

УДК 621.43

А.Т. ВОЛОЧКО, доктор техн. наук, А.Ю. ИЗОБЕЛЛО
Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

Г.А. ВЕРШИНА, канд. техн. наук, А.Ю. ПИЛАТОВ
Белорусский национальный технический университет, Минск

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВЫСОКОФОРСИРОВАННОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРШНЯ

Представлена методика оптимизации пространственного расположения сопел распылителя форсунки высокофорсированного дизельного ДВС, позволяющая с достаточно высокой точностью определить граничные условия на днище поршня, что дает возможность моделировать температурные поля в поршне.

Анализ последних направлений [1] развития рынка автопроизводителей показывает наличие устойчивого спроса на высокофорсированные дизели большой удельной мощности.

При повышении литровой мощности свыше 40 кВт/л ресурс дизельного двигателя определяется долговечностью цилиндропоршневой группы, а именно ресурсом поршня, работа которого осуществляется в особо тяжелых условиях. На напряженно-деформированное состояние поршня в условиях его эксплуатации существенное влияние оказывают параметры рабочего процесса дизеля, пренебрежение которыми, как показывает конструкторская практика, зачастую приводит к заклиниванию, либо к прогоранию поршня и выходу из строя всего дизеля. Кроме этого, температурный режим днища поршня оказывает существенное влияние на экологические показатели высокофорсированного дизеля.

Как показывают современные исследования [2–4] в области моделирования температурных полей газов внутрицилиндрового пространства, на формирование температурного поля газов над поршнем оказывает существенное влияние расположение факелов в пространстве при истечении топлива из сопел форсунки. Направление соплового отверстия в пространстве камеры сгорания определяет длину факела и распределяет время его объемного и пленочного смесеобразования с воздухом камеры сгорания, что в конечном итоге сказывается на характере тепловыделения при сгорании топлива и температуре газов. Локальное температурное поле для отдельно выделяемого по направлению соплового отверстия топливного факела взаимодействует с днищем поршня и формирует характеристики теплообмена с ним вблизи области пятна контакта топливного факела при его касании поверхности поршня. При изменении ориентации соплового отверстия в пространстве изме-

няется температурное поле газов при горении топлива, которое также взаимодействует с днищем поршня и определяет его температурный режим и температурное поле внутри поршня. Что особенно актуально при создании дизелей, соответствующих экологическим нормам Euro-IV и выше.

Таким образом, факт влияния расположения сопел форсунки на температурный режим днища поршня и распределение температурных полей внутри его можно использовать при решении задачи моделирования теплового поля внутри поршня с циркуляционным охлаждением, перспективность которой обусловлена необходимостью повышения литровой мощности и поиском путей более эффективного охлаждения поршней.

На скорость сгорания топлива, распыленного в объеме топливного факела, существенно влияет длина части факела, имеющая объемное смесеобразование. Скорость сгорания топлива, как было отмечено ранее, определяет косвенно температурный режим горения топлива и через характеристики теплопередачи от газов днищу поршня – тепловой режим самого днища поршня. Поэтому определение длины части факела с объемным смесеобразованием, непосредственно определяемой через координаты фронта факела, является актуальной задачей при последующем моделировании распределения температурных полей в поршне с циркуляционным охлаждением.

Метод определения длины факела основывается на вычислении длины его оси (геометрического отрезка $O'N$) в каждый момент времени для процесса сгорания по углу поворота коленчатого вала (рисунок 1). Точка O' фиксирует начальную точку траектории истечения факела, а точка N – точку его окончания полета в объеме или точку встречи с поверхностью камеры сгорания.

