

УДК 621.43.052

АБРАМЧУК Ф.И., д.т.н., ХНАДУ
КАБАНОВ А.Н., к.т.н., ХНАДУ
МАЙСТРЕНКО Г.В., инж., ХНАДУ
КУЗЬМЕНКО А.П., инж., ХНАДУ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОБЪЕМОВ СГОРЕВШЕЙ И НЕСГОРЕВШЕЙ СМЕСИ В ЦИЛИНДРЕ ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ 4ГЧ 7.5/7.35 В МНОГОЗОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СГОРАНИЯ

Розроблена методика розрахунку об'ємів згорілої і незгорілої суміші в газовому ДВЗ 4 ГЧ 7,5/7,35 в залежності від шляху, пройденого фронтом полум'я, з використанням методів аналітичної геометрії.

Введение. Известно, что математическое моделирование физических процессов имеет большое значение при выполнении научного исследования, позволяя экономить, время, материальные и человеческие ресурсы. Вследствие этого, а также благодаря бурному развитию средств автоматизации математических вычислений математические модели все больше усложняются с целью повышения их точности. Кроме того, возникает проблема расчета экологических показателей ДВС вследствие постоянного увеличения выбросов токсичных компонентов автомобилями.

Большое внимание уделяется методикам расчета процесса сгорания вследствие исключительной сложности процессов, происходящих в цилиндре во время выгорания топлива. Следовательно, разработка математической модели, позволяющей рассчитать не только мощностно-экономические, но и экологические показатели газового ДВС, является актуальной задачей.

Анализ последних достижений и публикаций. В настоящее время создано достаточно большое количество методик, позволяющих рассчитать кривую тепловыделения.

К первому типу относятся полуэмпирические уравнения, которые, как правило, являются частными случаями уравнения закона плотности вероятности непрерывной случайной величины. Это известные модели Неймана [1], Гончара [2] и т.д. Самой известной моделью данного класса является модель Вибе [3].

Эмпирические модели, подобные модели Вибе, хороши своей простотой и отработанностью, однако они не позволяют рассчитать экологические показатели двигателя, в частности, образование вредных компонентов в процессе горения топливо-воздушной смеси.

Ко второму типу моделей относятся методики, в которых используются эмпирические или полуэмпирические формулы для скорости фронта пламени, причем кривая тепловыделения рассчитывается исходя из пути, пройденного пламенем от начала сгорания.

В основе всех этих методов расчета лежит постулат М. Гюи, доказанный В.А. Михельсоном [3], а также допущение о том, что поверхность фронта пламени имеет сферическую форму. Согласно постулату Гюи, количество горючей смеси, воспламеняемой единицей поверхности пламени в единицу времени, постоянно по своей величине.

Третий класс моделей основан на расчете динамики потоков газа в цилиндре, поэтому называется computational fluid dynamics (CFD). Этот подход базируется на

численном моделировании потоков газов во впускном коллекторе и цилиндре двигателя, а также процессов, которые происходят во время полного цикла работы ДВС, от начала наполнения до конца выпуска. Такой подход учитывает практически все основные физико-химические процессы, которые происходят в цилиндре во время работы двигателя. При этом основная система уравнений, используемая при моделировании, состоит из следующих равенств: уравнения количества движения (Навье-Стокса), уравнения энергии, уравнения неразрывности и уравнения диффузии [4].

CFD-модели позволяют очень точно моделировать процессы горения и образования токсичных компонентов, рассчитать кривую тепловыделения и индикаторную диаграмму на ее основе, однако вследствие цикловой нестабильности процесса сгорания в двигателях с искровым зажиганием (доходящей до 30 %) точность расчета подобных моделей оказывается избыточной, больше, чем диапазон изменения показателей процесса сгорания в реальном двигателе от цикла к циклу. При этом вследствие сложности подготовки исходных данных и большого объема вычислений в таких моделях численное моделирование процесса сгорания может занимать время, намного превышающее время натурального эксперимента. Такие модели удобно использовать при создании принципиально новых конструкций и рабочих процессов тепловых машин, однако для большинства прикладных задач, таких, как конвертация двигателей на другие виды топлива и создание ДВС классических конструкций, применять такие модели нецелесообразно.

