

УДК 621.43 (075.8)

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ИСКРОВОМ ДВС

к.т.н. Шабанов А.В., Шабанов А.А.Центр испытаний «НАМИ», Университет машиностроения
+7 (925) 827-59-03, saaha-1955@mail.ru

В статье приведены расчетно-теоретические исследования энерговыделения в первичном очаге воспламенения. Произведен анализ условий воспламенения бензо-воздушной смеси энергией разряда, имеющей различную величину. Получена зависимость энергии воспламенения от радиуса начального очага, позволившая определить критерии насыщенной энергии искрового разряда.

Ключевые слова: расчетная модель, воспламенение смеси, энерговыделение, критерии оценки

Повышение эффективности использования энергетических ресурсов на автомобилях, использующих ДВС с воспламенением от искры, в значительной степени связано с процессом воспламенения топливно-воздушных смесей в камере сгорания ДВС. Проблеме интенсификации воспламенения и сгорания посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ. Теоретическое решение задачи воспламенения топливно-воздушной смеси методом математического моделирования было предложено в работе [1]. Предложенная математическая модель рассматривает физические процессы теплопроводности, диффузии и теплопередачи, протекающие на этапах воспламенения и последующего сгорания смеси. В основе модели лежит система известных дифференциальных уравнений теплопроводности, диффузии и теплового баланса. Задаваясь начальными и граничными условиями в очаге воспламенения по теплопроводности, диффузии и теплопередачи, с помощью этих уравнений можно описать процесс воспламенения смеси.

Входящие в уравнения коэффициенты определяются эмпирическим путем и в значительной степени зависят от условий процесса воспламенения: температуры и давления, которые различны на разных стадиях развития очага воспламенения. Вследствие этого данный метод расчета является очень сложным и не

позволяет в полной мере получить точное описание процессов и закономерностей, происходящих в двигателях внутреннего сгорания, однако указанная модель дает приемлемую качественную картину описания процесса воспламенения.

Другие упрощенные расчетно-экспериментальные модели воспламенения более точно описывают протекающие закономерности воспламенения от электрического источника воспламенения в условиях камеры сгорания [2, 3]. В этих работах экспериментально была показана одна из физических закономерностей процесса воспламенения, определяющая скорость воспламенения смеси и последующего сгорания. На начальном этапе объем воспламеняющейся смеси быстро растет, а затем уменьшается до определенной величины, далее наблюдается процесс дальнейшего развития процесса воспламенения. Такая закономерность характерна для различных случаев устойчивого воспламенения. Скорость пламени имеет максимальное значение в начальной области, когда температура в зоне разряда достигает наибольшей величины. В дальнейшем с увеличением времени температура в очаге воспламенения существенно снижается. При этом скорость пламени также падает, проходит через минимум и далее возрастает, стремясь к постоянному значению. От энергии, сообщенной начальному объекту, будет зависеть вели-

чина этого объема и продолжительность воспламенения в начальной фазе.

В других работах [4, 5] также было отмечено на начальном этапе заметное снижение температуры и, соответственно, скорости горения по сравнению с плоским пламенем. Это объяснялось повышенным теплоотводом в зону подогрева из зоны реакции вследствие того, что на начальном этапе объем реагирующей смеси, из которого выделяется тепло, заметно меньше объема смеси, которому это тепло передается [5]. Данные закономерности оказывают сильное влияние на пределы обеднения топливно-воздушных смесей и скорость сгорания при искровом воспламенении. Расчеты показывают, что воспламенение топливно-воздушных смесей зависит от величины начального объема и термодинамического состояния смеси, которые определяются, с одной стороны, энергией искрового разряда, и с другой стороны, энергией, выделяемой в процессе воспламенения смеси.

Теоретическое решение задачи воспламенения основано на принципе, впервые сформулированным Я.Б. Зельдовичем [3]. Согласно тепловой теории воспламенения смеси состава, близкого к стехиометрическому, от искры наступает в том случае, если ее энергия позволяет нагреть до температуры пламени сферу, критический радиус ($r_{кр}$) которой примерно втрое превышает толщину фронта ламинарного пламени ($\delta_{пл}$) данной смеси. Это соотношение было получено в исследовании критической энергии воспламенения газовых взрывчатых смесей. Ниже данное соотношение будет показано на графике расчета параметров модели воспламенения предлагаемым методом.

