

УДК 621.436.004.5

Н.Г. Куць

Луцкий национальный технический университет

ПУТИ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИЧЕСКУЮ РАБОТУ В ДВС

Изучено влияние сажи на эффективность работы дизеля и ДВС Отто. Рассмотрено различные пути и методы повышения эффективности работы ДВС вследствие уменьшения потерь на разогрев двигателя, на преодоление сил трения и путем уменьшения выброса тепла в окружающую атмосферу.

Ключевые слова: *эффективность ДВС, сажевые частицы, тепловой насос, реакции горения, двигатель Стирлинга.*

Введение. Во всех двигателях внутреннего сгорания, работающих на жидком топливе, добиваются полного его сжигания. Реально это не происходит. Топливо горит не мгновенно. Для этого требуется определенное время. Если паровоздушная смесь действительно сгорает почти мгновенно, то горение образующихся сажевых частиц более длительный процесс. В результате ДВС во время работы выбрасывает в окружающую среду часть несгоревшего топлива в виде сажевых частиц.

Целью работы. Рассмотрение влияние горения сажевых частиц на эффективность работы ДВС, а также, каким образом повышается эффективность работы ДВС вследствие уменьшения потерь на разогрев двигателя, на преодоление сил трения и путем уменьшения выброса тепла в окружающую атмосферу.

Поставленная цель может быть достигнута путем решения следующих задач:

- изучить динамику горения сажевых частиц в КС ДВС и их размеры;
- разработать методику определения выбрасываемых сажевых частиц в окружающую атмосферу;
- проанализировать пути и методы уменьшения трения и износа трущихся пар трения;
- выяснить, каким образом можно уменьшить тепловые потери на разогрев двигателя и выброса тепла в атмосферу.

Анализ исследований. Было установлено, что работающий дизель на автомашине Mazda-6 после пробега 80 000 км выбрасывает в окружающую среду 3 кг сажи. Размер сажевых частиц оценивается в пределах 0,08 – 0,3 мкм [1]. Когда происходит коагуляция мелких частиц сажи, то максимальный размер составляет 0,15 мкм с максимумом распределения 0,08 мкм [1]. Тогда как размер капель жидкого топлива после форсунки при температуре 298 К составляет $5 \div 200$ мкм [2], т.е., в камере сгорания образуются крупные капли жидкого топлива, а на выхлопе отработавших газов размер сажи в 100 и более раз меньше. Мелкие частицы сажи загрязняют окружающую среду и оказывают вредное воздействие на здоровье человека. Поэтому практически все дизели на транспорте в последнее время оборудованы сажевыми фильтрами. Не будем касаться устройств и принципа работы сажевых фильтров, так как это выходит за рамки рассматриваемых путей и методов повышения эффективности преобразования тепловой энергии в механическую работу двигателями внутреннего сгорания.

Основная часть. Динамика горения сажевых частиц. Сажевая частица это уголь. При температурах газификации и выше на поверхности угля протекают реакции образования оксида углерода по схеме



Уголь формируется молекулами C_2 . Поэтому при определении реакции активации и константы прямой каталитической реакции (1.71) следует иметь в виду связь не атома углерода, а молекулу углерода C_2 в твердом состоянии в угле. Тогда энергия активации

$$E_a = 0,29(D_{C_2} - D_{O_2}) = 0,29(6,2 - 5,12) = 0,313 \text{ эВ}, \quad (2)$$

а константа прямой химической реакции в соответствии с [4]

$$k_f = 2(r_{C_2} + r_{O_2})^2 \left(\frac{2\pi k_B T}{\mu} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{A_{акт.}}{k_B T} \right), \quad (3)$$

где $r_{C_2} = 1,08 \text{ \AA}$ – радиус молекулы углерода, $r_{O_2} = 1,04 \text{ \AA}$ – радиус молекулы кислорода и $\mu = 1,139 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ – приведенная масса взаимодействующих молекул углерода и кислорода.

