

Глазунов Д.В.

**ПРЕДПОСЫЛКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В ЦИЛИНДРАХ БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ**

D.V. Glazunov

**BACKGROUND MATHEMATICAL MODELING OF HEAT DISSIPATION CHARACTERISTICS AND A STUDY OF THE COMBUSTION PROCESS IN THE CYLINDERS OF A GASOLINE ENGINE**

УДК 621.43.019.2

В статье рассмотрены основы тепловой теории горения смеси бензинового двигателя, рассмотрены процессы теплопроводности, структуры зоны пламени, скорости прохождения химической реакции окисления топлива, зависимость скорости горения от состава смеси, и проведены зависимости скорости горения от состава горючей смеси.

The article covers the basics of the theory of heat burning of gasoline engine, the processes of conduction, the structure of the flame zone, the chemical reaction rate of oxidation of the fuel, the dependence of the burning rate of the composition of the mixture, and conducted according to the burning rate of the air-fuel mixture.

Согласно тепловой теории, фронт ламинарного пламени состоит из зоны подогрева ( $\delta_n$ ) и зоны химической реакции ( $\delta_p$ ). Теплота из зоны реакции передается в зону подогрева теплопроводностью и диффузией молекул продуктов сгорания. На рис. 1 представлена структура зоны пламени.

Процесс теплопроводности в стационарном режиме описывается уравнением (1):

$$\frac{d^2T}{dx^2} - U_H * \frac{C_p \rho_0}{\lambda} \frac{dT}{dx} + \frac{W_{x,p} H_H}{\lambda} = 0, \quad (1)$$

Можно считать, что вся теплота, выделяемая в зоне реакции, передается в зону подогрева.

Тогда температура в зоне реакции будет постоянной и  $T/dx = 0$ . При этом уравнение (1) принимает вид (2):

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{W_{x,p} Q_u}{\lambda} = 0, \quad (2)$$

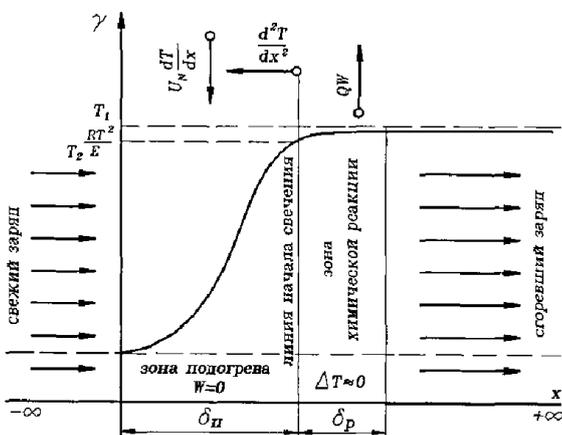


Рис. 1. Структура зоны пламени

Интегрирование уравнения в пределах от  $x = 0$  ( $T = T_p$ ) до  $x = \delta$  ( $T = T_z$ ) дает:

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0} = \sqrt{2 \frac{Q_u}{\lambda} \int_{T_p}^{T_z} W_{x,p} dT}, \quad (3)$$

В зоне подогрева  $W_{x,p} = 0$  и уравнение (1) переходит в уравнение теплопроводности:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - U_H * \frac{C_p \rho_0}{\lambda} \frac{dT}{dx} = 0,$$

При условии  $\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0}$  и  $T_p = T_z$  получаем

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0} = U_H \rho_0 \bar{C}_p,$$

где  $\bar{C}_p(T_z - T_0) = L$  – теплота сгорания

$$U_H = \sqrt{\frac{4 * G_{max} * C_p^2}{\rho_0} \left[ \frac{a * L_0(1 + \gamma)}{Q_u - \Delta Q_{хим} - \Delta Q_{дис}} \right]^3 * \left(\frac{T_0}{T_z}\right)^2 * \left(\frac{RT_z}{E}\right)^3 * A P \exp(-E/RT_z)},$$

горючей смеси.

