

сти $C_v = f(T, P)$ позволяет уточнить расчет рабочего цикла перед началом сгорания.

Главной целью моделирования рабочего процесса в режиме реальной эксплуатации является уточнение расхода топлива и диагностика состояния основных узлов двигателя.

Список литературы:

1. Варбанец Р.А. Параметрическая диагностика дизелей SBV6M540 и Pegaso 9156 / Р.А. Варбанец // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2006. - №8(34). – с 144-148.
2. Приложение VI к МАРПОЛ 73/78. Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов // ЦНИИМФ: СПб, 2004.-80 с.
3. Варбанец Р.А. Моделирование рабочего процесса в задачах повышения эффективности эксплуатации

судовой дизельной энергетической установки / Р.А. Варбанец // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2008. – № 2. – с.18-22.

4. Кулешов А.С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / А.С. Кулешов, Л.В. Грехов. – М.: МГТУ, 2000. – 64 с.
5. Семенов В.С. Современные проблемы теории судовых дизелей / В.С. Семенов. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1991. – 112 с.
6. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 271 с.
7. Wartsila: LOw NOx engines [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.wartsila.com> – 01.06.2009. Анализ последствий корректировки настроечных параметров ТА и МГР, а также изменения ПРП на частичных режимах, отличных от текущего режима эксплуатации возможен с помощью математической модели рабочего процесса.

УДК 537.523:538.4

А.А. Тропина, канд. ф.-м. наук

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗРЯДА НА ФОРМИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ОЧАГА ПЛАМЕНИ

Введение

Как первый шаг в развитии процесса горения, процесс воспламенения оказывает огромное влияние на развитие начального очага пламени. Решение проблемы организации эффективного режима горения, обеспечивающего снижение вредных выбросов токсических веществ, образующихся при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания (ДВС), напрямую связано с организацией устойчивого процесса воспламенения обедненной смеси на стадии формирования начального очага пламени. Поскольку экспериментальное исследование закономерностей формирования начального очага пламени в условиях высоких давлений в десятки атмосфер, характерных для процесса воспламенения в ДВС, является затруднительным, на первый план выходит численное моделирование.

Анализ последних публикаций

Разряд в межэлектродном промежутке зависит от многих параметров, таких как энергия искры, состав газа, тепловые потери, поле скоростей в окрестности свечи зажигания и т.д. Моделированию процесса искрового воспламенения посвящено достаточное количество работ. Среди последних работ можно отметить [1-5]. Так, в работе [1] исследовалась зависимость минимальной энергии искры от числа Дамкелера. Авторы ограничились рассмотре-

нием процесса искрового воспламенения при ламинарном течении газа и использовали достаточно упрощенную кинетическую схему. В работе [2] моделирование процесса воспламенения, инициированного искровым разрядом, и процесс развития начального очага пламени рассматривался на примере пропано-воздушной смеси. Авторы исследовали влияние энергии искры, тепловых потерь в электроды и стенки камеры сгорания на свойства начального очага пламени при атмосферном давлении и турбулентном течении газа. В работе [3] рассматривалась задача моделирования процесса искрового воспламенения в условиях, характерных для двигателей внутреннего сгорания. Авторы учли влияние турбулентного течения газа, однако практически пренебрегли химической кинетикой (6 реакций).

В работе [4] авторы приводят пример расчета искрового воспламенения и формирования начального очага пламени на основе зонной модели горения, используя упрощенную кинетическую схему, и рассматривая разряд как источник тепловой энергии. В работе [5] авторы представили модель искрового воспламенения с учетом детальной кинетической схемы процесса на примере метано-воздушной смеси, состоящей из 35 компонент, но при этом ограничили случаем ламинарного течения газа при атмосферном давлении.

Таким образом, до сих пор остаются неисследованными закономерности процесса воспламенения и формирования начального очага пламени в условиях турбулентного течения газа при высоких давлениях. При этом модель искрового воспламенения должна учитывать, как детальную химическую кинетику процесса, так и интенсивность турбулентного течения газа в сочетании с электродинамическими свойствами разряда.

Цель и постановка задачи

Целью исследования является определение основных закономерностей процесса воспламенения и формирования начального очага пламени обедненной метано-воздушной смеси в условиях высоких давлений.

Расчетная область осесимметричной задачи включает в себя два электрода, межэлектродное пространство (межэлектродное расстояние $d_0 = 1$ мм) и окружающую электроды область. Основная система уравнений включает в себя уравнения Навье-Стокса, уравнения переноса для многокомпонентной метано-воздушной смеси, уравнения для турбулентных напряжений Рейнольдса, уравнения Максвелла для определения напряженности электрического поля и уравнение переноса энтальпии. В силу своей громоздкости уравнения не приводятся.