Кинетика протекания каталитических химических реакций образования оксида углерода, применительно к горению углерода, приобретает вид

$$\frac{dn_C}{dt} = k_f n_{C_2} n_{O_2} \quad (4)$$

Реакция (1) реализуется в том случае, когда молекула кислорода адсорбируется на углеродной пленке. Вероятность ее адсорбции определяется коэффициентом аккомодации

$$\kappa = 1 - \int_{E_{св.1}}^{\infty} f(E, T) dE, \quad (5)$$

где $E_{св.1}$ – энергия связи молекулы кислорода при ее адгезии на поверхности углерода и $f(E, T)$ – функция распределения Максвелла-Больцмана.

При адсорбции кислорода на поверхности углерода кинетика реакции (1) приобретает вид (4), и определяет унос углерода с поверхности сажевой частицы. При наличии физической адгезии молекул кислорода на поверхности углеродной пленки кинетическое уравнение (14) реализуется с определенной вероятностью. Эта вероятность равна отношению времени протекания реакции (1) ко всему времени исчезновения молекулы кислорода с ячейки адгезии, т.е.,

$$W_1 = \frac{\tau_{C_2}}{\tau_{C_2} + \tau'_{O_2} + \tau''_{O_2}}. \quad (6)$$

Здесь $\tau_{C_2} = \frac{1}{k_f n_{O_2} \kappa W_1}$ – время протекания реакции (1) в объеме одной молекулы углерода;

$\tau'_{O_2} = \frac{1}{J_{исп., O_2} \kappa S_{C_2}}$ – время температурного испарения молекул O_2 с поверхности углерода, где

поток испарения определяется по [4]

$$J_{исп.} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{8}{\pi M}} \frac{1}{d^3} \left(\frac{1}{k_B T} \right)^{3/2} \int_{E_{св.}}^{\infty} \left(1 - \frac{E_{св.}}{E} \right)^{1/2} E \exp\left(-\frac{E}{k_B T} \right) dE \quad (7)$$

с использованием энергии связи между молекулами O_2 и углеродной пленкой, равной 0.69

эВ, и $\tau''_{O_2} = \frac{1}{J_{рез.} \kappa S_{C_2}}$ – время между двумя последовательными столкновениями

адсорбированной молекулы кислорода с потоком молекул азота и кислорода, где в свою очередь

$$J_{рез.} = (\bar{v}_{N_2} \theta \int_{E_{св.1}}^{\infty} f(E, T) dE \bar{n}_{N_2} + \bar{v}_{O_2} \bar{n}_{O_2} \kappa) / 4 \quad (8)$$

Каталитическое горение сажевых частиц возникает в момент выполнения рабочего хода поршня двигателя. Скорость движения поршня для каждого типа двигателя находится по данным технического паспорта. При этом происходит адиабатическое расширение газа, и температура топливоздушнoй смеси падает по закону $T = T_{BMT} / \varepsilon^{\gamma-1}$, где коэффициент расширения ε зависит от времени следующим образом: $\varepsilon(t) = 1 + 2f(\varepsilon_0 - 1)t$. На протяжении всего рабочего хода радиус каждой сажевой частицы уменьшится вследствие испарения молекул C_2 с поверхности сажевой частицы и процесса горения в соответствии с реакцией (1). Процесс испарения реализуется с поверхности сажевой частицы свободной от молекул кислорода, а реакция горения возникает на поверхности, где находятся молекулы кислорода.