Траектория полета факела в системе координат $x'o'y'$ устанавливается углом χ с вертикалью, совпадаю-

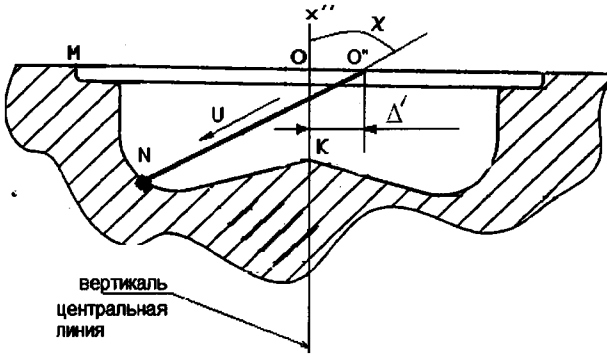


Рисунок 1 – Геометрическая траектория полета топливного факела

шей с центральной линией, условно разделяющей профиль камеры сгорания на две равные части, а также смещением начальной точки O'' траектории от вертикали на некоторое расстояние Δ' .

Профиль MNK имеет в пространстве сложную форму. Поэтому при осуществлении последующих вычислений MNK разбивается на некоторое количество отрезков равной длины n (рисунок 2) и представляется в последующих расчетах в виде массива координат $\{m_x[i](\varphi); m_y[i]\}$. Вертикальная координата x'' , в результате возвратно-поступательного движения поршня, изменяется по углу поворота коленчатого вала, а горизонтальная координата y'' остается все время постоянной.

Движение фронта топливного факела осуществляется по траектории $O''N...6$ за весь временной промежуток топливоподачи и описывается уравнением прямой в координатах $x''oy''$.

$$x'' = \operatorname{tg}\chi \cdot y'' + \Delta' \quad (1)$$

Профиль камеры сгорания MNK может быть описан в координатах $x''oy''$ некоторым уравнением

$$x'' = f(y'') \quad (2)$$

Совместное решение системы уравнений (1) и (2) определяет координаты одной из точек $\{N; 1; 2; 3; 4; 5; 6\}$ в данный момент времени

$$\begin{cases} x'' = \operatorname{tg}\chi \cdot y'' + \Delta' \\ x'' = f(y'') \end{cases} \Rightarrow \{x_T''; y_T''\}, \quad (3)$$

где $\{x_T''; y_T''\}$ – координаты одной из точек $\{N; 1; 2; 3; 4; 5; 6\}$ пересечения траектории факела с профилем MNK.

Горизонтальная координата y'' профиля камеры сгорания задается изначально в виде массива координат $m_y[i] = \{y_1; \dots; y_3\}$ и не изменяется в результате перемещения поршня. Вертикальная координата x'' днища поршня изменяется в соответствии с законом его перемещения

$$m_x[i](\varphi) = R \cdot \left((1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos 2\varphi) \right) + m_{x0}[i], \quad (4)$$

где R – радиус кривошипа; λ – отношение длины шатуна к длине кривошипа; $m_{x0}[i]$ – массив вертикальных координат профиля поршня при его нахождении в верхней мертвой точке.

Таким образом, вертикальная координата x_T'' точек пересечения траектории топливного факела с днищем поршня смещается также в соответствии с законом пе-

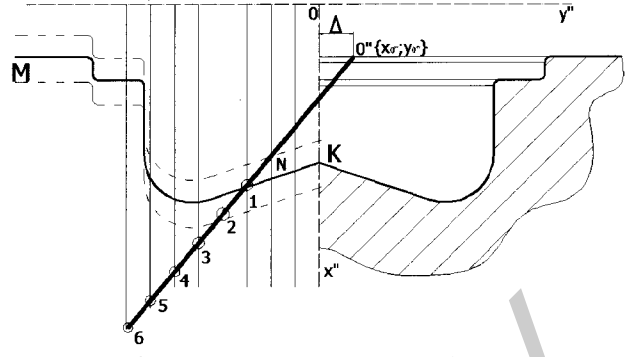


Рисунок 2 – Участок профиля камеры сгорания с галерейным охлаждением при вычислении длины топливного факела

ремещения поршня. Движение фронта факела по траектории через точки $\{N; 1; 2; 3; 4; 5; 6\}$ определяется уравнением

$$\varphi_T^\Phi[i] = 6 \cdot n \cdot \frac{\left[(x_T''[i](\varphi) - x_{0''})^2 + (y_T''[i] - y_{0''})^2 \right]}{A_T}, \quad (5)$$

где n – частота вращения коленчатого вала; $\{x_{0''}; y_{0''}\}$ – координаты точки выхода факела из сопла форсунки; A_T – коэффициент, определен в [5].

