

УДК 621.43.01

Канд. техн. наук В. А. Мазин

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

МЕТОД РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДИССОЦИАЦИИ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАБОЧЕГО ТЕЛА КОМБИНИРОВАННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Предложено дифференциальное уравнение теплоты, участвующей в диссоциации. Разработана расчетная методика учета энергетических эффектов диссоциации составляющих рабочего тела комбинированных двигателей внутреннего сгорания. Методика базируется на классических представлениях о сгорании углеводородных топлив, зависимости диссоциации газов от температуры и давления. Положено: реакции окисления, диссоциации и рекомбинации протекают непрерывно, их интенсивность зависит от конкретных условий. Рассчитан цикл бензинового двигателя МеМЗ-307 с учетом диссоциации количественно наиболее представленных составляющих: углекислого газа и паров воды. По индикаторной работе цикла установлена погрешность исходной расчетной методики.

Ключевые слова: рабочий цикл, рабочее тело, продукты сгорания, диссоциация, рекомбинация, расчетная методика, индикаторная работа цикла, погрешность.

Актуальность

В настоящее время предъявляются повышенные требования к эффективности и экономичности комбинированных двигателей внутреннего сгорания (КДВС), соблюдению действующих экологических норм. Для исследователей и конструкторов это выражается в большей обоснованности принимаемых допущений, полном, адекватном и точном описании цикла, минимизации потерь и оптимизации энергетического баланса.

Диссоциация и рекомбинация (ДиР) газов, составляющих рабочее тело (РТ), проявляются в цилиндре и выпускной системе КДВС. Эти процессы взаимосвязаны и взаимозависимы, противоположны: когда диссоциация интенсифицируется, рекомбинация подавляется. На диссоциацию энергия затрачивается, при рекомбинации – наоборот выделяется, ввиду этого меняются состав и состояние РТ, индикаторная работа цикла и энергия газа, направляющегося в турбину, перераспределяется энергетический баланс.

По сложившимся в теории КДВС представлениям ДиР газов имеют место в процессах сгорания и расширения; на показатели цикла влияют незначительно: диссоциация – ввиду низкой температуры ($T \leq 2500$ К), рекомбинация – ввиду малоэффективного преобразования выделяющейся теплоты в механическую работу [1]. Считается: 1) причиной химической неполноты сгорания топлива не может быть теплота, затраченная на диссоциацию, т.к. в обратном процессе рекомбинации она полностью компенсируется; 2) максимальная температура РТ тепловых дви-

гателей из-за диссоциации ограничена, для КДВС на углеводородных топливах это $T \approx 3000$ К (ниже теоретически возможной на ≈ 200 К) [2].

По оценкам [3] для бензиновых двигателей потери теплоты от диссоциации составляют ≈ 7 % нижней теплоты сгорания топлива. В современных физико-математических моделях (ФММ) КДВС и расчетных методиках, однако, этим пренебрегается [4, 5], встречаются лишь упоминание или краткое описание [1, 6]. В связи с нынешними задачами двигателестроения углубление знаний, учет и оценка влияния диссоциации и рекомбинации на показатели КДВС актуальны и остры.

Анализ литературы

В ранних методиках допускается: диссоциация имеет место только в процессе сгорания, энергетические эффекты диссоциации не меняются во времени (не зависят от состояния РТ), математически такие эффекты относят к потерям от неполноты сгорания топлива и учитывают в коэффициенте использования теплоты [3] (коэффициент неполноты сгорания – новое название).

Существует расчетная методика, основанная на законах химической термодинамики: составляется система кинетических уравнений сгорания-диссоциации-рекомбинации, учитывается распад молекул на молекулы элементов, молекул элементов на атомы, частичная ионизация атомов, неизвестные определяются решением системы уравнений материального баланса и уравнений по закону действующих масс. Константы равно-

весия рассчитываются для действительного состояния (T, p – температура, давление), по их соотношению устанавливаются состояние химического равновесия, направленность процесса, концентрации реагентов и состав смеси, степень диссоциации и затраты энергии на нее [7–9]. Имеются модификации в зависимости от широты списка компонентов (14, 7, 5, 2) и круга решаемых задач: коэффициент молекулярного изменения, температуры теоретическая и калориметрическая (действительная: с учетом эффектов диссоциации) [6, 10, 11]. Методика динамичная, высокой точности, но для уточнения известной ФММ КДВС и получаемых результатов излишне сложная и громоздкая.