Модели второго типа, в которых используются эмпирические или полуэмпирические формулы для определения скорости фронта пламени, соединяют в себе достоинства эмпирических схем (простота расчета) и CFD-подхода (точность моделирования, возможность расчета экологических показателей), следовательно, пригодны для выполнения поставленной задачи – расчета мощностно-экономических и экологических характеристик двигателя 4ГЧ 7.5/7.35.

Самый распространенный подход к расчету сгоревшей и несгоревшей зон, описанный в [5], состоит в разбиении сгоревшей и несгоревшей зоны на элементарные объемы и последовательной проверке принадлежности точек этих элементарных объемов определенным областям пространства. Однако его недостатком является то, что он не позволяет оценить влияние геометрических параметров камеры сгорания на кривую тепловыделения и ряд других показателей процесса сгорания.

Цель и постановка задачи. Исходя из вышесказанного, целью данного исследования является создание элемента многозонной математической модели сгорания топливо-воздушной смеси в цилиндре, позволяющей рассчитать объемы сгоревшей и несгоревшей смеси в зависимости от пути, пройденного фронтом пламени для двигателя 4ГЧ7.5/7.35, то есть решения задачи нахождения объемов сгоревшей и несгоревшей смеси при определенном положении фронта пламени. При этом данный подход должен обеспечить возможность оценки влияния геометрических параметров камеры сгорания на показатели процесса сгорания газового ДВС.

Основным допущением модели является то, что фронт турбулентного пламени имеет форму сферы. В методиках, в которых принимается данное допущение, расчетные данные хорошо совпадают с экспериментальными [5]. Сгорание заканчивается в момент, когда объем сгоревшей смеси становится равен объему надпоршневого пространства.

Расчет разбивается на шаги, при этом процесс распространения пламени

становится квазистатическим.

Камера сгорания представляется в виде геометрической фигуры, состоящей из призмы и двух наклонных цилиндров. Поверхности призмы задаются в виде плоскостей. Поверхность поршня плоская.

Математическое описание камеры сгорания осуществляется путем задания координат опорных точек относительно начала координат, расположенного в точке, из которой развивается пламя, то есть в точке, соответствующей искровому промежутку свечи зажигания. Эта точка принадлежит одной из плоскостей призмы.

Уравнения элементов камеры сгорания (линий и поверхностей) выводятся методами аналитической геометрии из координат опорных точек элементов.

В каждый момент времени рассчитывается объем сгоревшей смеси. Объем несгоревшей смеси вычисляется путем вычитания объема сгоревшей смеси из полного объема надпоршневого пространства. Основными исходными данными для расчета на каждом шаге являются: радиус фронта пламени R_{PL} и расстояние от искрового промежутка свечи зажигания до поверхности поршня H_p .

Расчет объема сгоревшей смеси находится путем нахождения определенного интеграла с пределами интегрирования, определяемыми поверхностями, окружающими объем в каждый момент времени. Численное интегрирование осуществляется методом Ромберга.

Расчетная схема камеры сгорания двигателя 4ГЧ7.5/7.35 приведена на рис. 1 и 2.

Камера сгорания двигателя 4ГЧ 7.5/7.35 представляется в виде геометрической фигуры, состоящей из призмы с параллельными основаниями AOB и DKC , а также двух наклонных цилиндров, большого и малого. Вертикальной секущей плоскостью для малого цилиндра является AIB , для большого – DKC , общей плоскостью, ограничивающей цилиндры по высоте, является ADK . Линии AD и BC являются касательными к окружностям с центрами в точках O_{mc} и O_{bc} , которые являются основаниями малого (mc) и большого (bc) наклонного цилиндров соответственно.