При вычислении текущей длины факела принимается, что факел и днище поршня встречаются, если они встречаются в одной и той же точке профиля $\{m_x[i](\varphi); m_y[i]\}$ выбранного сечения (рисунок 2) в один и тот же момент времени. Зависимость (2), образующая днище поршня, с учетом (1) и (4) может быть определена как

$$\operatorname{tg}\chi \left[R \cdot \left((1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right) + m_{x0}[i] \right] - (\Delta' + m_y[i]) = 0. \quad (6)$$

Решением данного уравнения (6) является некоторый массив моментов времени $\varphi_T^\Phi[i]$ при задании начальных значений горизонтальных координат профиля (днища поршня) $m_y[i]$ и вертикальных координат $m_{x0}[i]$. Определяемый по уравнению (6) массив $\varphi_T^\Phi[i]$ устанавливает последовательность прохождения во времени профилем (днищем) поршня точек $\{N; 1; 2; 3; 4; 5; 6\}$ траектории движения фронта факела ON (рисунок 2). Фронт факела касается днища поршня, если он оказывается в один и тот же момент времени $\varphi_T^\Phi[i]$ с одной из изначально задаваемых точек профиля $\{m_x[i](\varphi_T[i]); m_y[i](\varphi_T[i])\}$

$$\varphi_T[j] \in (\varphi_T^\Phi[i] \cap \varphi_T^\Phi[j]), \quad (7)$$

где $\varphi_T[i]$ – моменты времени, в которые происходит касание фронта факела днища поршня.

Используя уравнение (4) определим массив вертикальных координат точки касания $\{x_T''; y_T''\}$ фронта факела и днища поршня

$$m_x[i](\varphi_T[i]) = R \times \left((1 - \cos\varphi_T[i]) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos 2\varphi_T[i]) \right) + m_{x0}[i]. \quad (8)$$

Используя уравнение (6) определим массив гори-

зональных координат точки касания $\{x_T''; y_T''\}$ фронта факела и днища поршня

$$m_x [i](\varphi_T [i]) = \text{tg} \chi \times$$

$$\times \left[R \cdot \left((1 - \cos(\varphi_T [i])) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2 \cdot (\varphi_T [i])) \right) + m_{x0} [i] \right] - \Delta'. \quad (9)$$

Текущая длина факела определяется как

$$\ell_{ON} = \sqrt{(m_x [i](\varphi_T [i]) - x_{0v}})^2 + (m_y [i](\varphi_T [i]) - y_{0v}})^2}. \quad (10)$$

При практическом использовании предлагаемого метода определения длины факела возникает необходимость в изначальном определении угла χ наклона траектории топливного факела к вертикали, а также в смещении Δ' точки впрыска топлива. Угол χ и смещение Δ' могут быть определены специально разработанным методом геометрического проецирования плоскости $\{x_3; y_3; z_3\}; \{x_1; y_1; z_1\}; \{x_{10}; y_{10}; z_{10}\}$ (рисунок 3), образованной пересекающимися осями форсунки и одного из ее сопел, на плоскость $\{x_3; y_3; z_3\}; \{x_7; y_7; z_7\}; \{x_{10}; y_{10}; z_{10}\}$, параллельную оси поршня и включающую в себя ось топливного факела – траекторию его движения в пространстве камеры сгорания. Использование данного метода обосновывается тем, что в конструкторской практике обычно задается угол по вертикали α в плоскости $\{x_3; y_3; z_3\}; \{x_1; y_1; z_1\}; \{x_{10}; y_{10}; z_{10}\}$, который в результате проецирования на плоскость $\{x_3; y_3; z_3\}; \{x_7; y_7; z_7\}; \{x_{10}; y_{10}; z_{10}\}$ изменяет свое значение. Кроме этого, на конструкторских чертежах камер сгорания величина Δ' задается как смещение носика распределителя относительно оси цилиндров или оси клапанов. В ходе последующих расчетов это смещение также необходимо проецировать на плоскость $\{x_3; y_3; z_3\}; \{x_7; y_7; z_7\}; \{x_{10}; y_{10}; z_{10}\}$, вследствие чего оно изменяет свое значение Δ' . Представленный ниже математический метод позволяет перевести значение угла по вертикали α для данного сопла, используемого для установления его пространственного направления в

обычной конструкторской практике с учетом угла наклона форсунки относительно оси поршня, в угол χ , определяющий в представленном методе направление траектории фронта факела в плоскости $x''oy''$.