Метод

За базовую (исходную) методику принята [4, 5], в ней количества составляющих РТ рассчитываются по стехиометрическим соотношениям [4, 12]. Настоящая методика построена на классических представлениях о сгорании углеводородных топлив, зависимости диссоциации газов от температуры и давления, на использовании табличных данных теплоемкости, степени диссоциации, теплового эффекта химической реакции. Считается: реакции окисления, диссоциации и рекомбинации протекают непрерывно и возможны в любой период рабочего цикла КДВС, интенсивность зависит от сложившихся условий.

В общем случае в течение цикла КДВС в РТ могут быть представлены: (O_2+N_2) – воздух, CO_2 , $H_2O_{\text{газ}}$, H_2 , др.; с течением цикла количества составляющих меняются, в определенные моменты некоторые составляющие могут отсутствовать. $C_{\text{сажа}}$ не является составляющей РТ: твердое агрегатное состояние (графит). Методики определения состава РТ в цилиндре КДВС, парциального давления его компонентов изложены в работах [13, 14].

Приняты допущения:

1. Время на диссоциацию меньше, чем на элементарное исследование (за расчетный шаг): все начавшиеся процессы завершаются обязательно.
 2. Скорость диссоциации так велика, что за расчетный шаг объем V изменяется мало, можно положить $V = \text{const}$, т.о. в расчетах участвуют C_v – теплоемкость при постоянном объеме.
 3. Диссоциация составляющих РТ происходит равномерно во времени и в пространстве: преимущественно, поэлементно или локально невозможно!
 4. Из возможных конкурирующих реакций диссоциации протекают только принятые.
- САУ – стандартные атмосферные условия: $p_0 = 101325 \text{ Па}$, $T_0 = 273.15 \text{ К}$.

РТ – рабочее тело: газовая смесь в цилиндре КДВС.

$dt, d\varphi$ – бесконечно малое (б/м) время, расчетный шаг.

Уравнение энергии РТ:

$$dT = \frac{1}{C_{v,m}} (dQ_c + dQ_w - dQ_{\text{дис}}) - T \frac{dm}{m} - (\kappa - 1) \frac{dV}{V} T.$$

Теплота, затраченная на диссоциацию составляющих РТ за б/м время:

$$dQ_{\text{дис}} = \sum_i^n (\alpha \cdot dv \cdot Q_x)_i,$$

где i, n – порядковый номер и количество газов; $\alpha = f(p_i, T)$ – степень диссоциации; для CO_2 , $H_2O_{\text{газ}}$ см. [8], с. 397;

$$dv_i = \frac{p_i}{p} \cdot dV \text{ – парциальный объем;}$$

Q_x – тепловой эффект химической реакции [9], с. 144.

$p_i = r_i \cdot p$ – парциальное давление составляющего в смеси (в РТ в данном случае);

r_i – объемная доля составляющего в смеси (равна мольной доле);

p, V – давление и объем смеси газов (РТ).

Стехиометрическое соотношение химической реакции (записывается при САУ):

$$\mu_A A + \mu_B B = \mu_D D + Q_x;$$

A, μ_A – химический элемент, участвующий в реакции; количество вещества этого элемента (количество молей: число, не молекулярный вес);

A, B, D – начальные (исходные) и конечный (результат) элементы реакции.

Теплота, участвующая в изменении состояния единицы количества вещества элемента химической реакции:

$$Q_e = C_e T_2 \cdot T_2 - C_e T_1 \cdot T_1 \text{ Дж/моль;}$$

$C_e T$ – средняя теплоемкость элемента в интервале температур 0 Т К ; для газов РТ КДВС – см. [4], с. 42;

$T_2, T_1; K$ – конечная и начальная температуры процесса.

Тепловой эффект химической реакции при температуре T по закону Кирхгоффа [15], с. 233; [16], с. 57:

$$Q_{xT} = Q_{x273.15} + \sum (\mu Q_e)_K - \sum (\mu Q_e)_H,$$

$Q_{x273.15}$ – тепловой эффект реакции при температуре 273.15 К ($0 \text{ }^\circ\text{C}$); в стехиометрическом соотношении обозначен Q_x ;

$\sum (\mu Q_e)_K, \sum (\mu Q_e)_H$ – теплота, участвующая в изменении состояния конечных и исходных элементов химической реакции.