Толщину зоны пламени можно определить, используя уравнение [6]:

$$(T - T_0) \cdot x = (T_1 - T_0) \cdot e^a,$$

где $a = \frac{U_n \cdot C_p}{\lambda}$; U_n – нормальная скорость распространения пламени; λ – коэффициент теплопроводности; C_p – теплоемкость смеси.

Падение температуры от $(T - T_0)$ в e -раз происходит на расстоянии, равном толщине зоны пламени $\delta_{пл}$, отсюда:

$$\delta_{пл} = \frac{\lambda}{C_p \cdot U_n}.$$

Критический объем пламенной сферы, определяющий минимальную энергию, необходимую для воспламенения смеси:

$$V_{кр} > \frac{4}{3} \cdot \pi (3 \cdot \delta_{пл})^3.$$

Принимая $V_{кр} = 0,2$ мм, определим критический объем сферы: $V_{кр} = 0,905$ мм³. Для упрощения выполнения расчетов объем воспламенения примем в виде сферической формы. Большая часть фронта пламени $\delta_{пл}$ (около 80%) приходится на зону прогрева смеси, а остальная на зону химических реакций. Зона подогрева определяется на участке изменения температур от T_1 (температура ламинарного пламени) до T_0 (температура смеси).

Процессы воспламенения и сгорания с позиции химической теории представляют процессы окисления углеводородов кислородом воздуха. Взаимодействующие молекулы в зоне реакции окисления образуют большое количество свободных атомов, способных вступать в реакцию, и химически активных свободных радикалов. Свободные радикалы (заряженные частицы) образуются при разрыве связи у пары электронов молекул углеводородов. Одна активная частица, обладающая избыточной энергией, может образовать при взаимодействии со встретившейся ей на пути молекулой еще две. И далее процесс протекает по разветвленному цепному механизму [6].

Реакция идет в сторону образования стабильных частиц, обладающих меньшей энергией. Чем сложнее молекула углеводорода, тем больше элементарных актов составляющих цепь реакций, также образуется больше разнообразных промежуточных продуктов реакции.

При благоприятных условиях химически активные частицы, диффундирующие с высокой скоростью в рабочую смесь, инициируют разветвленные химические реакции, резко сокращают период задержки воспламенения рабочей смеси. При дальнейшем развитии процесс переходит в фазу лавинной активации горения, при этом в 3–4 раза увеличивается скорость сгорания. В ДВС процесс послойного горения переходит в турбулентное горение вследствие движения поршня.

Воспламенение смеси будет эффективным с точки зрения уменьшения продолжительности, если отвод теплоты в окружающие слои будет полностью компенсироваться, с одной стороны, теплотой, подводимой в процессе ре-

акции от источника воспламенения, а с другой – теплотой, выделившейся при сгорании начального объема пламенной сферы [6]. Величина критического радиуса начального объема воспламенения определяется соотношением:

$$r_{кр} \geq 2\sqrt{2\delta_{пл}}, \text{ или } r_{кр} \geq 2\sqrt{2\frac{\lambda_z}{C_p \cdot \rho_c \cdot U_n}}.$$

При неблагоприятных условиях воспламенения, например, при работе на бедных смесях с повышенным содержанием остаточных газов и низкой начальной температурой, скорость распространения может быть существенно ниже нормальной. По данным [2, 6], она может быть равна нормальной при увеличении объема зоны реакции до величины, равной десятикратному значению толщины фронта ламинарного пламени.

$$V_{кр} > \frac{4}{3} \cdot \pi (10 \cdot \delta_{пл})^3.$$

Следует отметить, что скорость реакции определяется самой медленной стадией цепного механизма реакции сгорания топливо-воздушной смеси. Различные смеси имеют разный период воспламенения и сгорания. Непредельные углеводороды имеют наибольшие скорости воспламенения и распространения пламени, скорость также зависит от концентрации компонентов, вступающих в реакцию. При определенных условиях, например, снижении температуры вследствие повышенного теплоотвода из зоны реакции, уменьшения давления цикл воссоздания активных частиц может прекратиться и произойдет обрыв цепной химической реакции [4, 5].