За полное время пребывания $\tau = \tau_{C_2} + \tau'_{O_2} + \tau''_{O_2}$ на всей поверхности сажевой частицы адсорбируется следующее число молекул кислорода

$$N_{O_2} = \frac{1}{4} \bar{v}_{O_2} \bar{n}_{O_2} \kappa S_{\kappa} \tau. \quad (9)$$

Это число молекул кислорода займет площадь $S_a = S_{C_2} N_{O_2}$, а доля поверхности, занятой кислородом составит: $\delta = S_a / 4\pi r_{\kappa}^2$. Тогда общее число прореагировавших частиц кислорода и углерода на всей поверхности сажевой частицы составит:

$$\bar{N}_1 = k_f n_{C_2}^* n_{O_2}^* \delta W_1 S_{\kappa} \Delta h \Delta t,$$

а число молекул C_2 , испарившихся за время Δt со свободной поверхности сажевой частицы

$$\bar{N}_2 = J_{ucn,1} (1 - \delta) S_{\kappa} \Delta t.$$

Здесь поток испарения молекул углерода определяется по (7) с учетом энергии связи молекул углерода в углеродной пленке, равной 1,855 эВ.

Общее количество молекул C_2 , которые покинули сажевую частицу радиуса r_{κ} составит

$$\bar{N} = 4\pi r_{\kappa}^2 (\bar{N}_1 + \bar{N}_2). \quad (10)$$

Это же количество частиц

$$\bar{N} = \frac{4}{3} \pi r_{\kappa}^3 \Delta h / 8r_1^3, \quad (11)$$

где r_1 – эффективный радиус молекулы C_2 .

Приравнявая (10) и (11) для толщины уноса с каждой капли топлива за время Δt получаем значение

$$\Delta h = 8r_1^3 \left[J_{ucn,1} (1 - \delta) + \frac{k_f (r_1 + r_2) \delta}{32r_1^3 r_2^3} \right] \Delta t. \quad (12)$$

Здесь r_2 – эффективный радиус молекулы кислорода

За время выполнения третьего такта толщина сгоревшего топлива с жидкой капли

$$h = \int_0^{1/2f} 8r_1^3 \left[J_{ucn,1} (1 - \delta) + \frac{k_f (r_1 + r_2) \delta}{32r_1^3 r_2^3} \right] dt \quad (13)$$

Количество несгоревшего топлива, которое выбрасывается выхлопными газами, в процентном отношении составит

$$\frac{\Delta m_T}{m_T} 100 = \frac{3h}{r_{жс}} \cdot 100. \quad (14)$$

В (14) важно знать первоначальный радиус образующихся капель топлива. В дизеле размеры жидких капель топлива формируются работой форсунки, а в ДВС Отто – работой карбюратора. Расход горючего определяется в первую очередь мощностью двигателя, а заданная мощность достигается количеством формируемых капель жидкого топлива в единицу времени. Когда форсунка впрыскивает топливо в КС, то количество капель топлива в единицу времени определяется противодавлением внутри форсунки и ее диаметром выходного отверстия. Противодавление определяется применяемым топливным насосом, а диаметр выходного отверстия форсунки может изменяться как при изготовлении, так и в процессе ее работы. Получается достаточно неопределенная ситуация. Но, для выяснения общего принципа сгорания топлива в КС ДВС при заданном расходе топлива можно задать диаметр выходного отверстия, таким, чтобы получить скорость истечения топлива, экспериментально замеренную.

Так в работе [2] скорость истечения топлива из форсунки была получена от 150 до 400 м/с. Средняя скорость истечения 275 м/с. Для дизеля расход топлива составляет $\dot{m} = 4,707 \cdot 10^{-3}$ кг/с [3]. Чтобы получить скорость истечения 275 м/с при заданном расходе необходимо диаметр выходного сечения положить ~ 5 мм. Тогда на выходе из форсунки радиус жидких капель топлива формируется величиной растягивающих усилий, обусловленных разностью давлений воздуха вблизи поверхности струи и окружающей среды

$$r_{жс} = \frac{6\sigma}{\rho_0 v_{жс}^2} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad (15)$$

где $\sigma = 0,02785 \text{ Дж/м}^2$ – коэффициент поверхностного натяжения дизельного топлива [4]. Реально в дизеле наблюдались сажевые частицы размером $2,94 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ [5]. В работе [4] отмечается, что наиболее вероятное значение среднего радиуса сажевых частиц в КС дизеля равно $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Отличие незначительное, но в дальнейшем будем использовать экспериментальное значение среднего радиуса сажевых частиц в КС дизеля.