Исходными данными в предлагаемом методе являются координаты точки $\{x_3; y_3; z_3\}$, определяющей пространственное положение точки выхода топлива из сопла форсунки и угол наклона форсунки γ к оси цилиндра. Центр O системы $\{x; y; z\}$ координат расположен в точке пересечения плоскости газового стыка с осью цилиндров. Направление осей указано на рисунке 3.

Искомый угол χ образуется пересечением прямых – траектории факела $\{x_3; y_3; z_3\}; \{x_{10}; y_{10}; z_{10}\}$ и направляющей $\{x_3; y_3; z_3\}; \{x_7; y_7; z_7\}$ к плоскости $\{x_1; y_1; z_1\}; \{x_8; y_8; z_8\}; \{x_4; y_4; z_4\}$, параллельной плоскости газового стыка. Установление искомого угла χ и искомого смещения становится возможным после установления канонических уравнений плоскости $\{x_1; y_1; z_1\}; \{x_8; y_8; z_8\}; \{x_4; y_4; z_4\}$ и прямой $\{x_3; y_3; z_3\}; \{x_{10}; y_{10}; z_{10}\}$.

Точка $\{x_1; y_1; z_1\}$ образуется на пересечении оси форсунки и оси цилиндра (вертикали). Координаты ее можно определить как

$$\begin{cases} x_1 = \frac{y_3}{\text{tg} \gamma} + x_3; \\ y_1 = 0; \\ z_1 = z_3. \end{cases} \quad (11)$$

Точка $\{x_2; y_2; z_2\}$ определяет в пространстве конец поворачиваемой оси форсунки до ее совпадения с осью координат X .

$$\begin{cases} x_2 = x_3 - y_3 \left(\frac{1 - \cos \gamma}{\sin \gamma} \right); \\ y_2 = 0; \\ z_2 = 0. \end{cases} \quad (12)$$