Уменьшение времени стабилизации скорости сгорания на стадии воспламенения может быть достигнуто за счет увеличения энергии искрового разряда до значения энергии E_p , равной насыщенной энергии разряда E_n . Это понятие было введено в работах по исследованию искровых систем зажигания, имеющих высокую относительно стандартных систем энергию разряда [4]. Увеличение энергии воспламенения выше E_n не приводит к расширению верхней границы воспламенения и улучшению процесса воспламенения.

На рис. 1 приведена регулировочная характеристика бензинового искрового ДВС ($V_h=2,4$ л) по составу смеси, определенная на моторном стенде на режиме, характерном дви-

жению автомобиля в условиях городского движения.

Как видно из рис. 1, увеличение энергии искрового разряда за счет тока с 30 мА до 200 мА ведет к расширению предела обеднения смеси. При этом продолжительность процесса сгорания сокращается, о чем свидетельствует уменьшение оптимального угла опережения зажигания на малых нагрузках. Вместе с тем существенно улучшается цикловая воспроизводимость процессов изменения давления в цилиндрах ДВС, а величина максимального давления становится более стабильной. Также в ходе исследований было установлено, что мощный короткий разряд является более эффективным по сравнению с продолжительным, т.к. зона реакции при продолжительном разряде удаляется от электродов и выделение энергии в данном случае нецелесообразно. Экспериментальные исследования показывают, что увеличение энергии воспламенения свыше 60 мДж не оказывает влияние на показатели ДВС. Данная величина энергии является насыщенной.

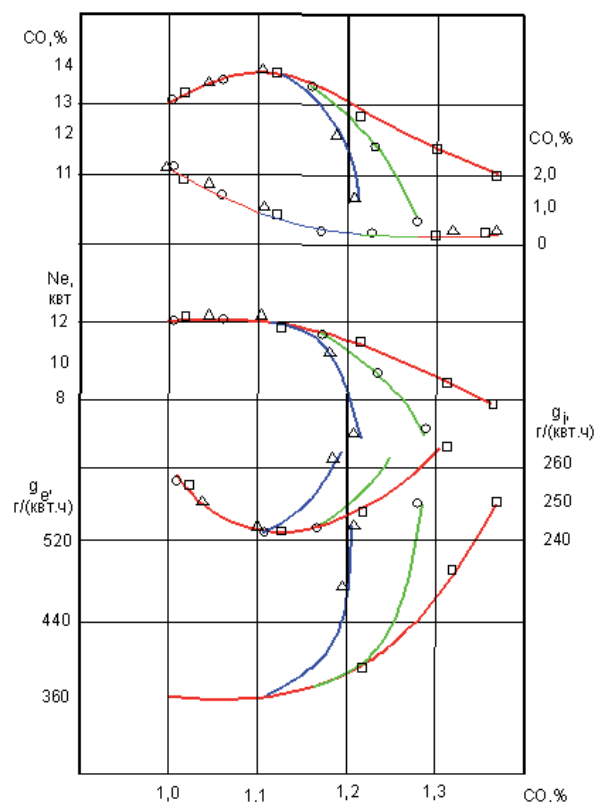


Рис. 1. Влияние энергии искрового разряда на пределы обеднения смеси ДВС ($V_h = 2,4$ л):

Δ – $E_p = 6,5$ мДж ($I_p = 30$ мА); O – $E_p = 15$ мДж ($I_p = 100$ мА); \square – $E_p = 30$ мДж ($I_p = 200$ мА);
 $n = 2000$ мин⁻¹; $\Delta p_k = 0,05$ МПа

Исходя из приведенных выше предпосылок, выполним расчет энерговыделения на этапе воспламенения смеси. Энергия, выделившаяся на начальном этапе, определяется энергией искрового разряда и энергией, выделившаяся при сгорании смеси в зоне разряда:

$$E_b = \tau \cdot E_p + E_{зр},$$

где E_p – энергия искрового разряда, выделившаяся в начальном объеме; τ – КПД использования энергии искрового разряда, он учитывает потери энергии при воспламенении; $E_{зр}$ – энергия, выделившаяся при сгорании смеси в зоне разряда.