Как и следовало ожидать, радиус капель жидкого топлива по выходе из форсунки в дизеле меньше чем в карбюраторе вследствие большего противодавления, применяемого в дизеле. Обычно для дизеля максимальное давление в КС не превышает 80 атм. Такому давлению соответствует максимальная температура 1680 К. Процент выброса сажевых частиц, при различных средних значениях их радиуса, для дизеля с параметрами Д-245, в зависимости от

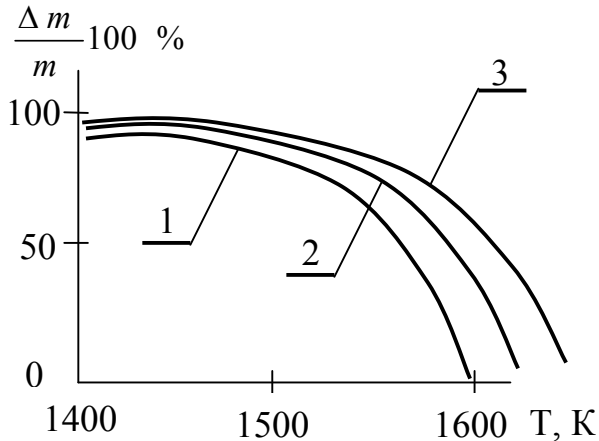


Рис. 1. Зависимость процента выброса сажи от температуры в максимуме при:
1 - $r_{жс} = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$; 2 - $r_{жс} = 2,94 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ и
3 - $r_{жс} = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$;

температуры, приведен на рис. 1. При температуре в максимуме 1680 К даже самые крупные среднеэффективные частицы сажи сгорают почти полностью. При более высоких температурах выбрасывается доля частиц, обусловленная функцией распределения частиц сажи по их размеру. Обычно для дизелей температура в максимуме находится в пределах $1600-1800^{\circ} \text{ С}$ [4]. При таких температурах выброс сажи практически не происходит.

Когда применяется турбонаддув в дизелях, то при заданном расходе резко снижается температура в максимуме, и тогда выброс сажи заметно возрастает. В этом случае необходимо применять сажевые фильтры, что и реализуется практически в автотранспорте.

В карбюраторных двигателях ситуация сложнее. Сажевые частицы в карбюраторах образуются сравнительно больших размеров. Давление в КС таких двигателей составляет 40-60 атм. Давление 60 атм. реализуется при температуре топливоздушной смеси 2360 К, а давление 40 атм. – при 1575 К. При температуре 1400 К сажевые частицы в ДВС Отто сгорают полностью, а при реализуемых давлениях и температурах в таких двигателях сажевые частицы вообще пропадают. Применение турбонаддува уменьшает размер сажевых частиц, что способствует их еще более полному сгоранию в КС. Следовательно, на эффективность работы карбюраторных двигателей, образующиеся сажевые частицы после карбюрации топлива, не влияют.

При сжигании углеводородного топлива в КС ДВС выделяющаяся энергия Q расходуется на: адиабатическое сжатие топливоздушной смеси $\Delta E_{сж.}$, выполнение механической работы A , разогрев двигателя $Q_{ов.}$, выброс части тепла в окружающую атмосферу ΔQ и потери на преодоление возникающих сил трения $Q_{тр.}$. В результате энергетический коэффициент полезного действия теплового двигателя

$$\mu_0 = \frac{A}{Q} = \frac{A}{\Delta E_{сж.} + A + Q_{ов.} + \Delta Q + Q_{тр.}}. \quad (16)$$

Коэффициент полезного действия двигателя определяет по существу эффективность работы двигателя. Чем выше коэффициент полезного действия двигателя, тем выше его эффективность.

