородной, поэтому у стенок, в переобогащенных зонах, происходит гашение пламени и обрыв цепных реакций. Содержание СН в выхлопных газах возрастает при дросселировании, при работе двигателя на режимах принудительного холостого хода (ПХХ, например, при торможении двигателем). При работе двигателя на указанных режимах ухудшается процесс смесеобразования (перемешивания топливовоздушного заряда), уменьшается скорость сгорания, ухудшается воспламенение и, как результат, - возникают его частые пропуски. Выделение СН вызывается неполным сгоранием вблизи холодных стенок, или если до конца сгорания остаются места с сильным локальным недостатком воздуха, недостаточным распыливанием топлива, при неудовлетворительном завихрении воздушного заряда и низких температурах (например, режим холостого хода). Углеводороды образуются в переобогащенных зонах, где ограничен доступ кислорода, а также вблизи сравнительно холодных стенок камеры сгорания.

В практических расчетах оценку теплового эффекта от сгорания на катализаторе окиси углерода $Q_{\text{СО}}$, суммы углеводородов $Q_{\text{СН}}$ и водорода Q_{H_2} можно осуществить по выражениям [8]:

$$Q_{\text{СО}} = G_{\text{СО}} \cdot H_{\text{СО}} \cdot \text{CONV}_{\text{СО}} \quad (30)$$

$$Q_{\text{СН}} = G_{\text{СН}} \cdot H_{\text{СН}} \cdot \text{CONV}_{\text{СН}} \quad (31)$$

$$Q_{\text{H}_2} = G_{\text{H}_2} \cdot H_{\text{H}_2} \cdot \text{CONV}_{\text{H}_2} \quad (32)$$

где G_i – массовые расходы соответствующего вещества до КН. Массовые расходы соответствующего вещества зависят от режима работы двигателя и их можно посчитать исходя из процентного содержания в общей массе выхлопных газов;

H_i – низшая теплотворная способность окисления вещества [3];

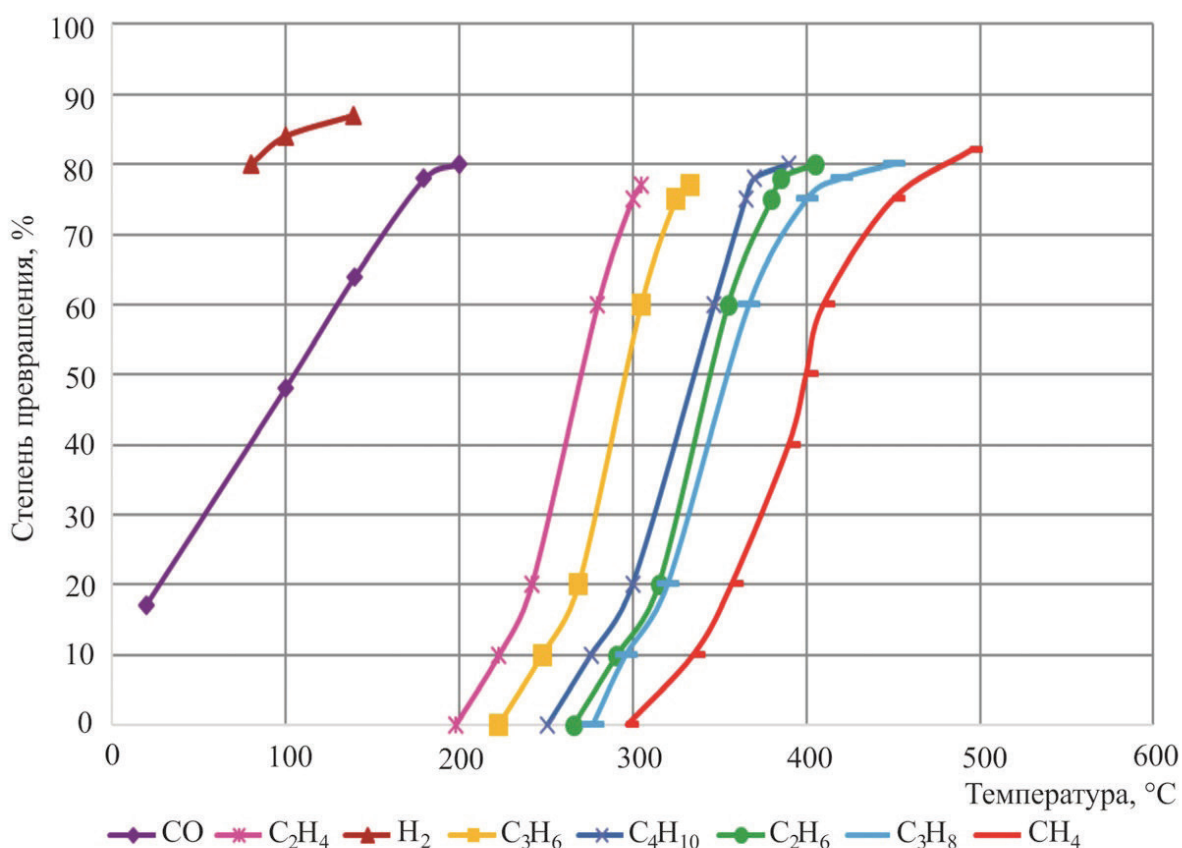


Рисунок 4 – Зависимость степени превращения окиси углерода, углеводородов и водорода на поверхности катализатора из благородного металла от температуры реакции

