

ДИНАМИКА РАСПЫЛЕННОЙ СТРУИ ДИЗЕЛЯ

А.В. Самарин¹, С.П. Кулманаков¹, С.В. Яковлев¹, П.К. Сеначин^{1,2}

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Приведена математическая модель динамики нестационарной распыленной топливной струи (РТС) дизеля, впрыснутой под давлением в камеру сгорания, которая описывает РТС как материальную точку переменной массы. Модель позволяет на основе численного моделирования оптимизировать динамические параметры РТС с характеристиками камеры сгорания дизеля.

Ключевые слова: численное моделирование, динамика распыленной струи, дизель.

THE DYNAMICS OF THE SPRAY OF DIESEL

A. V. Samarin, S. P. Kulmanakov, S. V. Yakovlev, P. K. Senachin

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul

Given a mathematical model of dynamics of non-stationary atomized fuel jet (RTS) diesel, is injected under pressure into the combustion chamber, which describes RTS as a material point of variable mass. Model allows on the basis of numerical modeling to optimize the dynamic parameters of RTS with the characteristics of the combustion chamber of a diesel engine.

Keywords: numerical simulation, dynamics of the spray jet, diesel.

Для обеспечения эффективной организации рабочего процесса дизеля необходимо обеспечить согласование параметров впрыснутой под давлением распыленной топливной струи (РТС) с характерными размерами камеры реактора. Для дизелей, работающих с системами впрыска высокого давления, имеющиеся в настоящее время эмпирические формулы, описывающие динамику нестационарной затопленной РС, дают недостаточную точность или практически непригодны [1]. Поэтому в данной работе предлагается упрощенная неэмпирическая **математическая модель** нестационарной РТС [2].

В этой модели, основанной на динамике материальной точки переменной массы, предполагается раздельное описание РТС до

момента отрыва от сопла форсунки ($t \leq \tau$) и после отрыва ($t > \tau$). Геометрически РТС представляется в виде усеченного конуса с неизменным углом раскрытия 2β . Вершина конуса располагается внутри соплового канала на глубине $h = (d_0/2)/\tan\beta$, а начало координат – на оси РТС на срезе сопла (рис. 1).

РТС, впрыснутая в рабочий объем, представляется **изотермическим телом переменной массы** - материальной точкой с текущей координатой Z (находящейся на оси факела), движущейся с переменной скоростью W в результате импульса I_f , получаемого с впрыснутым форсункой топливом.

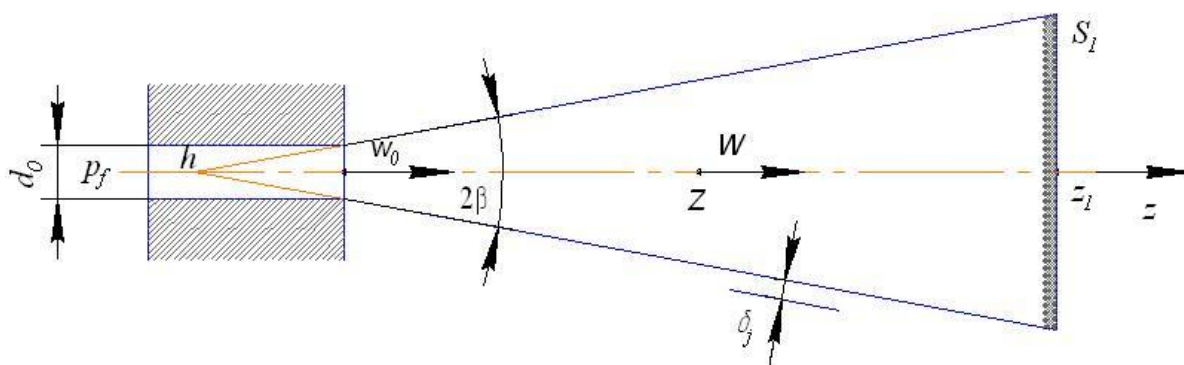


Рисунок 1 – Геометрическая модель нестационарной РТС дизеля

Система уравнений динамики РТС до момента окончания впрыска топлива ($t \leq \tau$) может быть получена следующим образом.