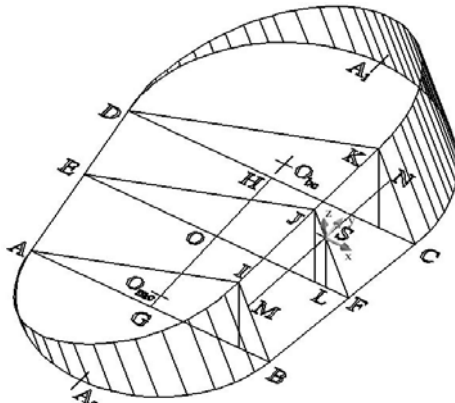


Рисунок 1 – Расчетная схема камеры сгорания

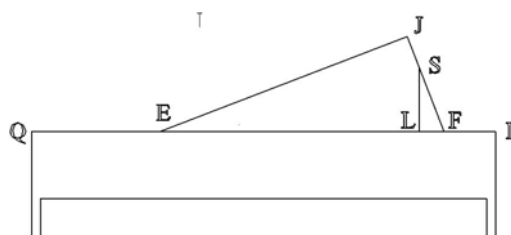


Рисунок 2 – Разрез камеры сгорания в плоскости EJF

Свеча зажигания расположена в точке S , точка O является осевой линией цилиндра. Плоскость ABC совпадает с поверхностью головки цилиндров. Через точку S проходит плоскость EJF , перпендикулярная ABC .

Уравнения прямых, проходящих через две опорные точки (точка 1 и точка 2), выводятся по соотношению

$$\frac{x_S - x_{S1}}{x_{S2} - x_{S1}} = \frac{y_S - y_{S1}}{y_{S2} - y_{S1}} = \frac{z_S - z_{S1}}{z_{S2} - z_{S1}}, \quad (1)$$

где x_{S1}, y_{S1}, z_{S1} – координаты точки 1; x_{S2}, y_{S2}, z_{S2} – координаты точки 2.

Уравнения плоскостей, проходящих через три опорные точки (точка 1, точка 2 и точка 3), выводятся по соотношению

$$\begin{vmatrix} x_S - x_{S1} & y_S - y_{S1} & z_S - z_{S1} \\ x_{S2} - x_{S1} & y_{S2} - y_{S1} & z_{S2} - z_{S1} \\ x_{S3} - x_{S1} & y_{S3} - y_{S1} & z_{S3} - z_{S1} \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

Основные размеры камеры сгорания двигателя 4ГЧ 7.5/7.35, мм

$A_1A_2 = 75$; $AB = 39.67$; $DC = 47.6$; $R_{bc} = 24$; $R_{mc} = 20$; $SJ = 5$; $SL = 10$; $SF = 10.7$; $SN = 14$; $SM = 16.7$; $SP = 15.5$; $SE = 41.36$; $SQ = 61$.

Углы между геометрическими элементами камеры сгорания, град.

$$\Theta_{AD-BC} = 15^\circ; \Theta_{ABC-ADK} = 21^\circ; \Theta_{BCK-ADK} = 90^\circ.$$

Координаты опорных точек модели приведены в таблице 1.

Расстояние от ВМТ до поверхности головки цилиндров (плоскость ABC) равняется $H_{VMT} = 1$ мм. Таким образом, расстояние от точки S до ВМТ

$$H_{SVMT} = H_{VMT} + SL. \quad (3)$$

Из этого следует, что $HSVMT = 11$ мм.

Расстояние от поверхности поршня до ВМТ в зависимости от угла поворота коленчатого вала

$$S_{VMT} = R_{KR} \cdot \sigma, \quad (4)$$

где R_{KR} длина кривошипа; σ – относительное перемещение поршня

$$\sigma = 1 - \cos(\varphi) + \frac{\lambda_{KR}}{4} (1 - \cos(2\varphi)); \quad (5)$$