Повысить эффективность работы ДВС можно за счет уменьшения потерь на разогрев двигателя, на преодоление сил трения и путем уменьшения выброса тепла в окружающую атмосферу. Как решаются указанные проблемы, рассмотрим подробнее.

Силы трения устраняются путем применения лучших смазочных материалов. Но самое существенное в этом направлении – это хорошая обработка трущихся деталей. Например, коленчатый вал, поршневые кольца обрабатываются на специальных станках путем финишной

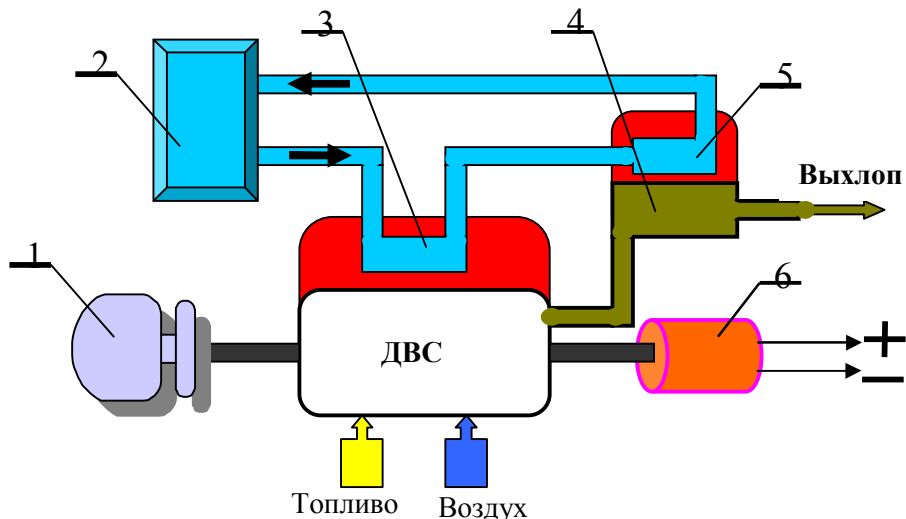


Рис. 2. Схема комплексного использования тепловой энергии сгораемого топлива в ДВС: 1 – механический привод; 2 – потребитель тепловой энергии; 3 – теплообменник на корпусе двигателя; 4 –

механической обработки с применением самых современных методов такой обработки. Важно при этом обеспечить минимальный износ трущихся деталей, как в ходовой части, так и внутри двигателя с применением специальных смазочных масел. Для уменьшения трения и износа поверхности трущихся пар трения следует упрочнять покрытиями с многослойным плотноупакованным состоянием [6-8]

Уменьшение выброса тепла в окружающую атмосферу осуществляют путем частичного использования тепла отработавших газов для обеспечения турбонаддува и вращения электрогенератора турбиной, работающей от выхлопных газов. В работе [9] предложено применить двигатель Стирлинга в качестве теплового насоса на выхлопном устройстве и преобразовать это тепло в электрическую энергию. Вырабатываемая электрическая энергия используется для питания системы управления работой двигателя. Оптимальная система управления позволяет существенно экономить расход горючего и таким образом повышается эффективность работы двигателя. Например, в работах [4,10] рассмотрено большое многообразие обеспечения оптимального управления работой ДВС.

Затраты тепла на разогрев двигателя являются самыми существенными потерями. Уменьшить эти потери можно в следующих направлениях:

1. Обеспечить эффективное сгорание топлива при уменьшении температуры топливоздушной смеси. Детально эта проблема рассмотрена в работе [4], где проведен анализ различных методов повышения эффективности сгорания топлива. Основные из них:

- обеспечение оптимальных условий горения топлива;
- улучшение подачи топлива с его подогревом от корпуса двигателя;
- применение катализаторов горения; обработка топлива магнитным и электрическим полем;
- применение электрического разряда и теплового воздействия для улучшения горения топлива и др.