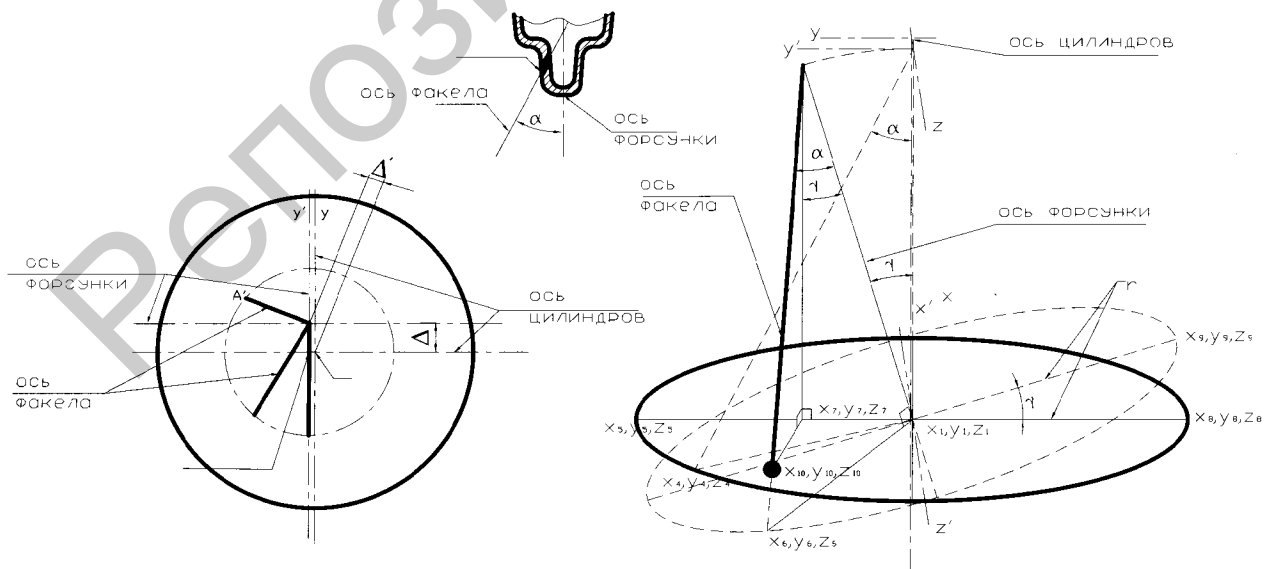


Рисунок 3 – Математический метод проецирования диаметральной плоскости $\{x_3; y_3; z_3\}; \{x_1; y_1; z_1\}; \{x_7; y_7; z_7\}$ на плоскость $\{x_3; y_3; z_3\}; \{x_7; y_7; z_7\}; \{x_{10}; y_{10}; z_{10}\}$

Повернем плоскость $\left[\{x_3, y_3, z_3\}, \{x_1, y_1, z_1\}, \{x_{10}, y_{10}, z_{10}\} \right]$ вокруг координатной оси Z на угол форсунки γ (размещение форсунки становится центральным несмещенным) по часовой стрелке. Ось форсунки при этом совместится с осью цилиндров, а траектория факела $\left[\{x_3, y_3, z_3\}; \{x_{10}, y_{10}, z_{10}\} \right]$ пересечет плоскость $\left[\{x_1, y_1, z_1\}; \{x_8, y_8, z_8\}; \{x_4, y_4, z_4\} \right]$, проходящую через точку $\{x_1, y_1, z_1\}$ и параллельную координатной плоскости газового стыка. Поворачиваемая секущая $\left[\{x_3, y_3, z_3\}; \{x_{10}, y_{10}, z_{10}\} \right]$ пересечет плоскость $\left[\{x_1, y_1, z_1\}; \{x_8, y_8, z_8\}; \{x_4, y_4, z_4\} \right]$ в некоторой точке $\{x_4, y_4, z_4\}$, координаты которой могут быть записаны в виде

$$\begin{cases} x_4 = x_1 + \left(\frac{y_3}{tg\gamma} \right) + x_3; \\ y_4 = r \cdot \cos\delta = (x_1 - x_2) \cdot tg\gamma \cdot \cos\delta; \\ z_2 = r \cdot \sin\delta = (x_1 - x_2) \cdot tg\gamma \cdot \sin\delta, \end{cases} \quad (13)$$

где δ – угол соплового отверстия в плане.

Координаты точки $\{x_6, y_6, z_6\}$, соответствующей точке $\{x_4, y_4, z_4\}$ при описанном выше повороте траектории факела, определяются как

$$\begin{cases} x_6 = x_4 \cdot \cos\gamma + y_4 \cdot \sin\gamma; \\ y_6 = -x_4 \cdot \sin\gamma + y_4 \cdot \cos\gamma; \\ z_6 = z_4. \end{cases} \quad (14)$$

Координатная матрица плоскости $\left[\{x_1, y_1, z_1\}; \{x_8, y_8, z_8\}; \{x_4, y_4, z_4\} \right]$ запишется в виде

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \\ x_8 - x_1 & y_8 - y_1 & z_8 - z_1 \end{vmatrix} = 0, \quad (15)$$

где $\{x_8, y_8, z_8\}$ – координаты буферной точки.

$$\begin{cases} x_8 = x_1; \\ y_8 = (x_1 - x_2) \cdot tg\alpha; \\ z_8 = z_1. \end{cases} \quad (16)$$