φ – угол поворота коленчатого вала относительно ВМТ; λ_{KR} – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна L

$$\lambda_{KR} = \frac{R_{KR}}{L}. \quad (6)$$

Таблица 1 – Координаты опорных точек модели

Точка	x_S	y_S	z_S
<i>A</i>	-37,985	-16,58	-10
<i>B</i>	1,681	-16,58	-10
<i>C</i>	5,647	13,9	-10
<i>D</i>	-41,951	13,9	-10
<i>E</i>	-40,142	0	-10
<i>F</i>	3,838	0	-10
<i>G</i>	-18,152	-16,58	-10
<i>H</i>	-18,152	13,9	-10
<i>I</i>	-3,413	-16,58	3,271
<i>J</i>	-1,81	0	4,714
<i>K</i>	-0,466	13,9	5,925
<i>L</i>	0	0	-10
<i>M</i>	0	-16,58	0
<i>N</i>	0	13,9	0
<i>O</i>	-18,152	0	-10
<i>O_{bc}</i>	-18,152	16	-10
<i>O_{mc}</i>	-18,152	-15	-10
<i>A₁</i>	-18,152	40	-10
<i>A₂</i>	-18,152	-35	-10
<i>S</i>	0	0	0

Таким образом, расстояние от точки S до поверхности поршня рассчитывается по соотношению

$$H_p = H_{SVMT} + S_{VMT}. \quad (7)$$

Объем части сферы пламени, отсекаемый поршнем, мм³

$$V_{PLPOR} = \frac{\pi \cdot a_{PLPOR}^2}{3} [3R_{PL} - a_{PLPOR}], \quad (8)$$

где H_p – расстояние от свечи до поверхности поршня по нормали, мм;

$$a_{PLPOR} = R_{PL} - H_p. \quad (9)$$

Полусфера минус половина шарового сегмента, отсекаемого плоскостью ADK

$$V_{PLPS} = \frac{2}{3} \pi R_{PL}^3 - \frac{\pi \cdot a_{PLPS}^2}{6} [3R_{PL} - a_{PLPS}], \quad (10)$$

где

$$a_{PLPS} = R_{PL} - SJ . \quad (11)$$

Объем сегмента, заключенного между плоскостями ВСК, АВС и сферой пламени

$$V_{SEG} = \int_{3.383}^{a_{V1}} \int_0^{a_{V2}} \int_{a_{V3}}^{-10} dz_S dy_S dx_S , \quad (12)$$

где для упрощения выражения выполнена замена переменных

$$a_{V1} = \sqrt{R_{PL}^2 - 100} , \quad (13)$$

$$a_{V2} = \sqrt{R_{PL}^2 - 100 - x_S^2} , \quad (14)$$

$$a_{V3} = \sqrt{R_{PL}^2 - y_S^2 - x_S^2} . \quad (15)$$

Следовательно

$$V_{SEG} = \int_{3.383}^{a_{V1}} \int_0^{a_{V2}} [-10 - a_{V3}] dy_S dx_S . \quad (16)$$

С учетом того, что

$$\int [-10 - a_{V3}] dy_S = -10 \cdot y_S - 0.5 \cdot y_S \cdot a_{V3} + 0.5 \cdot R_{PL}^2 \cdot \ln[y_S + a_{V3}] - 0.5 \cdot x_S^2 \cdot \ln[y_S + a_{V3}] , \quad (17)$$

выражение (16) принимает вид

$$\begin{aligned} V_{SEG} = & \int_{3.383}^{a_{V1}} -15 \cdot a_{V2} + 0.5 \cdot R_{PL}^2 \cdot \ln[a_{V2} + 10] - \\ & - 0.5 \cdot x_S^2 \cdot \ln[a_{V2} + 10] - 0.25 \cdot R_{PL}^2 \cdot \ln[(R_{PL} - x_S)(R_{PL} + x_S)] + \\ & + 0.25 \cdot x_S^2 \cdot \ln[(R_{PL} - x_S)(R_{PL} + x_S)] dx_S . \end{aligned} \quad (18)$$

Объем шарового сегмента, отсекаемого от сферы плоскостью ДКС

$$V_{SEGDKC} = \frac{\pi \cdot a_{SEGDKC}^2}{3} \cdot [3 \cdot R_{PL} - a_{SEGDKC}] , \quad (19)$$

где

$$a_{SEGDKC} = R_{PL} - SN . \quad (20)$$

Объем шарового сегмента, отсекаемого от сферы плоскостью AIB

$$V_{SEGAIB} = \frac{\pi \cdot a_{SEGAIB}^2}{3} \cdot [3 \cdot R_{PL} - a_{SEGAIB}], \quad (21)$$