Объем V_f и масса жидкого топлива m_f в РТС, а также текущий импульс системы I_f (без учета трения) в моменты времени $t \leq \tau$ равны

$$V_f = S_0 w_0 t, \quad (1)$$

$$m_f = \rho_f V_f = \rho_f S_0 w_0 t, \quad (2)$$

$$I_f = m_f w_0 = \rho_f S_0 w_0^2 t. \quad (3)$$

где $S_0 = \pi d_0^2 / 4$ - сечение сопла; d_0 - диаметр сопла; ρ_f - плотность жидкого топлива; $w_0 = \sqrt{2(p_f - p) / \rho_f}$ - его скорость на выходе из сопла; p_f, p - давление в сопле и наружное давление в камере сгорания.

Известно, что масса каплей жидкого топлива распределяется по длине РТС неравномерно, причем плотность массы на фронте РТС при $z = z_1$ максимальна. Примем функцию распределения топлива вида

$$\left(\frac{dm_f}{dz} \right)_{t \leq \tau} = \rho_f S_0 \left[1 + (n+1) \left(\frac{z}{z_1} \right)^n \left(\frac{w_0 t}{z_1} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

где степенной параметр n предположительно заключен в пределах от 0,5 до 2,0. В соответствии с (2) эта функция нормирована, то есть

$$m_f = \int_0^{z_1} \left(\frac{dm_f}{dz} \right)_{t \leq \tau} dz = \rho_f S_0 w_0 t.$$

Координата центра масс Z и масса m_{PC} РТС определяются уравнением

$$m_{PC} Z = m_f Z_f + m_{air} Z_{air}, \quad (5)$$

$$m_{PC} = m_f + m_{air},$$

где Z_f, Z_{air} - координаты центра масс капель жидкого реагента и вовлеченного в движение воздуха соответственно.

Координата центра масс жидкого реагента Z_f определяется интегралом

$$m_f Z_f = \int_0^{z_1} \left(\frac{dm_f}{dz} \right)_{t \leq \tau} z dz,$$

тогда, с учетом (2) и (5), получим

$$Z_f = \frac{\rho_f S_0}{m_f} \int_0^{z_1} \left[1 + (n+1) \left(\frac{z}{z_1} \right)^n \left(\frac{w_0 t}{z_1} - 1 \right) \right] z dz = \quad (6)$$

$$\frac{z_1}{n+2} \left(n+1 - \frac{nz_1}{2w_0 t} \right).$$

Найдем координату центра масс вовлеченного в движение воздуха Z_{air} . Поскольку объем V_{PC} РТС определяется его геометрией, то объем V_{air} и масса m_{air} воздуха, с учетом (1) и (2), будут равны

$$V_{PC} = \frac{S_0 h}{3} \left[\left(1 + \frac{z_1}{h} \right)^3 - 1 \right] = S_0 z_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right), \quad (7)$$

$$V_{air} = V_{PC} - V_f, \quad m_{air} = \rho_{air} K_{air} V_{air},$$

где K_{air} - массовая доля вовлеченного в движение воздуха от всего воздуха в РТС.

Координата центра масс воздуха Z_{air} определяется интегралом

$$m_{air} Z_{air} = \int_0^{z_1} \left(\frac{dm_{air}}{dz} \right)_{t \leq \tau} z dz = \rho_{air} K_{air} \int_0^{z_1} \left[\left(\frac{dV_{PC}}{dz} \right) - \left(\frac{dV_f}{dz} \right)_{t \leq \tau} \right] z dz.$$

Здесь производная (dV_{PC}/dz) может быть найдена из (7). Откуда, с учетом (4), получим уравнение

$$Z_{air} = \frac{\rho_{air} K_{air} S_0 z_1^2}{m_{air}} \left[\frac{2z_1}{3h} + \frac{z_1^2}{4h^2} - \frac{n+1}{n+2} \left(\frac{w_0 t}{z_1} - 1 \right) \right]. \quad (8)$$

Теперь из (5)-(8) получим уравнение центра масс РТС

$$Z = \frac{z_1 \left[\frac{1}{2} + \frac{2z_1}{3h} + \frac{z_1^2}{4h^2} + (R_f - 1) \frac{n+1}{n+2} \left(\frac{w_0 t}{z_1} - \frac{n/2}{n+1} \right) \right]}{1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} + (R_f - 1) \frac{w_0 t}{z_1}}. \quad (9)$$