В соответствии с (15) каноническое уравнение плоскости $\left[\{x_1, y_1, z_1\}; \{x_8, y_8, z_8\}; \{x_4, y_4, z_4\} \right]$ запишется в виде системы

$$\begin{cases} Ax - yB + Cz + D = 0; \\ A = (y_4 - y_1) \cdot (z_8 - z_1) - (y_8 - y_1) \cdot (z_4 - z_1); \\ B = (x_4 - x_1) \cdot (z_8 - z_1) - (x_8 - x_1) \cdot (z_4 - z_1); \\ C = (x_4 - x_1) \cdot (y_8 - y_1) - (x_8 - x_1) \cdot (y_4 - y_1); \\ D = -x_1A + y_1B - z_1C. \end{cases} \quad (17)$$

Каноническое уравнение траектории факела в пространстве

$$\frac{x - x_6}{x_6 - x_3} = \frac{y - y_6}{y_6 - y_3} = \frac{z - z_6}{z_6 - z_3}. \quad (18)$$

Направляющие векторы траектории факела определяются как

$$\begin{cases} l = x_6 - x_3; \\ m = y_6 - y_3; \\ n = z_6 - z_3. \end{cases} \quad (19)$$

Координаты точки $\{x_{10}, y_{10}, z_{10}\}$ определяются как

$$\begin{cases} x_{10} = x_3 + lt; \\ y_{10} = y_3 + mt; \\ z_{10} = z_3 + nt; \\ t = -\frac{Ax_3 - By_3 + Cz_3 + D}{Al - Bm + Cn}, \end{cases} \quad (20)$$

где t – буферная переменная.

Искомый угол χ определяется в плоскости треугольника $\left[\{x_3, y_3, z_3\}, \{x_7, y_7, z_7\}, \{x_{10}, y_{10}, z_{10}\} \right]$, на которую проецируется исходная плоскость $\left[\{x_3, y_3, z_3\}, \{x_1, y_1, z_1\}, \{x_{10}, y_{10}, z_{10}\} \right]$ как

$$\chi = \arccos \frac{(x_1 - x_2) \cdot \cos\gamma}{\sqrt{(x_{10} - x_3)^2 + (y_{10} - y_3)^2 + (z_{10} - z_3)^2}}. \quad (21)$$

Искомое смещение Δ' определяется по формуле

$$\Delta' = OO'' = 2 \times \sqrt{\left(S_h - \left(\frac{Az_1 - B(y_1 + \Delta_{cc}) + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} + \frac{S_h}{2} \right) \right) \left(\frac{Az_1 - B(y_1 + \Delta_{cc}) + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} + \frac{S_h}{2} \right)}, \quad (22)$$

где Δ – смещение носика форсунки относительно оси цилиндра в диаметральной сечении поршня (рисунок 4); S_h – максимальная ширина камеры сгорания в диаметральной сечении поршня.

Используя приведенный метод проецирования плоскости $\left[\{x_3, y_3, z_3\}, \{x_1, y_1, z_1\}, \{x_{10}, y_{10}, z_{10}\} \right]$ на плоскость $\left[\{x_3, y_3, z_3\}, \{x_7, y_7, z_7\}, \{x_{10}, y_{10}, z_{10}\} \right]$ становится возможным рассчитать основные характеристики впрыска топлива (длина факела, момент касания его стенки камеры сгорания, продолжительность взаимодействия топлива со стенкой и в перспективе – распределение массовых долей объемного и пленочного смесеобразования) без применения усложненных и дорогостоящих 3D CAD моделей.

Таким образом, длина факела определяется по формуле (10), момент касания фронта факела стенок камеры сгорания может быть определен по (7)

$$\varphi_T [0] \in (\varphi_T^\Phi [i] \cap \varphi_T^D [i]). \quad (23)$$

Время взаимодействия факела со стенками топлива

$$\varphi_{\text{вз}} = \varphi_{\text{к.в}} - \varphi_T [0], \quad (24)$$

где $\varphi_{\text{к.в}}$ – момент полного испарения топлива, определяется по [6].