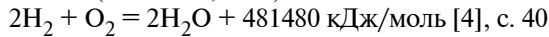
Изменение энтропии РТ в процессе диссоциации

$$ds = \frac{dQ_{\text{дис}}}{T}, \frac{D\mu}{K}.$$

Уравнение состояния РТ:

$$\frac{dp}{p} = \frac{dm}{m} + \frac{dT}{T} - \frac{dV}{V}.$$

Пример приведения теплового эффекта реакции диссоциации паров воды к действительным условиям ($T = 2273,15 \text{ К}$):



$$Q_v^{\text{H}_2\text{O}} = 35680 \cdot 2273,15 - 25184 \cdot 273,15 = 74226982,4 \text{ Дж/моль},$$

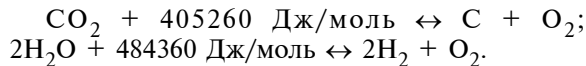
$$Q_v^{\text{H}_2} = 23233 \cdot 2273,15 - 20302 \cdot 273,15 = 47266602,65 \text{ Дж/моль},$$

$$Q_v^{\text{O}_2} = 26854 \cdot 2273,15 - 20959 \cdot 273,15 = 55318219,25 \text{ Дж/моль},$$

$$Q_x^{2273,15} = 481480000 + 2 \cdot 74226982,4 - 2 \cdot 47266602,65 - 1 \cdot 55318219,25 = 480082540,25 \text{ Дж/моль}.$$

Результаты

Исследование выполнено для наиболее представленных по количеству вещества составляющих РТ CO_2 – углекислый газ, $\text{H}_2\text{O}_{\text{газ}}$ – пары воды, значимая диссоциация которых при атмосферном давлении имеет место в интервалах температур 1800...2500 К и 1900...2500 К, из всего спектра конкурирующих реакций диссоциации-рекомбинации рассматривались по одной для каждой из этих составляющих – самые характерные:



Рассчитан цикл автомобильного бензинового четырехтактного двигателя МеМЗ-307 в цилиндре, по результатам построена тепловая T-s диаграмма для области значимой диссоциации CO_2 , $\text{H}_2\text{O}_{\text{газ}}$ – рис. 1, площадь, ограниченная графиком, эквивалентна теплоте, затраченной на диссоциацию $Q_{\text{дис}}$. Частично эта теплота компенсируется в процессах рекомбинации; однако: эта компенсация малоэффективна – происходит при низком давлении, здесь не учтена – не объект настоящего исследования: происходит в выпускной системе, а не в цилиндре.

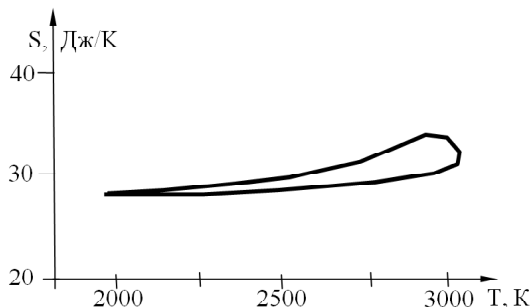


Рис. 1. Тепловая диаграмма диссоциации рабочего тела в цилиндре КДВС

Установлены: индикаторная работа цикла МеМЗ-307 с учетом диссоциации РТ $L_i = 364 \text{ Дж/цикл}$, затраты энергии топлива в цилиндре в связи с диссоциацией $Q_{\text{цикл}} = 16 \text{ Дж/цикл}$, погрешность базовой (исходной) методики в принятых ограничениях $\delta = 4,4 \%$.

Выводы

Полученные результаты согласуются с оценкой И.И. Вибе [3], заниженные значения затрат энергии топлива в связи с диссоциацией поясняются принятыми ограничениями по составу и вероятности реакций.

Заключение

Исследование следует продолжить в направлении расширения списка газов, участвующих в диссоциации.