Полученное уравнение является трансцендентной функцией, из которой можно найти координату фронта z_1 при известной координате центра масс Z . Решение возможно методами дихотомии, что не очень удобно для численного моделирования. Поэтому представим (9) в форме производной вида

$$\frac{dz_1}{dt} = w_1, \quad w_1 = f_{t \leq \tau}(Z, W, z_1, t),$$

дифференцируя его по времени, предварительно записав в виде $Z = A/B$, то есть

$$WB = A' - ZB', \quad W = Z'.$$

В результате получим уравнение распространения РТС (скорости фронта струи)

$$w_1 = \frac{W \left[1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} + (R_f - 1) \frac{w_0 t}{z_1} \right] - w_0 (R_f - 1) \left(\frac{n+1}{n+2} - \frac{Z}{z_1} \right)}{\left(1 - \frac{Z}{z_1} \right) \left(1 + \frac{z_1}{h} \right)^2 + (R_f - 1) \frac{n+1}{n+2} \left(\frac{w_0 t}{z_1} - \frac{n}{n+1} \right)}. \quad (10)$$

Здесь $R_f = \rho_f / (K_{air} \rho_{air})$ - реальное отношение плотностей; W - скорость центра масс. Динамика РС как материальной точки переменной массы определяется производной текущего импульса (3), обусловленного поступлением реагирующего компонента из сопла форсунки (полагаем, что диссипация импульса отсутствует - струя затопленная)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(m_{PC} W) &= m_{PC} \frac{dW}{dt} + W \frac{dm_{PC}}{dt} = \\ \frac{d}{dt}(\rho_f S_0 w_0^2 t) &= \rho_f S_0 w_0^2, \\ \frac{dW}{dt} &= \frac{1}{m_{PC}} \left(\rho_f S_0 w_0^2 - W \frac{dm_{PC}}{dt} \right) \end{aligned}$$

Откуда, с учетом (2) и (7), имеем уравнение динамики (ускорения центра масс)

$$\frac{dW}{dt} = \frac{w_0 W \left[1 + R_f \left(\frac{w_0}{W} - 1 \right) - \frac{w_1}{w_0} \left(1 + \frac{z_1}{h} \right)^2 \right]}{(R_f - 1) w_0 t + z_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right)}. \quad (11)$$

Таким образом, до момента окончания впрыска жидкого топлива форсункой ($t \leq \tau$), математическая модель динамики РТС, кроме (10) и (11), включает уравнения:

- координаты центра масс

$$\frac{dZ}{dt} = W, \quad (12)$$

- координаты фронта струи

$$\frac{dz_1}{dt} = w_1, \quad (13)$$

Система уравнений после окончания впрыска топлива ($t > \tau$).

Объем V_f и масса m_f топлива, а также импульс I_f РТС в моменты времени $t > \tau$ равны

$$V_f = S_0 w_0 \tau, \quad (14)$$

$$m_f = \rho_f V_f = \rho_f S_0 w_0 \tau, \quad (15)$$

$$I_f = m_f w_0 = \rho_f S_0 w_0^2 \tau = \text{const}, \quad (16)$$

где τ - время впрыска топлива.

Текущий объем V_{PC} РТС определяется

геометрией

$$\begin{aligned} \frac{V_{PC}}{S_0} &= \frac{h}{3} \left[\left(1 + \frac{z_1}{h} \right)^3 - \left(1 + \frac{z_2}{h} \right)^3 \right] = \\ &= z_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left(1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right), \end{aligned} \quad (17)$$

где z_1, z_2 - координаты передней и задней границы РТС.

Объем V_{air} и масса m_{air} воздуха в РТС, с учетом (14) и (17), запишутся как

$$V_{air} = V_{PC} - V_f = V_{PC} - S_0 w_0 \tau,$$

$$m_{air} = \rho_{air} K_{air} V_{air},$$

где объем воздуха V_{air} равен

$$S_0 \left[z_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left(1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right) - w_0 \tau \right].$$

Масса РС, с учетом (15) запишется как

$$m_{PC} = m_f + m_{air} = \rho_f S_0 w_0 \tau + \quad (18)$$

$$\rho_{air} K_{air} S_0 \left[z_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left(1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right) - w_0 \tau \right].$$