где

$$a_{SEGAIB} = R_{PL} - SM. \quad (22)$$

Объем призмы $AIBDKC$

$$V_{KL} = \int_{-16.58}^{13.9} a_{KLx} dy_S, \quad (23)$$

где

$$a_{KLx} = \int_{-0.13 \cdot y_S - 3.838}^{-0.13 \cdot y_S + 40.14} a_{KLz} dx_S, \quad (24)$$

$$a_{KLz} = \int_{-10}^{0.384 \cdot x_S + 4.99 \cdot 10^{-2} \cdot y_S + 11.473} dz_S. \quad (25)$$

После подстановки выражений (24) и (25) в уравнение (23), получаем

$$V_{KL} = \int_{-16.58}^{13.9} (-8.795 \cdot 10^{-4} \cdot y_S + 1250.86) dy_S. \quad (26)$$

В итоге, согласно выражению (26), объем призмы $AIBDKC$ составит, мм³

$$V_{KL} = 11472. \quad (27)$$

Объем малого цилиндра, с учетом замены переменных

$$V_{mc} = \int_{-37.984}^{1.681} \int_{\frac{-2963}{200} - \frac{1}{125} a_{mc}}^{-16.58} \int_{-10}^{b_{mc}} dz_S dy_S dx_S, \quad (28)$$

где

$$a_{mc} = \sqrt{1.98 \cdot 10^5 - 15625 \cdot x_S^2 - 5.6 \cdot 10^5 \cdot x_S}, \quad (29)$$

$$b_{mc} = 0.383 \cdot x_S + 4.99 \cdot 10^{-2} \cdot y_S + 11.473. \quad (30)$$

В итоге

$$V_{mc} = \int_{-37.984}^{1.681} \int_{\frac{-2963}{200} - \frac{1}{125} a_{mc}}^{-16.58} (b_{mc} + 10) dy_S dx_S, \quad (31)$$

$$V_{mc} = \int_{-37.984}^{1.681} (0.23 \cdot x_S - 68.216 + 3.064 \cdot 10^{-3} \times x_S \cdot a_{mc} + 0.166 \cdot a_{mc} + 2.495 \cdot 10^{-2} \cdot x_S^2) dx_S. \quad (32)$$

В результате расчета с использованием зависимости (32) получаем, мм³

$$V_{mc} = 4144. \quad (33)$$

Объем большого цилиндра

$$V_{bc} = \int_{-41.95}^{5.647} \int_{13.9}^{a_{bc}} \int_{-10}^{b_{mc}} dz_S dy_S dx_S, \quad (34)$$

где

$$a_{bc} = \frac{8029}{500} + \frac{1}{125} \cdot (19851639 - 15625 \cdot x_S^2 - 567250 \cdot x_S)^{0.5}. \quad (35)$$

С учетом (35)

$$V_{bc} = \int_{-41.95}^{5.647} \int_{13.9}^{a_{bc}} (b_{mc} + 10) dy_S dx_S, \quad (36)$$

в результате чего получается

$$V_{bc} = \int_{-37.984}^{1.681} (-7.927 \cdot 10^{-2} \cdot x_S + 3.064 \cdot 10^{-3} \cdot x_S \cdot a_{mc} + 0.178 \cdot a_{mc} + 79.65 + 2.495 \cdot 10^{-2} \cdot x_S^2) dx_S. \quad (37)$$

В соответствии с зависимостью (37) получаем, мм³

$$V_{bc} = 8397. \quad (38)$$

При расчете учитывается, что пламя является квазистатическим в каждый момент времени. Зная путь, пройденный фронтом пламени от точки S за определенное время (RPL), и сравнивая его положение относительно определенных точек, выбирается соответствующая формула.

Начиная с 3-го шага, когда пламя выходит за пределы камеры сгорания в головке цилиндров, выполняется проверка на пересечение фронта пламени поверхностью поршня. Алгоритм расчета приведен на рис. 3.