Список литературы

1. Дьяченко В. Г. Теория двигателей внутреннего сгорания : Учебник / Дьяченко В. Г. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 500 с.
2. Путилов К. А. Курс физики. Том I. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика / Путилов К. А. – М. : ГИ ФМЛ, 1963. – 560 с.
3. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей / Вибе И. И. – М. : МАШГИЗ, 1962. – 272 с.
4. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А. С. Орлина, М.Г. Круглова. - М. : Машиностроение, 1983. - 372 с.
5. Егоров Я. А. Физико-математическая модель рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания автотракторного типа : Учебное пособие / Егоров Я. А. – К. : УМК ВО, 1991. – 56 с.
6. Мехтиев Р. И. Расчет концентрации равновесных продуктов сгорания топливовоздушных смесей в ДВС / Исследование, расчет, конструирование и испытание двигателей / Мехтиев Р. И., Посвянский В. С., Багиров Х. Б. – Харьков : ХПИ, 1981, вып. 3. – С. 13–15.
7. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под ред. В. . Григорьева, В. М. Зорина. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 560 с. – (Теплотехника и теплоэнергетика; Кн. 2).
8. Эстеркин Р. И. Теплотехнические измерения при сжигании газового и жидкого топлива : Справочное руководство / Эстеркин Р. И., Иссерлин А. С., Певзнер М. И. – Л. : Недра, 1981. – 424 с.
9. Шукин А. А. Газовое и печное хозяйство заводов / Шукин А. А. – М.-Л. : Энергия, 1966. – 232 с.
10. Болдырев О. И. Необходимость учета равновесного состояния продуктов сгорания при

- термодинамических расчетах ГТД / Болдырев О. И. // Молодой ученый. – 2011. – № 7. – Т. 1. – С. 19–24.
11. Бондаренко Е. В. Образование окислов азота при сгорании моторных топлив / Бондаренко Е.В., Ерохов В.И. [Электронный ресурс] : http://vestnik.osu.ru/2004_5_1/5.pdf
 12. Двигуни внутрішнього згорання: серія підручників у 6 томах. Т. 5. Екологізація ДВЗ /За ред. Марченка А. П., Шеховцова А. Ф. – Харків: Прапор, 2004. – 360 с.
 13. Мазін В. О. Розрахунок теплофізичних характеристик випускного газу дизельного комбінованого двигуна внутрішнього згорання / Мазін В. О. // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – К. : НТУУ КПІ. – 2013. – № 6. – С. 13–19.
 14. Мазін В. А. Коэффициенты вязкости выпускного газа дизельного КДВС // Вісник Східно-Українського національного університету. Луганськ : СНУ. – 2012, № 9. – С. 162–167.
 15. Беляев Н. М. Термодинамика / Беляев Н. М. – К. : Вища шк., 1987. – 344 с.
 16. Крестовников А. Н. Химическая термодинамика / Крестовников А. Н., Вигдорович В. Н. – М. : Металлургиздат, 1962. – 280 с. – С. 152.

Поступила в редакцію 14.05.2015

Мазін В.О. Метод розрахунку енергетичних ефектів дисоціації складових робочого тіла комбінованих двигунів внутрішнього згорання

Запропоновано диференційне рівняння теплоти, що приймає участь у дисоціації. Розроблена розрахункова методика врахування енергетичних ефектів дисоціації складових робочого тіла комбінованих двигунів внутрішнього згорання. Методика базується на класичних уявленнях щодо згорання вуглеводневих палив, залежності дисоціації газів від температури й тиску. Покладено: реакції травлення, дисоціації і рекомбінації протікають безперервно, їх інтенсивність залежить від конкретних умов. Розраховано цикл бензинового двигуна MeMЗ-307 з урахуванням дисоціації кількісно найбільш представлених складових: вуглекислого газу й парів води. За індикаторною роботою циклу встановлено похибку вихідної розрахункової методики.

Ключові слова: робочий цикл, робоче тіло, продукти згорання, дисоціація, рекомбінація, розрахункова методика, індикаторна робота циклу, похибка.

Mazin V. The calculated method for energy effects of dissociation for working body components the combined internal combustion engines

The differential equation of the involved heat in the dissociation was proposed. The calculated method for accounting of dissociation energy effects for working body components in the combined internal combustion engines was developed. The method is based on the classical concepts of hydrocarbon fuels combustion and on the dependence of gas dissociation of temperature and pressure. Accepted that reactions of oxidation, dissociation and recombination occurs incessantly, their intensity depends on the specific conditions. The gasoline engine MeMZ-307 cycle was calculated; while dissociation of the most quantitatively represented components (carbon dioxide and water vapor) was accounted. The error of the original calculated method was established by the cycle indicator work.

Key words: the working cycle, the working body, combustion products, dissociation, recombination, calculating method, indicating work of cycle, error.