Для расчета энергии, выделившейся при сгорании смеси на начальном этапе $E_{зр}$, используем известное уравнение сгорания [4]. Расчеты выполним по отдельным точкам изменения текущего радиуса развития начального очага воспламенения. Результаты расчета E_b от текущего радиуса очага воспламенения приведены более подробно в работах [7, 8].

$$E_{зр} = \frac{Hu}{(1/\mu_T + \alpha \cdot L_0) \cdot (1 + \gamma_{ост}) \cdot 22,4 \cdot 10^9},$$

где E_p – энергия источника воспламенения; $E_{зр}$ – энергия, выделившаяся при сгорании начального объема; $\gamma_{ост}$ – коэффициент остаточных газов; α – коэффициент избытка воздуха; μ_T – молекулярная масса топлива (114 кг/кмоль); L_0 – теоретически необходимое количество воздуха (0.516 кг/кмоль); Hu – низшая теплота сгорания топлива (44 МДж/кг);

$$V_{зр} = \frac{4\pi \cdot r^3}{3}.$$

Энергия, выделившаяся при сгорании начального объема радиуса r :

$$E_{зр} = \frac{44 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot r^3}{(1/114 + \alpha \cdot 0,516) \cdot (1 + \gamma_{ост}) \cdot 2,24 \cdot 10^9}.$$

Принимая определенный экспериментально общий КПД [5] $\eta_p = 42\%$ и минимальную для устойчивой работы ДВС энергию разряда, можно найти критическую энергию воспламенения. Для принятых условий воспламенения: критическая энергия воспламенения $E_{кр} = 6$ мДж. Экспериментальные исследования по определению минимальной и насыщенной энергии разряда в различных условиях воспламенения были проведены на полноразмерном двигателе и опубликованы в работах [7, 8, 9].

Как показали исследования, критическая энергия воспламенения зависит от способа подведения энергии и типа системы зажигания. Это связано с временным интервалом подведения энергии разряда в искровом промежутке свечи.

Энергия, выделившаяся в зоне реакции при перемещении фронта пламени на ширину зоны ламинарного пламени зависит от величины dV . Производная объема V по радиусу r :

$$dV = 4\pi r^2 dr, \text{ где } dr(\Delta r) = \delta_{пл}.$$

Изменение энергии в зоне реакции при перемещении фронта пламени на величину dr :

$$E_{зр} = \frac{44 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot r^3}{(1/114 + \alpha \cdot 0,516) \cdot (1 + \gamma_{ост}) \cdot 2,24 \cdot 10^9}.$$

Изменение объема зоны реакции $V_{зр}$, зоны прогрева ΔV и энергии воспламенения при увеличении координаты r приведено на рис. 2.

С увеличением r отношение $\frac{\Delta V}{V_{зр}}$ уменьшается за счет более быстрого роста объема зоны реакции относительно объема зоны подогрева. Как это уже отмечалось выше [3], при $r \leq 3\delta_{пл}$ воспламенение невозможно. При $r \geq 2,9\delta_{пл}$ скорость воспламенения будет зависеть от величины $\frac{E_b}{\Delta V}$, характеризующей тепловой напор энерговыделения в зоне реакции. Как видно на рис. 2 $\frac{E_b}{\Delta V}$ на начальном этапе воспламенения снижается, при дальнейшем протекании реакции величина $\frac{E_b}{\Delta V}$ имеет пологий минимум. Начальное и минимальное значение $\frac{E_b}{\Delta V}$ зависит от энергии, подведенной от источника зажигания.

Соотношение $\frac{\ln(E_b / \Delta r)}{\ln(V_{зр} / \Delta r)}$ характеризует изменение энергии воспламенения с ростом поверхности зоны реакции при воспламенении, т.е. развитие процесса тепловыделения в первичном очаге. На рис. 2 видно, что начальный этап развития очага воспламенения характеризуется значительной интенсивностью тепловыделения.