Зависимости, соответствующие алгоритму на рис. 3, приведены ниже.

$$(0) R_{pl} = 0$$

$$V_{PL} = 0. \quad (39)$$

$$(1) SJ \geq R_{pl} > 0$$

$$V_{PL1} = \frac{2}{3} \pi R_{PL}^3. \quad (40)$$

$$(2) SL \geq R_{pl} > SJ$$

$$V_{PL2} = V_{PLPS}. \quad (41)$$

$$(3) SF \geq R_{pl} > SL$$

$$V_{PL3} = V_{PLPS}. \quad (42)$$

$$(4) SN \geq R_{pl} > SF$$

$$V_{PL4} = V_{PLPS} + V_{SEG}. \quad (43)$$

$$(5) SM \geq R_{pl} > SN$$

$$V_{PL5} = V_{PL4} - V_{SEGDKC}. \quad (44)$$

$$(6) SP \geq R_{pl} > SM$$

$$V_{PL6} = V_{PL5} - V_{SEGAIB}. \quad (45)$$

$$(7) SE \geq R_{pl} > SP$$

$$V_{PL7} = V_{KL1} + V_{PS} + V_{MC} + V_{BC}, \quad (46)$$

где V_{KL1} – объем, занимаемый сгоревшей смесью в пределах призмы

$$V_{KL1} = \int_{-16.58}^{13.9} \int_{\sqrt{R_{PL}^2 - 100 - y_S^2}}^{-0.13 \cdot y_S + 40.14} \int_{-10}^{b_{mc}} dz_S dx_S dy_S, \quad (47)$$

$$V_{KL1} = \int_{-16.58}^{13.9} \int_{\sqrt{R_{PL}^2 - 100 - y_S^2}}^{-0.13 \cdot y_S + 40.14} (b_{mc} + 10) dx_S dy_S, \quad (48)$$