Примем следующую функцию распределения массы топлива по длине РТС (19)

$$\left(\frac{dm_f}{dz} \right)_{t > \tau} = \rho_f S_0 \left[1 + (n+1) \left(\frac{z - z_2}{z_1 - z_2} \right)^n \left(\frac{w_0 \tau}{z_1 - z_2} - 1 \right) \right],$$

$$m_f = \int_{z_2}^{z_1} \left(\frac{dm_f}{dz} \right)_{t > \tau} dz = \rho_f S_0 w_0 \tau.$$

В безразмерных значениях длины

$$Y = \frac{z}{z_1} \equiv \frac{z - z_2}{z_1 - z_2} \text{ и параметра } \Phi = \frac{w_0 \tau}{z_1} \equiv \frac{w_0 \tau}{z_1 - z_2}$$

, функция распределения $\Psi(Y)$ массы топлива по длине РС (18) примет вид

$$\Psi(Y) = \frac{1}{m_f} \left(\frac{dm_f}{dY} \right) = \frac{1}{\Phi} + (n+1) Y^n \left(1 - \frac{1}{\Phi} \right). \quad (20)$$

На рис. 2 представлены графики функции (20) при варьировании параметров n и Φ согласно вариантам таблицы 1.

Таблица 1 – Варианты параметров функции распределения $\Psi(Y)$

Варианты	n	Φ
1	0,5	2
2	0,5	5
3	1	2
4	1	5
5	2	2
6	2	5

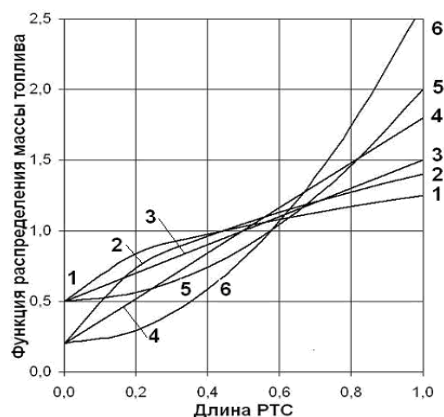


Рисунок 2 – Графики функции распределения $\Psi(Y)$ массы топлива по длине Y РС (обозначения вариантов приведены в табл. 1)

Анализ функции распределения (20) показывает (рис. 2):

1) $\Psi(Y)$ является монотонно возрастающей двухпараметрической нормированной на единицу функцией $\int_0^1 \Psi(Y) dY = 1$, определенной на отрезке $[0, 1]$;

2) на концах отрезка функция принимает значения $\Psi(0) = 1/\Phi$, $\Psi(1) = 1 + n(1 - 1/\Phi)$;

3) функция $\Psi(Y)$ на отрезке $[0, 1]$ при $n < 1$ является выпуклой, при $n > 1$ – вогнутой, а при $n = 1$ – линейной возрастающей;

4) при одинаковых значениях параметра n линии для любых значений параметра сжатия струи Φ пересекаются в одной точке на уровне значения функции равной 1;

5) вероятность реализации значения параметра $n < 1$ мала, реальное значение $n \geq 1$.

Координата центра масс топлива Z_f определяется интегралом

$$m_f Z_f = \int_{z_2}^{z_1} \left(\frac{dm_f}{dz} \right)_{t>\tau} z dz,$$

откуда, с учетом (15) и (18), имеем интеграл

$$Z_f = \frac{\rho_f S_0}{m_f} \int_{z_2}^{z_1} \left[1 + (n+1) \left(\frac{z - z_2}{z_1 - z_2} \right)^n \left(\frac{w_0 \tau}{z_1 - z_2} - 1 \right) \right] z dz$$

и его решение

$$Z_f = \frac{z_1^2 - z_2^2}{2w_0 \tau} + C_n \left(1 - \frac{z_1 - z_2}{w_0 \tau} \right), \quad (21)$$

где $C_n = C_1 = \frac{2z_1 + z_2}{3}$ при $n=1$, а при $n=2$

$$\text{имеем } C_n = C_2 = \frac{3z_1^2 + 8z_1 z_2 + 3z_2^2}{z_1 - z_2} + \frac{4z_1 z_2^2}{(z_1 - z_2)^2}.$$