$CONV_i$ – процент конверсии вещества, зависящий от температуры катализатора. Для соответствующего вещества выбираем по графикам (Рисунок 4) [9].

Тогда суммарный тепловой эффект каталитической реакции составит:

$$Q_{\text{КАТ}} = Q_{\text{CO}} + Q_{\text{CH}} + Q_{\text{H}_2} \quad (33)$$

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ПРОГРЕВА КАТАЛИТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА

Для правильного расчета временных затрат на нестационарный процесс нагрева каталитического нейтрализатора необходимо учитывать, что входящий тепловой поток ОГ постепенно теряет некоторое количество тепла, затрачиваемое на нагрев стенок КН и на

потери в окружающую среду, но приобретает часть тепловой энергии за счет начинающейся экзотермической реакции окисления CO, CH и H₂.

Поскольку по направлению течения теплоносителя температуры потока ОГ и стенок каталитического нейтрализатора переменны, то меняются значения и теплофизических параметров, которые влияют на значения критериев подобия Nu, Re, Pr, Gr . Следовательно, изменяются и значения коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{\text{ОГ}}$ и $\alpha_{\text{В}}$.

Для повышения точности расчетов в настоящей математической модели следует продифференцировать уравнение теплового баланса (1) по длине катализатора. Это позволяет принять допущение, что температура потока отработавших газов на каждом элементарном участке (сечении) длины катализатора

dx^i остается величиной постоянной.

Считаем, что в течение определенного времени пока не прогрелся первый элементарный участок, к последующим сечениям будет поступать охлажденный тепловой поток. По прошествии времени нагревания первого элементарного участка, ко второму участку начнет поступать полный тепловой поток ОГ, после полного нагревания второго участка полный тепловой поток начнет поступать к третьему элементарному участку катализатора и т.д.

Следовательно:

1. При постепенном охлаждении теплового потока ОГ, температура потока газа на каждом элементарном участке последовательно убывает ($T_{\text{ОГ}}^1 > T_{\text{ОГ}}^2 > T_{\text{ОГ}}^3 > \dots > T_{\text{ОГ}}^i$), но остается постоянной в пределах участка.

2. За определенное время прогревания первого элементарного сечения, стенки катализатора на последующих участках также прогреваются, но до температуры меньшей, чем на предыдущих участках. Это является следствием уменьшения температурного напора ($T_{\text{ОГ}}^1 - T_{\text{С}} > T_{\text{ОГ}}^2 - T_{\text{С}} > \dots > T_{\text{ОГ}}^i - T_{\text{С}}$).

3. Цель расчета состоит в последовательном определении температуры потока газа $T_{\text{ОГ}}^i$, температуры стенки $T_{\text{С}}^i$ и времени прогрева τ_i для каждого элементарного поперечного сечения КН.

Рассматривая процесс теплоотдачи на каждом отдельно взятом i -ом элементарном сечении катализатора для корректного расчета $T_{\text{ОГ}}^i$ и $T_{\text{С}}^i$, необходимо определить тепловые потоки $dQ_{\text{НАГР}}^i, dQ_{\text{ОКР}}^i, dQ_{\text{КАТ}}^i$. Важно учитывать тепловые потери $Q_{\text{ОКР}}$ и частичный подогрев $Q_{\text{КАТ}}$ только от уже прогретых участков КН.