2. Применение теплового насоса для охлаждения корпуса двигателя [11] и использование этого тепла для обеспечения комфортных условий для пассажиров транспортного средства. Другой вариант применения теплового насоса предложен в работе [9], где рассмотрена возможность использования двигателя Стирлинга в качестве теплового насоса и преобразования полученной теплоты от корпуса двигателя и от системы выхлопа отработавших газов в электрическую энергию.

3. В строительстве и на транспорте в основном используется комплексная схема преобразования тепловой энергии сгоревшего топлива в механическую работу, тепло для обогрева транспортного средства или строительного сооружения, а также в электрическую энергию. Схема такого преобразования и принцип его работы показаны на рис. 2. Комплексное использование тепловой энергии сгоревшего топлива в КС ДВС позволяет увеличить коэффициент полезного преобразования сгоревшего топлива до 70%.

4. Интересное техническое решение изложено в работе [8]. Предлагается значительно уменьшить теплопередачу на корпус двигателя путем нанесения покрытия внутри КС нитридом титана толщиной не более трех молекулярных монослоев, которые образуют 5-е агрегатное состояние – плотноупакованное. В этом случае при упругом столкновении с внутренней поверхностью КС молекулы топливовоздушной смеси будут передавать энергию не путем столкновения с отдельными кластерами материала корпуса двигателя, как это описано в [12], а со всей структурой нанесенного покрытия. При этом резко уменьшится коэффициент передачи энергии в процессе конвективного теплообмена внутри КС ДВС

Выводы. Таким образом, с позиций молекулярно-кинетической теории и кластерного строения вещества рассмотрено влияние сажи на эффективность работы дизеля и ДВС Отто и повышение эффективности работы ДВС вследствие уменьшения потерь на разогрев двигателя, на преодоление сил трения и путем уменьшения выброса тепла в окружающую атмосферу выхлопной системой.

1. Дьяков Е.В., Наац И.Э. Обратная задача для уравнения коагуляции дисперсных систем. / Сб. научных трудов СевКавГТУ. Серия «Естественнонаучная», 2006, № 2. – С. 12-17.
2. Костин А.К., Пугачев Б.П., Кочинев Я.Н. Работа дизелей в условиях эксплуатации. – Л.: Машиностроение, 1989. 284 – С. 2.
3. Дизели Д-243, Д-245 и их модификации. Руководство по эксплуатации 243-0000100РЭ. – Мн.: Минский моторный завод, 2009. – С. 50.
4. Гречихин Л.И. Двигатели внутреннего сгорания. Физические основы технической диагностики и оптимального управления. Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – С. 270.
5. Luo Lang, Pipho Michael J., Ambs Jeffrey L., Rittelsohn David B. Particle growth and oxidation in directinjection diesel engine /SAE Techn. Pap. Ser. 1989. № 890580. P. 1-10.3.
6. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику.- М.: Машиностроение, 2007. – С. 496.
7. Плазменно-вакуумные покрытия: Монография / Ж.А. Мрочек, А.К. Вершина, С.А. Иващенко и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – С. 369.
8. Гречихин Л.И. Плотноупакованное состояние – основа нанотехнологий. Доклад на XIX Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» Севастополь, 17-22 сентября 2012 г.
9. Гречихин Л.И., Лапцевич А.А., Куць Н.Г. Аэродинамика летательных аппаратов. – Мн.: «Право и экономика», 2012. – 285 с..
10. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателем внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1989. – 416 с.
11. Kim Sung Chul, Kim Min Soo, Hwang In Chul, Lim Tae Won. Performance evaluation of CO₂ heat pump system for full cell vehicles considering the heat exchanger arrangements. /Ins. J. Refrig. 2007. 30. № 7. P. 1195-1206.
12. Гречихин Л.И., Куць Н.Г. Водяное охлаждение двигателя внутреннего сгорания. /Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). 2011. Вип. 32. С. 109-117.