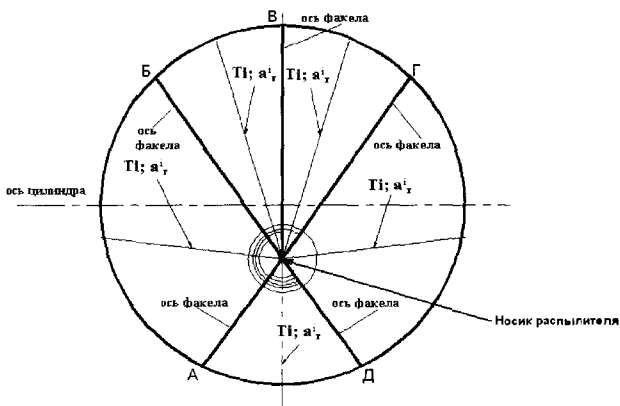


Рисунок 4 – Моделирование распределение температур по камере сгорания вблизи днища поршня

Определяемая по данному методу длина факела позволяет спрогнозировать вблизи его области взаимодействия с воздухом при многофакельном впрыске топлива распределение температур в камере сгорания и задания граничных условий на днище поршня (рисунок 4).

Рассчитанные по предложенному методу температуры и коэффициенты теплоотдачи от газов к днищу поршня задавались в виде конвективного граничного условия 3-го рода в камере сгорания. Камера сгорания разбивалась на пять зон, соответствующих 5 соплам, различных по температуре и коэффициенту теплоотдачи.

Расчет граничных условий на боковой и внутренней поверхности проводился следующим образом.

На боковой поверхности поршня, коэффициент теплоотдачи рассчитывался как суммарный

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_k, \quad (25)$$

где α_m — соответствует теплоотводу за счет теплопроводности масла; α_k — соответствует теплоотводу за счет конвекции.

Теплоотдача конвекцией считалась выше первого компрессионного кольца.

Величина α_m рассчитывалась по [7] как

$$\alpha_m = \frac{\lambda}{h}, \quad (26)$$

где h — величина зазора между боковой поверхностью поршня и стенкой зеркала цилиндра.

Зазор h рассчитывался как сумма монтажного зазора между поверхностями h_m и средняя шероховатость поверхности h_p .

Величина α_k рассчитывалась по формуле для теплоотдачи при обтекании пластины [8]

$$\alpha_k = 0,64 \cdot \sqrt[3]{Pr} \cdot \sqrt{\frac{U}{v \cdot l}}, \quad (27)$$

где $U = \frac{2Rn}{30}$ — средняя скорость поршня, м/с; n — частота вращения коленчатого вала, об/мин; l — длина участка поверхности, м.

Теплоотдача от внутренних поверхностей поршня осуществляется в масляной туман в картере и принималась равной 150–250 Вт/(град·м²) по [9].

Моделирование температурных полей поршня проводилось для стационарных процессов теплообмена. Граничные условия рассчитывались для установившегося режима работы двигателя. Так как, независимо от режима разгона, процесс аккумулирования тепла поршнем происходит плавно, без возникновения максимальных градиентов температур, максимум их достигается на установившемся режиме [10].

Расчет температурного состояния проводился для поршня без охлаждения и с принудительным охлаждением.

В качестве среды моделирования применялся программный комплекс ANSYS 11.0.

В результате компьютерного анализа были смоделированы температурные поля поршня при смещении центра распространения температурных зон (носика распылителя) на расстояние $\Delta = 8$ мм (рисунок 5, а) и без смещения с организацией циркуляционного охлаждения поршня (рисунок 5, б).

Из рисунка 5, а видно, что температурные поля поршня смещены от его оси вправо. Максимальное значение температуры находится в зоне БВ (рисунок 4). Соответственно эта часть поршня находится в более теплонпряженном состоянии. Предложенная методика позволяет учесть данное смещение температур. Одним из путей выравнивания температурного состояния поршня является организация принудительной подачи охлаждающего масла в головку поршня (рисунок 5, б).

По результатам моделирования видно, что циркуляционное охлаждение поршня снижает значение максимальных температур на 70–80°.