После чего корректируем и получаем входящий тепловой поток на следующее $(i+1)$ -ое элементарное сечение КН по формуле:

$$(Q_{\text{ОГ}}^{\text{вход}})^{i+1} = (Q_{\text{ОГ}}^{\text{вход}})^i - dQ_{\text{НАГР}}^i - dQ_{\text{ОКР}}^i + dQ_{\text{КАТ}}^i \quad (34)$$

Из уменьшенного теплового потока $(Q_{\text{ОГ}}^{\text{вход}})^{i+1}$ находим температуру потока отработавших газов на следующем элементарном сечении $T_{\text{ОГ}}^{i+1}$:

$$T_{\text{ОГ}}^{i+1} = \frac{(Q_{\text{ОГ}}^{\text{вход}})^{i+1}}{G_{\text{ОГ}} C_{\text{ОГ}}} \quad (35)$$

Для расчета времени прогрева твердой структуры стенок каталитического нейтрализатора определяющим уравнением является соотношение баланса, а именно, количество тепла, полученного телом, описываемое законом Фурье, равно количеству тепла, переданного теплоносителем, описываемого законом Ньютона-Рихмана [10]:

$$m_{\text{МАТ}} C_{\text{МАТ}} \frac{dT}{d\tau} = \alpha_{\text{ОГ}} F_{\text{стенок}} (T_{\text{ОГ}} - T_{\text{С}}) \quad (36)$$

Или после математических преобразований получаем формулу для времени τ_i прогрева стенок i -ого элементарного участка КН:

$$\tau_i = - \frac{m_{\text{МАТ}} C_{\text{МАТ}} \ln \theta^i}{\alpha_{\text{ОГ}} F_{\text{стенок}}} \quad (37)$$

где $\theta^i = \frac{T_{\text{ОГ}}^i - T_{\text{С}}^i}{T_{\text{ОГ}}^i - T_{\text{С}}^i}$ – безразмерная температура на i -ого элементарного участка КН;

T – текущее значение температуры стенок КН.

Определив предварительно время τ_i и температуру потока газа $T_{\text{ОГ}}^{i+1}$, преобразуя формулу (37), можно вычислить температуру нагрева стенки $T_{\text{С}}^{i+1}$ для следующего $(i+1)$ -ого элементарного участка:

$$T_{\text{С}}^{i+1} = T_{\text{ОГ}}^{i+1} - (T_{\text{ОГ}}^{i+1} - T_{\text{С}}^i) \exp\left(\frac{2\alpha_{\text{ОГ}}}{\delta \rho_{\text{МАТ}} C_{\text{МАТ}}} \tau_i\right) \quad (38)$$

Проинтегрировав время прогрева τ_i для каждого элементарного поперечного сечения, получаем общее затраченное время на прогрев твердой структуры КН τ .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подробно рассмотрен нестационарный процесс теплопередачи на стадии прогрева трехкомпонентного каталитического нейтрализатора отработавших газов двигателя внутреннего сгорания.

2. Разработана и описана математическая модель расчета времени прогрева твердой структуры КН, которая учитывает распределение тепловых потоков при нестационарном процессе нагрева.

3. Приведенная математическая модель позволяет определить время прогрева КН до его рабочей температуры при разных задан-

ных условиях, учитывая при этом конструктивные параметры и скоростной режим работы двигателя; геометрические и теплофизические параметры КН; температуру окружающего воздуха.

4. Анализ получаемых результатов дает возможность определить условия для сокращения времени прогрева КН и, как следствие, для повышения эффективности его работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автомобильный справочник BOSCH: пер. с англ. ООО «СтарСПб». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2012. – 1280 с.
2. Исаченко, В.П. Теплопередача / – В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 483 с.
3. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей : учеб. пособие / – В.П. Демидов. – М: Высш. шк., 2008. – 496 с.
4. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / – И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1976. – 345 с.
5. Cybulski, A. Structured Catalysts and

Reactors / – Jacob A. Moulijn. – USA: Taylor & Francis Group, 2006. – 809 с..

6. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / – М: Атомиздат, 1979. – 416 с.

7. Андреенков, А.А. Решение внутренней задачи теплообмена с помощью критериальных уравнений : учеб. пособие / – М.: МГТУ «МАМИ», 2011. – 44 с.

8. Ложкин, В.Н. К оптимизации теплового процесса катализа в матрицах автомобильных нейтрализаторов // Гавкалюк Б.В. – Технико-технологические проблемы сервиса. – 2010. – № 1(11). – С. 37-44.

9. Печеницына, Н.А. Снижение токсичности выхлопных газов за счет процессов каталитической нейтрализации // Рашевский Р.Б., Ширинкина Е.С. – Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – № 4. – С. 27-35.

10. Нестационарные процессы теплопередачи // Теплоэнергетика. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.anastasia-myskina.ru/teploenergetika/1/114-2-8-nestacionarnye-processy-teploperedachi.htm> – Дата обращения 23.01.17.

DESCRIPTION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF CALCULATION OF THE TIME OF NONSTATION HEATING PROCESS OF CATALYTIC NEUTRALIZER OF WASTE GASES

N.G. Pevnev, A.V. Zaloznov

Abstract. In this article reviewed the nonstationary process of heat transfer on warm-up stage of three-way catalytic converter of exhaust gases, installed on automobile with gasoline internal combustion engines. Developed and described a mathematical model for calculating the time of heating of the solid structure of the catalytic converter. The initial data are the design parameters and speed rotation mode of the engine, ambient temperature, geometric and thermophysical parameters of the catalytic converter. The algorithm of calculation of heating time of the catalytic converter includes sequentially the thermal design of the internal combustion engine, the calculation of heat losses in the exhaust manifold, the calculation of heat fluxes in the catalytic converter. The mathematical model allows calculating the heating time of the catalytic Converter to its operating temperature at different set of initial data. Analysis of obtained results enables to determine the conditions for shortening the time of heating of the catalytic Converter and, consequently, to improve the efficiency of its work.

keywords: three-way catalytic converter, the efficiency of neutralization, the nonstationary process of heat transfer, the warm-up time of the catalytic converter.

REFERENCES

1. Avtomobil'nyj spravocnik BOSCH [Automobile directory BOSCH]. Moscow, ООО Knizhnoe izdatel'stvo «За рулем», 2012. 1280 p
2. Isachenko V.P. Sukomel A.S., Osipova

V.A. Teploperedacha [Heat transfer].: Jenergiya, 1975. – 483 s.

3. Kolchin, A.I. Raschet avtomobil'nyh i traktornyh dvigatelej [Calculation of automobile and tractor engines: Textbook.] Moscow, Vysshshk,

2008. 496 p.

4. Miheev, M.A. Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Jenergiya, 1976. 345 p.

5. Cybulski, A. Structured Catalysts and Reactors [Structured Catalysts and Reactors]. Jacob A. Moulijn. USA, Taylor & Francis Group, 2006. 809 p.

6. Kutateladze, S.S. Osnovy teorii teploobmena [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow, Atomizdat, 1979. 416 p.

7. Andreenkov, A.A. Reshenie vnutrennej zadachi teploobmena s pomoshh'ju kriterial'nyh uravnenij : ucheb. posobie [Solution of the internal heat transfer problem with the help of criterial equations]. Moscow, MG TU MAMI, 2011. 44 p.

8. Lozhkin, V.N. K optimizacii teplovogo processa kataliza v matricah avtomobil'nyh nejtralizatorov [To optimize the thermal process of catalysis in matrices of automotive neutralizers]. Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa, 2011, no 1(11). P. 37-44.

9. Pechenicyna, N.A. Snizhenie toksichnosti vyhlopnyh gazov za schet processov kataliti-cheskoj nejtralizacii [Decrease in toxicity of exhaust gases due to processes of catalytic neutralization]. Rashevskij R.B., Shirinkina E.S. Vestnik PNIPU, Prikladnaja jekologija. Urbanistika, 2014, no 4. 27-35.

10. Nestacionarnye processy teplopere-

dachi. Teplojenergetika. [Nonstationary Heat Transfer Processes. Teploenergetika]. [Jelektronnyj resurs]. <http://www.anastasia-myskina.ru/teploenergetika/1/114-2-8-nestacionarnye-processy-teploperedachi.htm>. Data obrashhenija 23.01.17.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Певнев Николай Гаврилович (Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей», ФГБОУ ВО «СибАДИ». (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: pevnev_ng@sibadi.org).

Pevnev Nikolai Gavrilovich (Omsk, Russia) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the department «Maintenance and repair of vehicles», Siberian State Automobile and Highway Academy. (644080, Omsk, pr. Mira, 5, e-mail: pevnev_ng@sibadi.org).

Залознов Алексей Васильевич (Омск, Россия) – аспирант кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей», ФГБОУ ВО «СибАДИ». (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).

Zaloznov Alexey Vasilyevich (Omsk, Russia) – postgraduate student department of «Maintenance and repair of vehicles», Siberian State Automobile and Highway Academy. (644080, Omsk, pr. Mira, 5).

УДК 665.765

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОТОРНЫХ МАСЕЛ В ГАЗОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

С.В. Корнеев¹, С.В. Пашукевич¹, А.О. Тришкин¹, Р.В. Буравкин²

¹ФГБОУ ВО «ОмГТУ», г. Омск, Россия;

²ОАО «Сургутнефтегаз»

Аннотация. В статье представлены результаты изучения характеристик моторного масла G-Profi PSN 40, разработанного для применения в газопоршневых двигателях силовых электростанций, которыми оснащаются разрабатываемые месторождения. Отражены вопросы, касающиеся изменения характеристик моторного масла в процессе использования и определения периодичности их замены. Рассматривается изменение таких характеристик моторных масел, как кинематическая вязкость, щелочное число, кислотное число, а также производится оценка трибологических свойств по содержанию продуктов износа. Сделаны выводы о целесообразности использования исследуемого моторного масла.

Ключевые слова: моторное масло, мощность, газопоршневый двигатель, охлаждающая жидкость, кинематическая вязкость.