Тогда:  $\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0} = U_H \rho_0 L / \lambda \quad (4)$

Уравнения (3) и (4) решаем совместно относительно  $U_H$ :

$$U_H = \frac{1}{\rho_0 L} \sqrt{2 \lambda Q_u \int_{T_p}^{T_z} W_{x,p} dT}$$

Заменив  $L p_0 = Q_u U_0$ , где  $U_0$  – начальная концентрация горючего, получаем уравнение для нормальной скорости сгорания в общем случае:

$$U_H = \sqrt{\frac{2 \lambda}{\rho_0 L U_0} \int_{T_p}^{T_z} W_{x,p} dT}, \quad (5)$$

Для решения интеграла, произведем, как это предложил Д.А. Франк-Каменецкий, следующую

$$U_H = \sqrt{\frac{1400}{T_z + 118} \left[ \frac{a L_0(1 + \gamma)}{Q_u - \Delta Q_{хим} - \Delta Q_{дис}} \right]^3 \left(\frac{RT_z^2}{E}\right) \frac{1}{T_z^{0.5} T_z^{0.10}} W_{x,p}^{T_z}}$$

замену:

$$\exp(-E/RT) \approx \exp(-E/RT_z) * \exp(-E \Delta T / RT_z^2)$$

Тогда получим

$$\int_{T_p}^{T_z} W_{x,p} dT = \int A * P \exp\left(-\frac{E}{RT_z}\right) dT \approx A * P \exp\left(-\frac{E}{RT_z}\right) * \left(\frac{RT_z^2}{E}\right)$$

С учетом этого имеем

$$U_H = \sqrt{\frac{2\lambda_{max} * A * P * R * T_z^2}{\rho_0 * L * U_0 E} \exp\left(-\frac{E}{RT_z}\right)}, \quad (5a)$$

Далее необходимо определить фактические концентрации реагирующих компонентов в зоне реакции, вблизи  $T_z$ . С этой целью уравнение баланса вещества

$$\frac{d^2(T/\rho)}{dx^2} - U_H * \frac{1}{D * \rho} \frac{d(T/\rho)}{dx} - \frac{W_{X,p}}{D * \rho} = 0, \quad (6)$$

решаем совместно с уравнением теплопроводности (1). Если в последующем продолжить равенство коэффициентов температуропроводности и диффузии  $\lambda/C_p\rho = D$ , то уравнения (1) и (6) можно свести к одному

$$C_p T_p + C_p T_u + C_p T_0 + \frac{Q_u a}{\rho_0} = C_p T_z$$

откуда

$$a = a_0 * \frac{\rho(T_z - T_u)}{\rho_0(T_z - T_u)}$$

Следовательно, текущие концентрации реагирующих компонентов в зоне реакции можно выразить через начальные концентрации и температуры. С учетом этого текущее значение фактора концентрации будет равно

$$P = C_T^m * C_0^n * \frac{\rho(T_z - T_u)}{\rho_0(T_z - T_u)}$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{T}{T_0} \quad \text{и} \quad T_z - T_0 = \frac{L}{C_p}$$

Учитывая, что

а

$$L = \frac{Q_u - \Delta Q_{хим} - \Delta Q_{дис}}{\alpha * L_0 * (1 + \gamma)},$$

после преобразований получаем

(5б)

Произведение  $AP_{exp}(-E/RT_z)$  является скоростью химической реакции при максимальной температуре

$$W_{X,p}^{T_z}$$

в зоне горения

Если воспользоваться формулой Сезерленда для определения текущего значения коэффициента теплопроводности

$$\lambda = \lambda_0 \frac{273 + 118}{T_z + 118} \left(\frac{T_z}{273}\right)^{1,5},$$

принять влияние давления на нормальную скорость в

виде  $U_H \approx P^{-\frac{1}{3}}$  и подставить численные значения некоторых параметров, то получим следующее расчетное уравнение:

Полученную формулу используем для анализа влияния состава смеси и степени ее загрязнения отработавшими газами на скорость ламинарного пламени.

Результаты расчетов представлены на рис. 2 графики нормальной скорости сгорания, построенные по коэффициенту избытка воздуха, вполне аналогичны графикам скорости химической реакции.

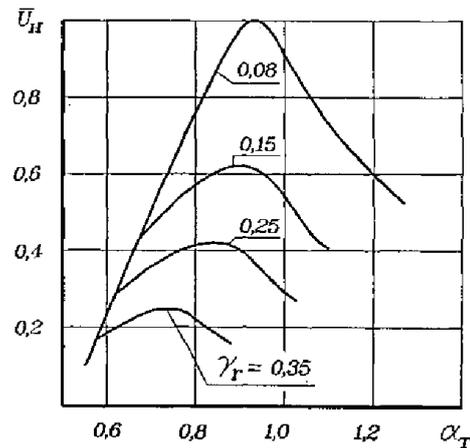


Рис. 2. Зависимость нормальной скорости сгорания от состава горючей смеси

При расчетах без учета диссоциации максимум нормальной скорости сгорания получается при составе горючей смеси, близком к стехиометрическому. При учете диссоциации максимумы нормальной скорости сдвигаются в сторону обогащенных смесей и располагаются в диапазоне значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 0,8...0,95$ .

Обогащение смеси вызывает более резкое уменьшение нормальной скорости сгорания, чем обеднение. Недовыделение теплоты при недостатке воздуха вызывает более сильное уменьшение теплоты сгорания горючей смеси, чем разбавление ее излишним воздухом, поэтому температуры сгорания падают более резко при отклонении состава смеси от оптимального в сторону обогащения, чем в сторону обеднения. А характер протекания графиков нормальной скорости, так же как и графиков скорости химической реакции, определяется формой графиков температуры сгорания. Разбавление горючей смеси отработавшими газами вызывает заметное уменьшение нормальной скорости сгорания: при  $\gamma = 0$  и  $\alpha = 0,83$  имеем  $U_H = 3,44$  м/с, а при  $\gamma = 0,1$  и том же коэффициента избытка воздуха величина  $U_H$  снижается до 2,85 м/с. При работе двигателя с малым использованием мощности коэффициент остаточных газов может возрастать до  $\gamma = 0,25$ , при этом нормальная скорость сгорания уменьшается до  $U_H = 2,33$  м/с. Догорание топлива в глубине зоны горения характеризуется усилением влияния на протекание реакций окисления топлива конечных продуктов. При этом нормальная скорость сгорания резко уменьшается. Так при  $\gamma = 0,52$  получаем при  $\alpha = 0,82$  величину нормальной скорости  $U_H = 1,27$  м/с, а при  $\alpha = 1,22 - U_H = 0,57$  м/с.

Такое сильное слияние продуктов сгорания на нормальную скорость сгорания известно из описанных в литературе результатов экспериментальных исследований. На рис. 3 представлены графики зависимости нормальной скорости сгорания бензовоздушной смеси от коэффициента избытка воздуха при различных концентрациях в смеси продуктов сгорания, полученные В.А. Щукиным с помощью бунзеновской горелки. Максимальная скорость сгорания чистой бензовоздушной смеси получена при стехиометрическом составе смеси и равна: 2,65 м/с при температуре начального подогрева 723 К,

3,25 м/с при 773 К.

По экспериментальным данным бензовоздушная смесь, содержащая 40% продуктов сгорания, имела максимум нормальной скорости сгорания всего лишь 48 м/с. Как и наши расчетные графики, экспериментальные кривые имеют более крутое падение в сторону обогащения смеси и более пологое в сторону обеднения.

Опыты В.А. Щукина по влиянию температуры начального подогрева смеси на нормальную скорость сгорания, подтверждают степень влияния этой температуры, полученной в расчетном уравнении (56).

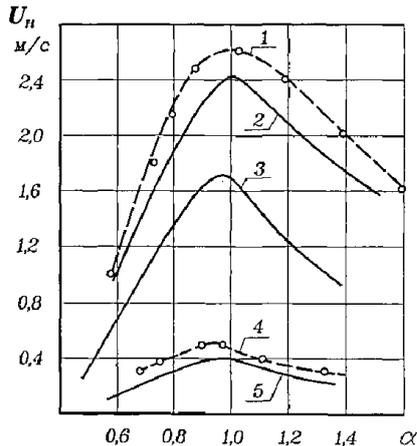


Рис. 3. Зависимость нормальной скорости сгорания от состава горючей смеси:

----- опытные графики В.А. Щукина и др.,  
 1 - чистая смесь; 4 - 40% продуктов сгорания;  
 ————— расчеты по уравнению (56),  
 2 -  $\gamma T = 0$ ; 3 -  $\gamma T = 0,08$ ; 5 -  $\gamma T = 0,35$

Пренебрежение влиянием потерь теплоты на диссоциацию приводит к существенному завышению расчетных значений нормальной скорости сгорания. Если при  $\gamma = 0$  с учетом диссоциации максимальная скорость сгорания получилась  $U_H = 3,44$  м/с, то без учета диссоциации она составила  $U_H = 3,75$  м/с.

Таким образом, уравнение нормальной скорости сгорания, полученное из тепловой теории распространения ламинарного пламени, достаточно хорошо отражает действительный закон влияния состава горючей смеси и параметров ее состояния на величину нормальной скорости. Оно учитывает также влияния на нормальную скорость сгорания степени разбавления горючей смеси инертными продуктами сгорания.

На рис. 4 представлены расчетные графики величин  $T_{пл}$  и  $U_H$ , рассчитанные для режима:  $n = 3500$  мин<sup>-1</sup>, полная нагрузка, угол опережения зажигания  $\theta = 35$  ПКВ.

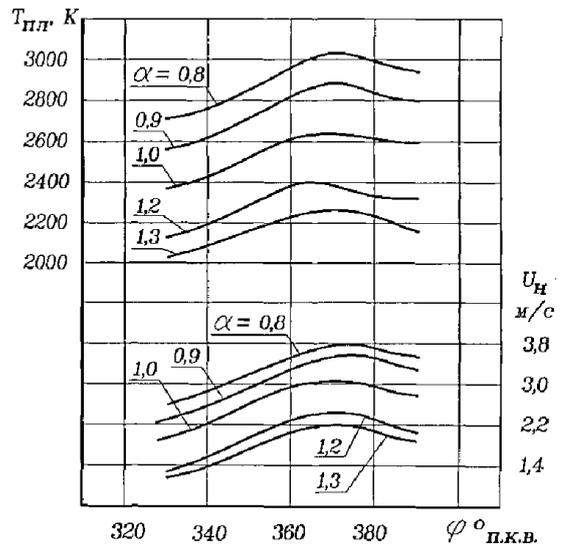


Рис. 4. Расчетные графики температуры пламени и нормальной скорости сгорания при разных составах смеси

На участке от начала сгорания до 10 - 15° после ВМТ происходит увеличение температуры пламени и нормальной скорости сгорания. Дело в том, что на этом участке происходит повышение давления в цилиндре и горючая смесь перед фронтом пламени адиабатически сжимается.

Повышение температуры пламени вызывает соответствующее увеличение нормальной скорости сгорания. Например, если при  $\alpha = 0,92$  в начале сгорания температура пламени была 2550 К, а нормальная скорость сгорания 1,84 м/с, то в конце сгорания они становятся:

$$T_{пл} = 3030 \text{ К и } U_H = 3,35 \text{ м/с.}$$

Если сгорание затягивается по ходу расширения, то вследствие падения давления происходит снижение температуры сгорания и нормальной скорости сгорания.

### Литература

1. Апашев М.Д., Михаленко В.Д. Уравнение, связывающее скорость турбулентного горения с видимой скоростью распространения пламени в двигателе. В кн.: Сб. трудов ВЗПИ. Серия. Двигатели внутреннего сгорания, 1973, вып. 8.
2. Вахошин Л.И. О некоторых особенностях рабочего процесса бензиновых двигателей с вихревым движением заряда. - Тр. НАМИ, 1979, вып. 3, с. 15-26.
3. Вибе И.И. Расчет рабочего цикла двигателей с учетом скорости сгорания и угла опережения воспламенения. - Автомобильная и тракторная промышленность, 1967, № 1, с. 15-23.
4. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. - М.: Машиностроение, 1977. - 277 с.
5. Воинов А.Н., Скорodelов Д.И. Изучение особенностей развития пред-пламенных процессов и воспламенения углеводородов различного строения. В кн.: Сборник Кинетика и Катализ. М.: АН СССР, 1967. т. 8, вып. 2, 3, с. 493 -505.
6. Генкин К.И., Хазанов З.С. Исследование механизма сгорания в двигателе. - В кн.: Горение и взрыв. Материалы третьего всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. М.: 1972, с. 409 - 415.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Я.И. Рудаев