Следует отметить также, что повышенное значение величины $\frac{E_b}{\Delta V}$ на первом этапе воспламенения способствует быстрому развитию первичного очага. При переходе с первого

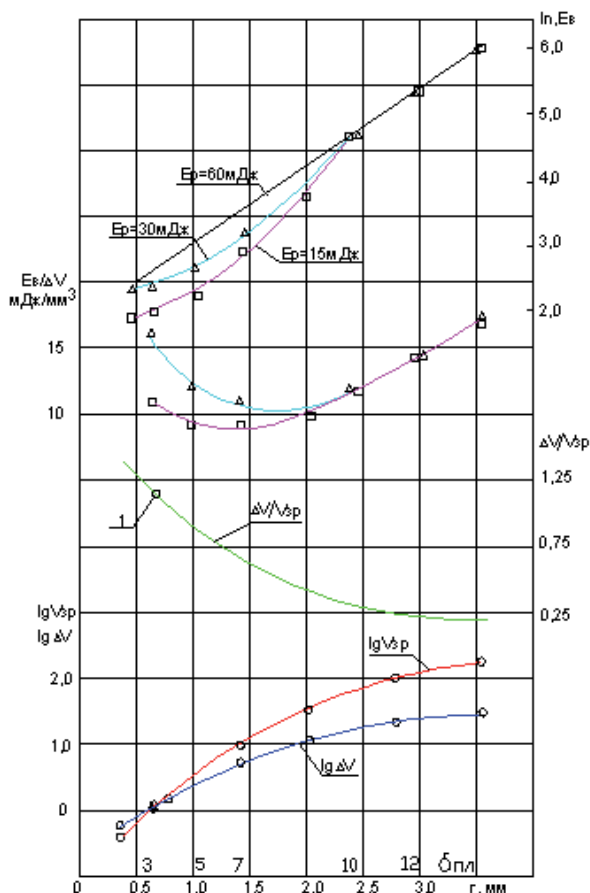


Рис. 2. Динамика роста объема зоны разряда $V_{зр}$, зоны подогрева смеси ΔV и выделения энергии в зоне реакции E_p

этапа во второй развитие очага резко замедляется в связи с падением теплового напора энерговыделения до минимального значения.

При минимальном значении $\frac{E_b}{\Delta V}$ наблюдается равенство между энергией, выделяющейся в зоне реакции, и энергией, передаваемой в зону подогрева, так как значение ΔV прямо пропорциональное $E_{зр}$, что приводит на данном этапе к стабилизации объема первичного очага воспламенения. На третьем этапе при $r > 10\delta_{пл}$ тепловой напор начинает возрастать уже независимо от энергии искрового разряда, что свидетельствует о увеличении скорости распространения пламени за счет вовлечения смеси в процесс воспламенения.

Данное явление, как уже отмечалось в работах [2, 4], где в условиях модельных установок авторы наблюдали задержку в развитии первичного очага воспламенения и даже при определенных условиях его уменьшение в зависимости от времени. Это происходит вследствие

охлаждения зоны реакции при передаче тепла в окружающий слой, что ведет к сжатию зоны реакции и движению нагретого газа к центру. При этом нагретый газ увлекает за собой и пламенную сферу. В последующей стадии авторы наблюдали развитие очага воспламенения с постоянной скоростью.

Постепенное увеличение температуры в зоне подогрева до температуры воспламенения и вовлечение новых слоев смеси в процесс сгорания приводит на третьем этапе воспламенения к росту величины $\frac{E_b}{\Delta V}$. Данный этап характеризуется независимостью развития от подводимой энергии разряда. На первом и втором этапах развития первичного очага воспламенения при $r \leq 10\delta_{пл}$ характер энерговыделения в значительной степени зависит от величины энергии искрового разряда. На данном этапе величина E_p значительно выше энергии, выделившейся от воспламенения смеси в первичном очаге.

Вследствие бурного роста энерговыделения на этапе воспламенения смеси, процесс рассматривается в логарифмических координатах.

С учетом этого можно записать уравнение:

$$\ln E_b = A \cdot r + \ln B,$$

где A – коэффициент пропорциональности, равный тангенсу угла между прямой энерговыделения в логарифмически-нормальных координатах и осью абсцисс; B – начальное значение энергии воспламенения, равное величине натурального логарифма энергии, выделившейся при искровом разряде в межэлектродном промежутке свечи зажигания.