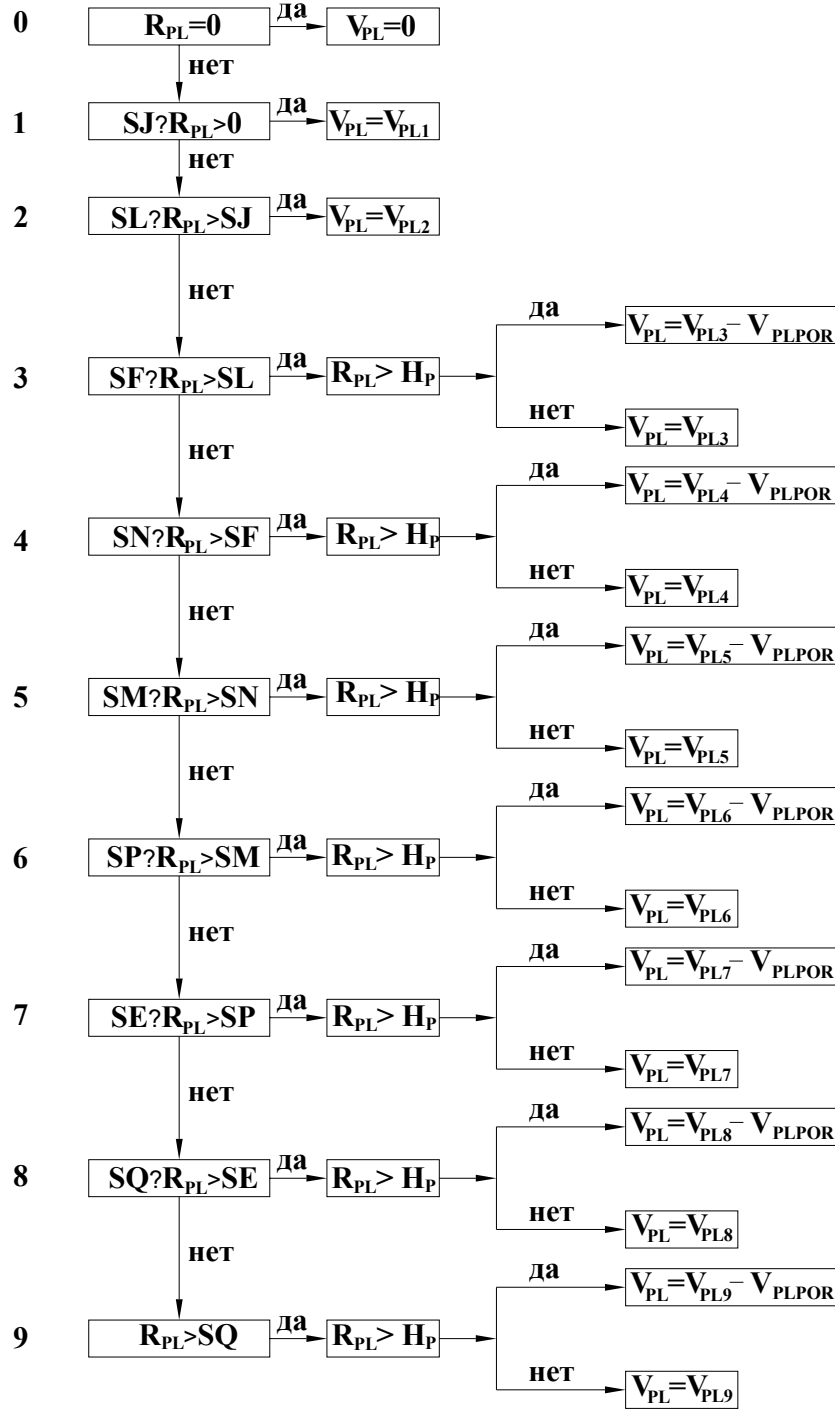


Рисунок 3 – Алгоритм расчета

$$\begin{aligned}
 V_{KL1} = \int_{-16.58}^{13.9} (3.685 \cdot 10^4 + 10.736 \cdot \ln [13.9 + (R_{PL}^2 - 293.21)^{0.5}]) \cdot R_{PL}^2 - \\
 - 1073.65 \cdot \ln [13.9 + (R_{PL}^2 - 293.21)^{0.5}] - 5.852 \cdot R_{PL}^2 ; \quad (49)
 \end{aligned}$$

V_{PS} – объем сгоревшей смеси, ограниченный плоскостью ABC и поверхностью гильзы цилиндра

$$V_{PS} = -2 \cdot \int_{a_{V1}}^{11.84} \int_0^{a_{V2}} \int_{a_{V3}}^{-10} dz_S dy_S dx_S, \quad (50)$$

$$V_{PS} = 2 \cdot \int_{a_{V1}}^{11.84} \int_0^{a_{V2}} (a_{V3} + 10) dy_S dx_S, \quad (51)$$

$$\begin{aligned} V_{PS} = & 2 \cdot \int_{a_{V1}}^{11.84} -15 \cdot a_{V2} + 0.5 \cdot \ln(a_{V2} + 10) - \\ & - 0.5 \cdot \ln(a_{V2} + 10) \cdot x_S^2 - 0.25 \cdot \ln[(R_{PL} - x_S)(R_{PL} + x_S)] \cdot R_{PL}^2 + \\ & + 0.25 \cdot \ln[(R_{PL} - x_S)(R_{PL} + x_S)] \cdot x_S^2; \end{aligned} \quad (52)$$

V_{mc1} – объем, занимаемый сгоревшей смесью в пределах малого цилиндра

$$V_{mc1} = \int_{a_{V1}}^{1.681} \int_{\frac{-2963}{200} - \frac{1}{125} a_{mc}}^{-16.58} \int_{-10}^{b_{mc}} dz_S dy_S dx_S, \quad (53)$$

$$V_{mc} = \int_{a_{V1}}^{1.681} \int_{\frac{-2963}{200} - \frac{1}{125} a_{mc}}^{-16.58} (b_{mc} + 10) dy_S dx_S, \quad (54)$$

$$\begin{aligned} V_{mc1} = & \int_{a_{V1}}^{1.681} (0.23 \cdot x_S - 68.216 + 3.064 \cdot 10^{-3} \times \\ & \times x_S \cdot a_{mc} + 0.166 \cdot a_{mc} + 2.495 \cdot 10^{-2} \cdot x_S^2) dx_S; \end{aligned} \quad (55)$$

V_{bc1} – объем, занимаемый сгоревшей смесью в пределах большого цилиндра

$$V_{bc1} = \int_{a_{V1}}^{5.647} \int_{13.9}^{a_{bc}} \int_{-10}^{b_{mc}} dz_S dy_S dx_S, \quad (56)$$

$$V_{bc1} = \int_{a_{V1}}^{5.647} \int_{13.9}^{a_{bc}} (b_{mc} + 10) dy_S dx_S, \quad (57)$$

$$\begin{aligned} V_{bc} = & \int_{a_{V1}}^{1.681} (-7.927 \cdot 10^{-2} \cdot x_S + 3.064 \cdot 10^{-3} \cdot x_S \cdot a_{mc} + \\ & + 0.178 \cdot a_{mc} + 79.65 + 2.495 \cdot 10^{-2} \cdot x_S^2. \end{aligned} \quad (58)$$

(8) $SQ \geq R_{pl} > SE$

Сгоревшая смесь полностью заняла объем камеры сгорания, в этом случае

$$V_{PL8} = V_{KL} + V_{PS} + V_{mc} + V_{bc} . \quad (59)$$

(9) $R_{pl} > SQ$

$$V_{PL9} = V_{KL} + V_{PS} + V_{mc} + V_{bc} , \quad (60)$$

где V_{PS2} – объем сгоревшей смеси, ограниченный плоскостью ABC и поверхностью гильзы цилиндра при $R_{pl} > SQ$

$$V_{PS2} = -2 \cdot \int_{63.16}^{11.84} \int_0^{a_{V2}} \int_{a_{V3}}^{-10} dz_S dy_S dx_S , \quad (61)$$

$$V_{PS2} = 2 \cdot \int_{63.16}^{11.84} \int_0^{a_{V2}} (a_{V3} + 10) dy_S dx_S , \quad (62)$$

$$\begin{aligned} V_{PS2} = 2 \cdot \int_{63.16}^{11.84} & -15 \cdot a_{V2} + 0.5 \cdot \ln(a_{V2} + 10) - \\ & - 0.5 \cdot \ln(a_{V2} + 10) \cdot x_S^2 - 0.25 \cdot \ln[(R_{PL} - x_S)(R_{PL} + x_S)] \cdot R_{PL}^2 + \\ & + 0.25 \cdot \ln[(R_{PL} - x_S)(R_{PL} + x_S)] \cdot x_S^2 . \end{aligned} \quad (63)$$

Выводы

1. Разработана методика расчета объемов сгоревшей и несгоревшей смеси в цилиндре газового ДВС 4ГЧ7.5/7.35 в зависимости от положения фронта пламени, позволяющая в дальнейшем оценить влияние формы камеры сгорания на процесс выгорания топлива.

2. В результате расчетов получен объем камеры сгорания в головке цилиндров 24 см³, что соответствует объему, полученному путем проливки камеры сгорания водой.

Список литературы: 1. *Нейман К.* Кинетический анализ процесса сгорания в дизеле. – Сб. монографий из иностранной литературы «Двигатели внутреннего сгорания», Т. IV. – М.: Машгиз, 1938. – С. 118-142. 2. *Гончар Б. М.* Уточнённый способ расчёта и построения индикаторной диаграммы двигателя, Сб. статей «Исследование рабочих процессов в дизелях», ЦНИДИ, 25, Машгиз, 1954. 3. *Вибе И.И.* Новое о рабочем цикле двигателей. – М.: Машгиз, 1962. – 270 с. 4. *Abu-orf G.M., Cant R.S.* A turbulent reaction rate model for premixed turbulent combustion in spark-ignition engines // Combustion and Flame. – № 122. – 2000. – P. 233-252. 5. *Куценко А.С.* Математическое моделирование и идентификация рабочих процессов ДВС на альтернативных топливах: дис. докт. техн. наук: 05.14.05/Институт проблем машиностроения. – Харьков, 1996. – 321 с.