Координата центра масс воздуха Z_{air} определяется из интегрального соотношения

$$m_{air} Z_{air} = \int_{z_2}^{z_1} \left(\frac{dm_{air}}{dz} \right)_{t>\tau} z dz,$$

$$m_{air} Z_{air} = \rho_{air} K_{air} \int_{z_2}^{z_1} \left[\left(\frac{dV_{PC}}{dz} \right) - \left(\frac{dV_f}{dz} \right)_{t>\tau} \right] z dz,$$

где производные объема РТС и объема впрыскиваемого реagenta равны

$$\left(\frac{dV_{PC}}{dz} \right) = S_0 \left(1 + \frac{z}{h} \right)^2,$$

$$\left(\frac{dV_f}{dz} \right)_{t>\tau} = \left(\frac{dm_f}{dz} \right)_{t>\tau} / \rho_f.$$

Тогда получим интеграл

$$m_{air} Z_{air} = \rho_{air} K_{air} S_0 \times$$

$$\int_{z_2}^{z_1} \left[\left(1 + \frac{z}{h} \right)^2 - \left(1 + (n+1) \left(\frac{z - z_2}{z_1 - z_2} \right)^n \left(\frac{w_0 \tau}{z_1 - z_2} - 1 \right) \right) \right] z dz,$$

решение которого для $n=1$ и $n=2$ соответственно запишется как

$$Z_{air} = \frac{\rho_{air} K_{air} S_0}{m_{air}} \left[\frac{2}{3h} (z_1^3 - z_2^3) + \frac{1}{4h^2} (z_1^4 - z_2^4) - C_1 (w_0 \tau - z_1 + z_2) \right], \quad (22)$$

$$Z_{air} = \frac{\rho_{air} K_{air} S_0}{m_{air}} \left[\frac{2}{3h} (z_1^3 - z_2^3) + \frac{1}{4h^2} (z_1^4 - z_2^4) - \frac{1}{4} \left(\frac{w_0 \tau}{z_1 - z_2} - 1 \right) (z_1^2 - 2z_1 z_2 - z_2^2) \right]. \quad (23)$$

На основании уравнения (5) и соотношений (15), (18) и (22) получим формулу для координаты Z центра масс РТС (при $n=1$)

$$Z = \frac{\left[z_1^2 \left(\frac{R_f}{2} + \frac{2z_1}{3h} + \frac{z_1^2}{4h^2} \right) - z_2^2 \left(\frac{R_f}{2} + \frac{2z_2}{3h} + \frac{z_2^2}{4h^2} \right) + \frac{R_f - 1}{3} \left(w_0 \tau (2z_1 + z_2) - \frac{(z_1 - z_2)^2}{2} \right) \right]}{z_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left(1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right) + (R_f - 1) w_0 \tau}. \quad (24)$$

Трансцендентное уравнение (24) целесообразно представить в форме производной

$$\frac{dz_1}{dt} = w_1, \quad w_1 = f_{t>\tau}(Z, W, w_2, z_1, z_2, t),$$

записав его в виде $Z = A/B$, то есть

$$WB = A' - ZB', \quad W = Z', \quad w_2 = z_2'.$$

В результате получим уравнение пространства РС (скорости фронта струи)

$$w_1 = \frac{D}{(z_1 - Z) \left(1 + \frac{z_1}{h} \right)^2 + \frac{R_f - 1}{3} (2w_0\tau - z_1 + z_2)}, \quad (25)$$

$$D = W \left[z_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left(1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right) \right] +$$

$$+ W(R_f - 1)w_0\tau - w_2 \left[(Z - z_2) \left(1 + \frac{z_2}{h} \right)^2 + \frac{R_f - 1}{3} (w_0\tau + z_1 - z_2) \right].$$

Динамика РТС как материальной точки переменной массы определяется производной текущего импульса

$$\frac{d}{dt}(m_{PC}W) = m_{PC} \frac{dW}{dt} + W \frac{dm_{PC}}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho_f S_0 w_0^2 \tau) = 0$$

откуда имеем уравнение (при отсутствии диссипации импульса - струя затопленная)

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{m_{PC}} \left(-W \frac{dm_{PC}}{dt} \right). \quad (26)$$

Однако следует иметь в виду, что вслед за РТС в рассматриваемый конус (рис. 1) втягивается шлейф окружающего воздуха,