Таким образом, метод расчета длины факела позволяет более детально разделить поверхность днища поршня на зоны (более 5) по количеству сопел форсунки. Такая постановка и решение задачи, в сравнении с известной прикладной программой «Дизель-РК» (Россия) [4], обеспечивает большую точность задания граничных условий не только при определении выброса вредных веществ, но и расчете теплонпряженного состояния поршня.

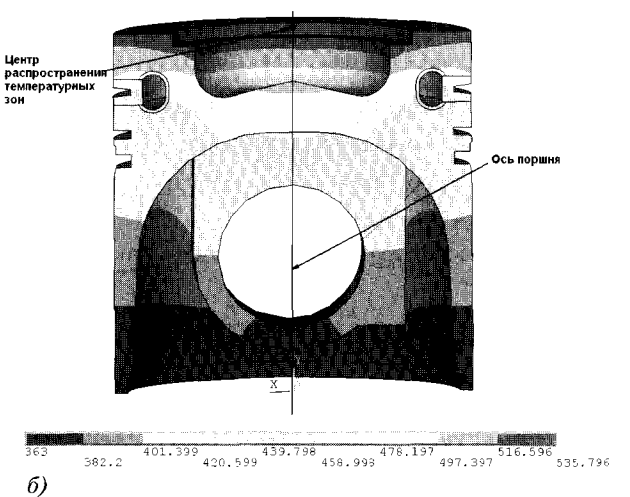
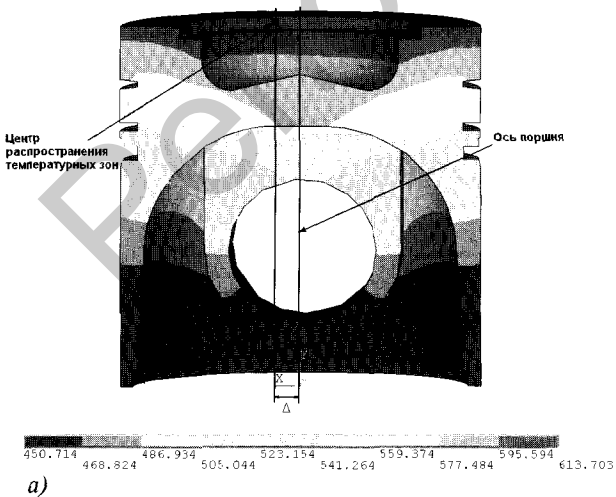


Рисунок 5 — Распределение температурного поля поршня при смещении центра распространения температурных зон на расстояние $\Delta = 8$ мм (а) и без смещения $\Delta = 0$ мм с циркуляционным охлаждением (б)

Список литературы

1. Verbrennungs steuerung durch Selbstzund und. Teil 1: Thermodynamische Grundlagen / C. Stan, Ph. Guibert // MTZ. — Vol. 65, № 1. — 2004. — pp. 632—641.
2. Метод расчета локальных концентраций оксидов азота в поршневых двигателях с внутренним смесеобразованием на основе многозонной модели / Н.А. Иващенко [и др.] // Вестн. МВТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. «Машиностроение». — 2004. — №1. — С. 43—59.
3. Петриченко, Р.М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания: учеб. пособие / Р.М. Петриченко. — Л.: Машиностроение. — 1983. — 244 с.
4. Кулешов, А.С. Расчет тепловыделения в дизеле с многоразовым впрыском / А.С. Кулешов // Двигатель-2007: сб. науч. тр. по материалам Междунар. конф., посвящ. 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 19—21 сент. 2007г.
5. Лышевский, А.С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками / А.С. Лышевский. — М.: Машгиз. — 1963. — 179 с.
6. Разлейцев, Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях / Н.Ф. Разлейцев. — Харьков: Вища школа. — 1980. — 169 с.
7. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / А.С. Орлин, М.Г. Круглов. — М.: Машиностроение, 1984. — С. 384.
8. Повх, И.Л. Техническая гидромеханика / И.Л. Повх. — Л.: Машиностроение, 1969. — С. 504.
9. Костин, А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов. — Л.: Машиностроение, 1979. — С. 222.
10. Вырубов, Д.Н. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин. — М.: Машиностроение, 1983. — С. 372.