Формула показывает, в соответствии с законом развития начального очага, прямо пропорциональное изменение величины натурального логарифма энергии воспламенения от увеличения радиуса начального очага воспламенения на этапе устойчивого развития процесса воспламенения. Величина B определяется на графике (рис. 3) в точке пересечения линии энерговыделения с осью абсцисс.

Объединим члены под общий знак логарифма: $\ln \frac{E_b}{B} = A \cdot r$.

В окончательном виде, выделив энергию воспламенения из-под знака логарифма, получим:

$$E_b = B \cdot e^{A \cdot r}.$$

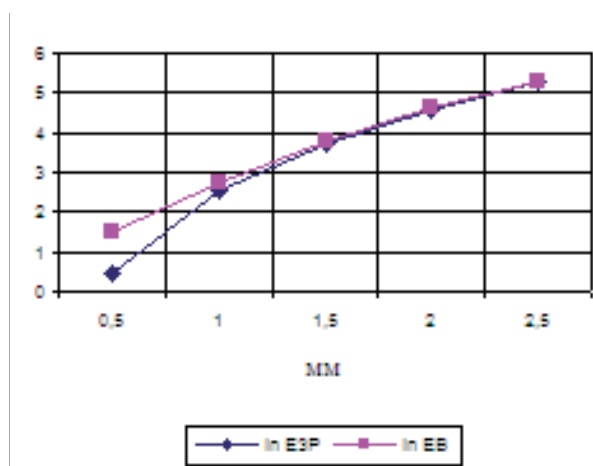


Рис. 3 Изменение энергии воспламенения с развитием первичного очага

При $r = 0 E_b = B$, что также следует из принятой расчетной схемы.

Увеличение подведенной от источника воспламенения энергии до значения энергии насыщения существенно улучшает на данном этапе расчетную характеристику энерговыделения, приближая ее к расчетной прямо пропорциональной зависимости, а увеличение энергии разряда свыше энергии насыщения (60мДж) не оказывает влияния на расчетную характеристику энерговыделения, что также было подтверждено экспериментальными исследованиями [7, 8].

Определенный расчетно-экспериментальным методом коэффициент A характеризует протекание процесса воспламенения с изменения начального радиуса очага воспламенения и зависит от начальной энергии искрового разряда, состава смеси, величины коэффициента остаточных газов, энергии сжатия объема реакции перед воспламенением, теплотворной способности смеси и коэффициента молекулярного изменения.

Данная расчетная модель воспламенения позволяет объяснить закономерности, происходящие на этапе развития очага воспламенения, и в зависимости от условий воспламенения

определить минимальную и насыщенную энергию искрового разряда при воспламенении топливно-воздушных смесей. Проведенные экспериментальные исследования на полноразмерных двигателях подтвердили полученные результаты исследований.

Литература

1. Вилонов В.Н. К теории искрового воспламенения // Доклады Академии наук СССР. – 1973. – Т. 208. – № 1.
2. Семенов Е.С., Соколик А.С. Характеристики сферических пламен в стадии формирования // Доклады АН СССР. – 1962. – № 3. Т. 145.
3. Зельдович Я.Б., Симонов Н.Н. К теории искрового воспламенения газовых взрывчатых смесей // Журнал физической химии. – 1949. – Т.23. – Вып. II.
4. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. Основы теории горения. – М.: Машиностроение. – 1976.
5. Басс Б.А. Повышение топливной экономичности бензиновых ДВС увеличением энергии источника зажигания: Дисс...канд. техн. наук. – М., 1984.
6. Семенов Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов // Успехи физических наук. Т.23. – Вып. 3.
7. Кутенев В.Ф., Шабанов А.В. Оценка интенсивности воспламенения топливно-воздушной смеси искровым разрядом // Труды НАМИ. – 2003.
8. Шабанов А.В. Улучшение топливной экономичности и токсичности бензинового двигателя совершенствованием параметров искрообразования системы зажигания: Дисс...канд. техн. наук. – М., 1989.
9. Кутенев В.Ф., Асовский И.Г., Рябиков О.Б., Шабанов А.В. К вопросу воспламенения и сгорания обедненных смесей в ДВС с принудительным зажиганием – новый этап // Труды НАМИ. – 2011. – № 247.