который движется со скоростью порядка средней скорости РС. Тогда этот дополнительный воздух необходимо учесть в уравнении динамики центра масс РТС следующим образом

$$m_{PC}^* = m_f + m_{air}^* = \rho_f S_0 w_0 \tau + \rho_{air} K_{air} S_0 \left[z_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - w_0 \tau \right]. \quad (27)$$

Из уравнения (27) для производной массы РТС имеем

$$\frac{dm_{PC}}{dt} = \rho_{air} K_{air} S_0 w_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} \right)^2. \quad (28)$$

С учетом (27) и (28), из (26) получим уравнение динамики РТС (ускорения центра масс)

$$\frac{dW}{dt} = \frac{-W w_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} \right)^2}{(R_f - 1)w_0\tau + z_1 \left(1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right)}. \quad (29)$$

Таким образом, после момента окончания впрыска жидкого реагента форсункой ($t > \tau$), математическая модель процесса развития РТС дизеля, кроме (25) и (29), включает уравнения:

– координаты центра масс

$$\frac{dZ}{dt} = W, \quad (30)$$

– координаты фронта РТС

$$\frac{dz_1}{dt} = w_1, \quad (31)$$

– координаты задней границы

$$\frac{dz_2}{dt} = w_2, \quad (32)$$

– скорости задней границы

$$w_2 = W. \quad (33)$$

Предложенная математическая модель топливно-воздушной струи, описываемая уравнениями (10)-(13), до момента окончания впрыска жидкого реагента форсункой ($t \leq \tau$) и, описываемая уравнениями (25), (29)-(33), после момента окончания впрыска ($t > \tau$), решается путем численного интегрирования, например методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

В качестве иллюстрации на рисунках 3 и 4 приведены расчетные динамические характеристики РТС при впрыске топлива в среду с противодавлением – бомбу постоянного объема (БПО) при различных значениях параметров процесса.

На рисунке 5 приведена динамика скорости центра масс РС W и скорости фронта w_1 , из которого четко виден излом кривых скорости в момент окончания впрыска топлива. В целом, из рисунков 3-5 и результатов других численных расчетов следует, что предложенная математическая модель адекватно реагирует на различные параметры процесса.

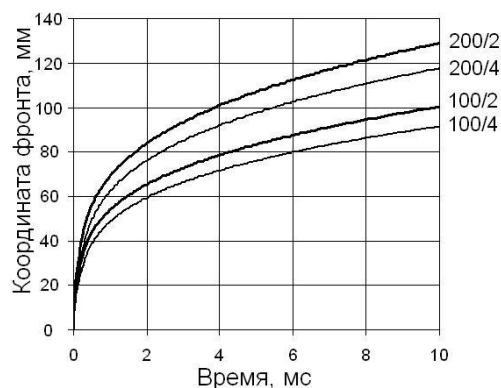


Рисунок 3 – Динамика координаты фронта РТС при давлении впрыска 100 и 200 МПа и противодавлении 2 и 4 МПа.

Условная начальная скорость РС и время впрыска:

485 м/с и 0,341мс (давление 100/2 МПа);
480 м/с и 0,345 мс (давление 100/4 МПа);
690 м/с и 0,242 мс (давление 200/2 МПа);
687 м/с и 0,244 мс (давление 200/4 МПа)

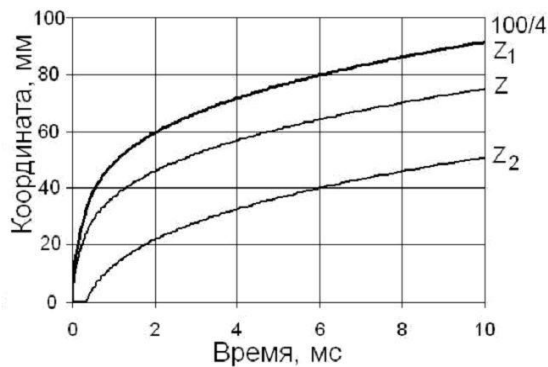


Рисунок 4 – Динамика РТС при давлении впрыска 100 МПа и противодавлении 4 МПа: Z_1 – координата фронта РС; Z – координата центра масс РС; Z_2 – координата задней границы РС. Время впрыска 0,345 мс. Цикловая подача 10 мг/сопло. Диаметр сопла 0,3 мм

Описанная в данной работе математическая модель нестационарной РТС как материальной точки переменной массы предназначена для численного моделирования динамики впрыска и предназначена для описания РТС до момента реального реагирования смеси в объеме реактора. Она является существенным уточнением ранее предложенной модели [2-5].