В уравнение энергии помимо тепловыделения в ходе химических реакций включено дополнительное слагаемое $S = \sigma E^2$, учитывающее энергетический вклад разряда. Данные о переносных свойствах ионизированной метано-воздушной смеси являются ограниченными, однако большинство исследователей отмечает, что проводимость ионизированной метано-воздушной смеси и плазмы воздуха слабо отличаются друг от друга. В настоящей работе электрическая проводимость среды $\sigma = \sigma(p, T)$ представлялась аппроксимирующими полиномами, основанными на экспериментальных данных, приведенных в монографии [6].

Рассматривался процесс воспламенения обедненной метано-воздушной смеси, при этом начальный состав природного газа в смеси соответствовал составу ставропольского природного газа, состоящего из следующих компонент: CH_4 – 97.7%, C_3H_8 – 0.3%, C_2H_4 – 0.2%, CO_2 – 0.5%, N_2 – 1.3%. Моделирование кинетики воспламенения осуществлялось на основе детальной кинетической схемы высокотемпературного горения метана GRI-MECH 3.0 [7], со-

стоящей из 53 компонент и 325 реакций. Термодинамические и переносные свойства смеси рассчитывались с использованием программы CHEMKIN.

Обычно процесс искрового воспламенения делят на три фазы: 1) пробой межэлектродного промежутка и формирование искрового канала между электродами, 2) фаза дугового разряда 3) стадия перехода дугового разряда в тлеющий. В настоящей работе рассматривается эволюция плазменного канала и формирование начального очага пламени сразу же после завершения стадии пробоя. Таким образом, начальными условиями для задачи являются: радиус плазменного канала, температура и давление в этом канале, исходный состав плазмы в канале на момент воспламенения, а также исходный состав смеси и ее гидродинамические характеристики на момент воспламенения.

Предполагая, что после пробоя в течение нескольких наносекунд устанавливается локальное термодинамическое равновесие плазмы, начальные свойства плазменного канала можно рассчитать, пользуясь каналовой моделью дуги [6]. Уравнение Эленбааса-Геллера для распределения температуры по радиусу дуги в этом случае может быть проинтегрировано, что приводит к следующему выражению для температуры плазменного канала [6]:

$$T_c = \frac{I_0^2}{2\pi r_0^2 \sigma_c} \ln \frac{R}{r_0}, \quad (1)$$

где I_0 – сила тока, r_0 – радиус канала, σ_c – электропроводность смеси.

Гидродинамические характеристики смеси на момент воспламенения выбирались исходя из условий, соответствующих процессу воспламенения в двигателе внутреннего сгорания, работающем на природном газе. Основываясь на данных индикаторных диаграмм для двигателя MeM3-307, и, ориентировочно оценивая начальную интенсивность турбулентности на момент зажигания как $u' = 0,5v_p$ [8], где v_p – средняя скорость поршня, окончательно получим следующие начальные условия задачи:

— вне плазменного канала – обедненная метано-воздушная смесь с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,2$, $P_0 = 1,5$ МПа, $T_0 = 800$ °К;

— плазменный канал радиуса $r_c = 0,5$ мм с $T_c = 6000$ °К, $P_c = 2,5$ МПа, состав плазмы определяется на основе равновесных расчетов.

Расчет электрической дуги, образующейся после пробоя межэлектродного промежутка, осуществляется непрерывным образом путем сращивания решения для распределения температуры и потенциала электрического поля в твердых телах (электродах) с решением задачи в плазменном канале. При этом в приэлектродных узлах вводилась, так называемая, “эффективная” проводимость, зависящая от термоэмиссионных свойств материала электрода и ионного тока. Основные детали организации вычислительного процесса и процедуры сопряжения приведены в работе [9].

В качестве граничных условий на всех твердых стенках задаются условия прилипания, равенство нулю первых производных от всех зависимых величин на оси симметрии и “мягкие” условия на всех внешних границах за исключением электродов. На внешней границе электродов ставятся специальные граничные условия вида:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\frac{I(t)}{\sigma \cdot \pi \cdot r_c^2}, \quad T = 300 \text{ }^\circ\text{K},$$

где $I(t)$ – электрический ток, значение которого моделируется ступенчатой функцией вида:

$$I(t) = \begin{cases} 6 \text{ A}, & t \leq 0,3 \text{ мкс} \\ 0,2 \text{ A} & 0,3 \text{ мкс} \leq t \leq 100 \text{ мкс} \\ 0 & t \geq 100 \text{ мкс} \end{cases}$$

Размеры вычислительной области 4×4 мм, минимальный шаг сетки 0,2 мкм, количество ячеек 450000, минимальный временной шаг (на первых итерациях) $\Delta t = 0,01$ мкс. Применялась процедура распараллеливания вычислений с применением экспоненциальных методов для решения уравнений, содержащих источники членов, связанные с химическими реакциями. Верификация модели проводилась путем сравнения данных моделирования процесса воспламенения стехиометрической метано-воздушной смеси и экспериментальных данных, приведенных в монографии [10]. Результаты сравнения, представленные на рис. 1, подтверждают адекватность полученных при моделировании результатов с вполне приемлемой точностью.

Результаты расчетов

На первой стадии процесса воспламенения свойства топливно-воздушной смеси определяются волной давления (рис.2), которая образуется в результате расширения плазменного канала. Этот процесс в сочетании с геометрией электродов полно-

стью определяет характерное поле скоростей на первой стадии формирования очага пламени. Распространение волны сопровождается ее переходом от цилиндрической к сферической конфигурации (рис.2). При этом максимальное полное давление быстро убывает, что является характерным для цилиндрических волн. Можно отметить, что интенсивность такого снижения выше, а скорость распространения волны меньше, чем для случая искрового воспламенения при атмосферном давлении [2]. После этой начальной фазы формируется ядро пламени, в котором в течение всего времени существования плазмы поддерживается достаточно высокая температура ($T \approx 6000 \text{ }^\circ\text{K}$) (рис.3.).

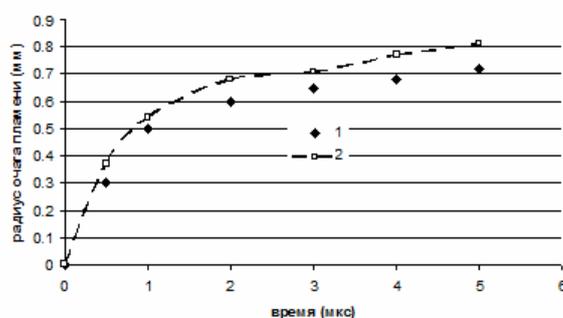


Рис.1. Развитие первоначального очага пламени: 1 – эксперимент по данным работы [10], 2 – расчетные данные

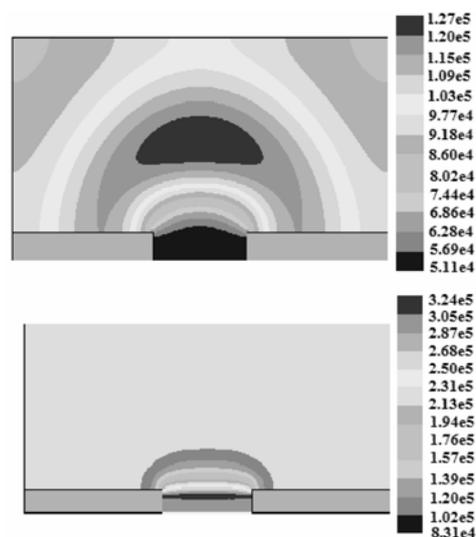


Рис.2. Волна давления: внизу: $t = 0,1$ мкс, сверху: $t = 2$ мкс

Учет турбулентного течения газа и влияния турбулентности на скорость химических реакций приводит к существенному снижению максимальной

температуры очага пламени. Известно, что в процессе охлаждения плазменного канала кинетическая энергия радиального течения трансформируется в энергию турбулентных пульсаций за исключением той ее части, которая переходит в тепло в результате диссипативных процессов.

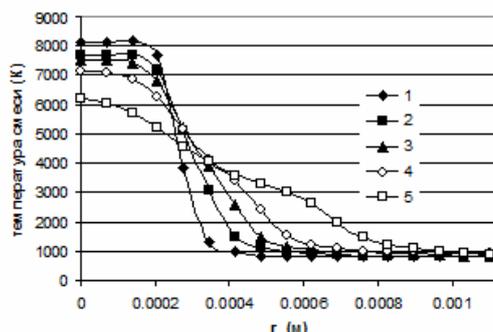


Рис. 3. Радиальные профили температуры смеси в различные моменты времени:
1 – $t = 0,2$ мкс, 2 – $t = 0,5$ мкс, 3 – $t = 0,8$ мкс, 4 – $t = 1,5$ мкс, 5 – $t = 5$ мкс.

Турбулентное течение газа не только непосредственно влияет на процесс охлаждения искрового канала, и связанное с этим снижение концентраций реагирующих компонент, но и косвенно, за счет влияния турбулентности, на скорость химических реакций. Так, на рис.4 приведены профили температуры в центральном поперечном сечении между электродами для случая ламинарного течения газа при пренебрежении влиянием турбулентности на скорость химических реакций (кривые 2,4) и для случая турбулентного течения газа (кривые 1,2).

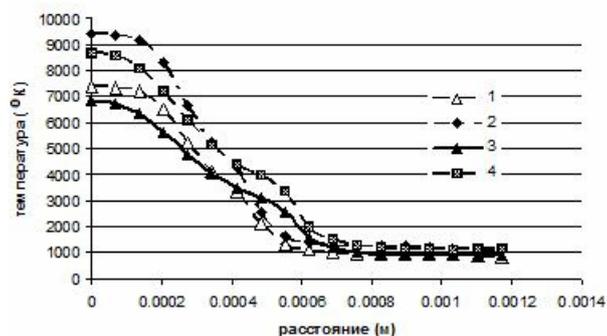


Рис. 4. Радиальные профили температуры смеси: 1, 2 – $t = 1$ мкс; 3, 4 – $t = 3$ мкс.

На рис. 5,6 представлены профили концентраций радикалов OH, O в том же сечении в различные моменты времени (обозначения на рис.3,5,6 совпадают). Можно отметить, что высокие концентрации радикалов наблюдаются не только в переходной об-

ласти между плазменным каналом и окружающей свежей смесью, но и внутри самого плазменного канала, что является следствием процесса диссоциации продуктов сгорания. После прекращения подачи тока по максимальным значениям концентрации радикалов O, OH, HCO определяется положение фронта пламени.

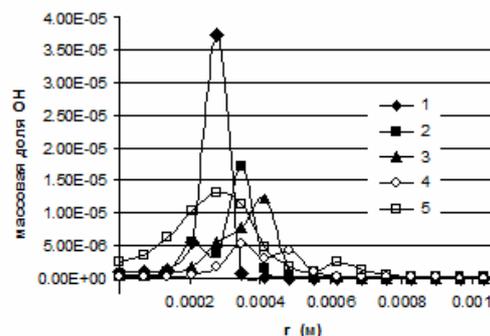


Рис.5. Радиальные профили концентрации радикала OH

Увеличение энергии искры, моделируемое в данном случае увеличением силы тока на первой стадии процесса, приводит к возрастанию температуры плазменного канала, что при прочих равных условиях вызывает увеличение концентрации оксидов азота и углерода.

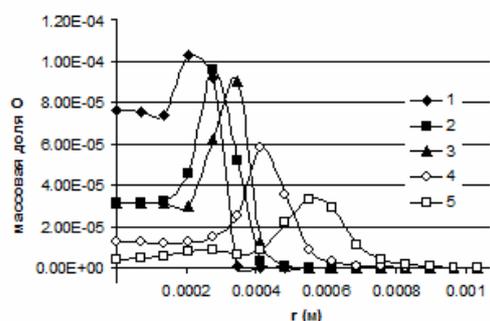


Рис.6. Радиальные профили концентрации радикала O

При этом на первоначальном этапе формирования очага пламени концентрация оксидов углерода максимальна в зоне фронта пламени, а максимальные значения концентрации оксидов азота достигаются в зоне плазменного канала. В отличие от случая искрового воспламенения при атмосферном давлении высокое давление в камере сгорания, а также существование интенсивных вихревых образований возле кромок электродов, вызывает локальное затухание пламени в этих зонах при трансформации начального цилиндрического ядра пламени в сфериче-

скую форму. Было получено, что для рассматриваемого случая воспламенения обедненной метано-воздушной смеси, очаг пламени по истечении определенного промежутка времени затухает, и основной причиной такого гашения пламени является не только недостаточная энергия искры, но и интенсивное турбулентное течение газа.

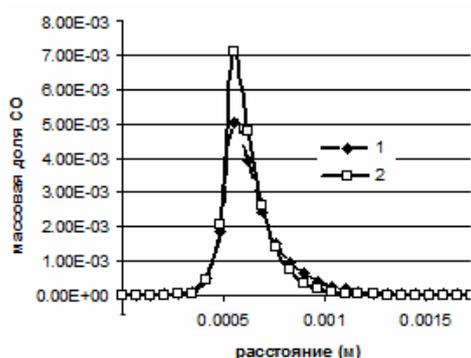


Рис. 7. Радиальные профили концентрации оксидов углерода при $t=4$ мкс: 1 – $I=6$ А, 2 – $I=10$ А

При увеличении мощности искры до насыщающей пламя не гаснет, но существенно возрастает как концентрация оксидов азота, так и оксидов углерода (рис. 7). В данной ситуации в качестве альтернативы более мощному искровому разряду можно использовать коротко-импульсные разряды, обеспечивающие генерацию радикалов ОН, необходимых для развития цепной реакции горения (рис.5). Не вдаваясь в детали кинетической схемы процесса воспламенения наносекундным разрядом, которая должна включать реакции с участием колебательно- и электронно-возбужденных частиц, в первом приближении действие разряда можно заменить инъекцией радикалов ОН в межэлектродную область. Такая организация разряда обеспечивает формирование начального очага пламени, минуя фазу распространения волны давления и обеспечивая снижение токсичности за счет увеличения полноты сгорания топлива. Распределение некоторых компонент смеси для этого случая представлено на рис.8, там же для сравнения приведены профили концентрации СО при воспламенении искровым разрядом.

Выводы

— Приведены результаты численного моделирования процесса воспламенения и формирования начального очага пламени обедненной метано-воздушной смеси в условиях высоких давлений.

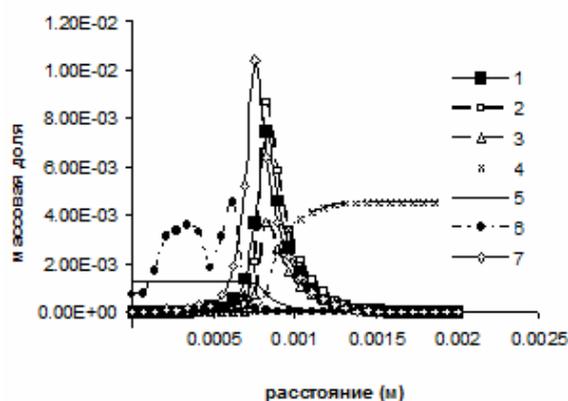


Рис. 8. Радиальные профили концентрации компонент смеси при $t=6$ мкс:
1 – CO; 2 – CH_3O ; 3 – $\text{CH}_2\text{O}/10$; 4 – $\text{CH}_4/10$;
5 – $\text{CO}_2/100$; 6 – $\text{O}/100$; 7 – CO при искровом разряде

— Отмечается существенное влияние интенсивности турбулентного течения в окрестности электродов, мощности искры и формы организации разряда на процесс воспламенения.

Работа проведена в рамках гранта МОН Украины 0107U001007 “Разработка теории управления процессами горения с помощью электрического поля”.

Список литературы:

1. Effect of thermal expansion on the minimum energy of gas ignition/ A. Yu. Krainov, V.A. Baimler // *Combustion Explosion and Shock Waves*. – 2002. – № 4. – P. 387–390.
2. Modeling the initial growth of the plasma and flame kernel/ H. Willems, R. Sierens // *Journal of Engineering for Gas Turbine Power*. – 2003. – Vol.125. – Issue 2. – P. 479–485.
3. Said R. Modeling of spark ignition in a premixed turbulent medium/ R. Said, S. Vincent, A. Burluka, R. Borghi // *SAE Paper*. – 961193. – 1996.
4. Andreassi L. Modeling the early stage of spark ignition engine combustion using the KIVA-3V incorporating ignition model / L. Andreassi, S. Gordiner, V. Rocco // *International Journal of Engine Research*. – 2003. – Vol. 4. – № 3. – P. 179–192.
5. Thiele M. Numerical simulation of spark ignition process including ionization / M. Thiele, S. Selle, U. Reidel, J. Warnatz // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2000. – Vol. 28. – P. 1177–1185.
6. Энгельшт В.С. Теория столба электрической дуги/ В.С. Энгельшт, В.Ц. Гурович, Г.А. Десятков. – Новосибирск: Наука СО, 1990. – 376 с.
7. Kinetic scheme of high temperature methane oxidation [электронный ресурс]/G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach. – Режим доступа http://www.me.berkeley.edu/gri_mec.
8. Тропина А.А. Влияние пульсационных характеристик заряда на процесс горения в камере сгорания ДВС / А.А. Тропина // *Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр.* – 2004. – Вып. 25. – С. 47–53.
9. Matveev I. Arc modeling in a plasmatron channel / I. Matveev, A. Tropina, S. Serbin, V. Kostyuk // *IEEE Trans. on Plasma Science*. – 2008. – Vol.36. – Issue 1. – P. 293–298.
10. Maly R. Fuel economy in road vehicles powered by spark ignition engines/ R. Maly. – New York: Plenum Press, 1984. – 306 p.