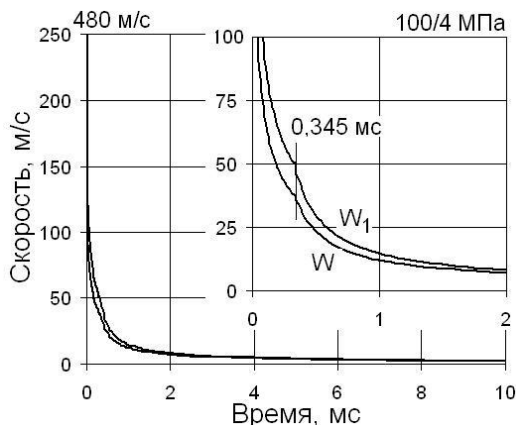


Рисунок 5 – Динамика скорости центра масс W и скорости фронта w_1 РТС при давлении впрыска 100 МПа и противодавлении 4 МПа. Время впрыска 0,345 мс.

Список литературы

1. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов / Р.З. Кавтарадзе.- М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 720 с.
2. Самарин, А.В. Моделирование динамики нестационарной распыленной струи в ограниченном объеме / А.В. Самарин, С.А. Ульрих, С.В. Яковлев, П.К. Сеначин // Ползуновский вестник. – 2016. - № 4. Т. 2. – С. 143-148.

2. Сеначин, П.К. Моделирование геометрических и динамических параметров топливной струи при впрыске в камеру сгорания дизеля на основе эксперимента в бомбе / П.К. Сеначин, С.А. Ульрих, В.В. Чертищев // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 12(115). Сер. Процессы преобразования энергии и энергетические установки. Вып. 5. – ВолгоГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 64-67.

3. Якименко, П.А. Моделирование параметров топливно-воздушной струи дизеля / П.А. Якименко, С.А. Ульрих, П.К. Сеначин // Горизонты образования: электронный научно-образовательный журнал АлтГТУ / 11-я Всероссийская научно-техническая конференция «Наука и молодежь-2014». – Барнаул, 2014.– С. 43-47. - Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2014.pdf.

4. Якименко, П.А. Совершенствование рабочего процесса дизеля с топливной аппаратурой COMMON RAIL оптимизацией топливной струи / П.А. Якименко, С.А. Ульрих, П.К. Сеначин // Горизонты образования: электронный научно-образовательный журнал АлтГТУ / 12-я Всероссийская научно-техническая конференция ... «Наука и молодежь-2015». – Барнаул, 2015.– Вып. 17. – (4 с.). – Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2015.pdf.

5. Самарин, А.В. Разработка математической модели динамики топливной струи дизеля как материальной точки переменной массы / А.В. Самарин, Д.А. Морозов, С.В. Горбанев, С.А. Ульрих, С.В. Яковлев, П.К. Сеначин // Горизонты образования: электронный научно-образовательный журнал АлтГТУ / 13-я Всероссийская научно-техническая конференция ... «Наука и молодежь-2016». – Барнаул, 2016.– Вып. 18. (7 с.).– Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2016.pdf

6. Рудаков, В.Ю. Особенности развития топливной струи при двухфазном впрыске / В.Ю. Рудаков // Двигателестроение. – 2011. - № 1(243). – С. 9-11.

7. Крупский, М.Г. Расчет геометрических параметров струи топлива при впрыске в камеру сгорания дизеля / М.Г. Крупский, В.Ю. Рудаков // Двигателестроение. – 2008. - № 1(231). – С. 24-25.

Самарин А.В., аспирант кафедры ДВС¹,
Кулманаков С.П., к.т.н., доцент каф. ДВС¹,
Яковлев С.В., к.т.н., доцент кафедры ДВС¹,
Сеначин П.К., д.т.н., профессор кафедры ДВС¹,
 ведущий научный сотрудник², e-mail: senachinpk@mail.ru

¹ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул,

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск