

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ РАСПЫЛЕННОЙ СТРУИ В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ

А.В. Самарин<sup>1</sup>, С.А.Ульрих<sup>2</sup>, С.В. Яковлев<sup>1</sup>, П.К. Сеначин<sup>1,3</sup>

Приведена простая математическая модель динамики нестационарной распыленной струи (РС), впрыснутой под давлением в химический реактор или рабочий объем энергетического агрегата, которая описывает РС как материальную точку переменной массы. Модель позволяет на основе численного моделирования оптимизировать динамические параметры РС с характерными размерами камеры реактора.

Ключевые слова: численное моделирование, динамика нестационарной распыленной струи, химический реактор, энергетический агрегат.

Для обеспечения эффективной организации рабочего процесса химического реактора или циклического энергетического агрегата необходимо обеспечить согласование параметров впрыснутой под давлением распыленной струи (РС) расходуемого реагента (или горючего вещества) с характерными размерами камеры реактора. Для реакторов, 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 пред-

лагается упрощенная неэмпирическая **математическая модель** нестационарной РС.

В этой модели, основанной на динамике материальной точки переменной массы, предполагается раздельное описание РС до момента отрыва от сопла форсунки ( $t \leq \tau$ ) и после отрыва ( $t > \tau$ ). Геометрически РС представляется в виде усеченного конуса с неизменным углом раскрытия  $2\beta$ . Вершина конуса располагается внутри соплового канала на глубине  $h = (d_0/2)/\text{tg}\beta$ , а начало координат – на оси РС на срезе сопла (рис. 1).

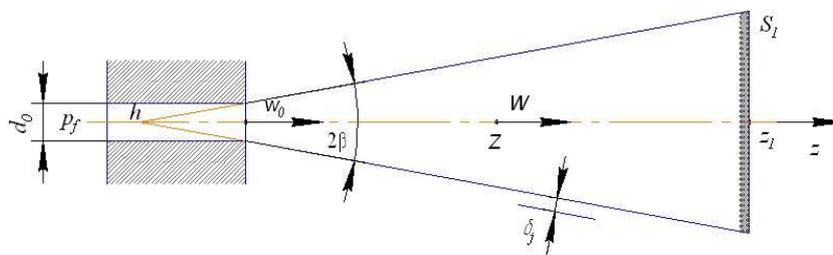


Рисунок 1 – Геометрическая модель нестационарной распыленной струи

РС, 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.

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

Объем  $V_f$  и масса жидкого реагента  $m_f$  в РС, 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;  $\rho_f$  - плотность жидкого реагента;

$w_0 = \sqrt{2(p_f - p)/\rho_f}$  - его скорость на выходе из сопла;  $p_f, p$  - давление в сопле и наружное давление в камере сгорания.

Известно, что масса капель жидкого реагента распределяется по длине РС неравномерно, причем плотность массы на фронте РС при  $z = z_1$  максимальна. Примем функцию распределения 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  $m_{PC}$  РС 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

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

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

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

В результате получим уравнение распространения РС (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

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

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

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

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 РС

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

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

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

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ РАСПЫЛЕННОЙ  
СТРУИ В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ**

$$\frac{d}{dt}(m_{PC}W) = m_{PC} \frac{dW}{dt} + W \frac{dm_{PC}}{dt} =$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_f S_0 w_0^2 t) = \rho_f S_0 w_0^2$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{m_{PC}} \left( \rho_f S_0 w_0^2 - W \frac{dm_{PC}}{dt} \right)$$

(при этом полагаем, что диссипация импульса отсутствует, поскольку струя затопленная).

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 РС, 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  $I_f$  РС 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  $\tau$  - время впрыска топлива.

Текущий объем  $V_{PC}$  РС определяется геометрией

$$\frac{V_{PC}}{S_0} = \frac{h}{3} \left[ \left( 1 + \frac{z_1}{h} \right)^3 - \left( 1 + \frac{z_2}{h} \right)^3 \right] =$$

$$z_1 \left( 1 + \frac{z_1}{h} + \frac{z_1^2}{3h^2} \right) - z_2 \left( 1 + \frac{z_2}{h} + \frac{z_2^2}{3h^2} \right), \quad (17)$$

где  $z_1, z_2$  - координаты передней и задней границы РС.

Объем  $V_{air}$  и масса  $m_{air}$  воздуха в РС, 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 РС (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

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

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 рисунке 2 представлены графики функции (20) при варьировании параметров  $n$  и  $\Phi$  согласно вариантам таблицы 1.

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

Варианты	$n$	$\Phi$
1	0,5	2
2	0,5	5
3	1	2
4	1	5
5	2	2
6	2	5

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  $\Phi$  пересекаются в одной точке на уровне значения функции равной 1;

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

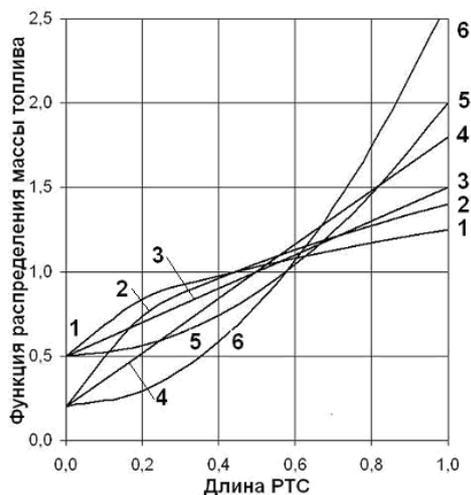


Рисунок 2 – Графики функции распределения  $\Psi(Y)$  массы топлива по длине УРС (обозначения вариантов приведены в табл. 1)

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 РС и объема впрыскиваемого регента 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 РС (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 распространения 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 РС как материальной точки переменной массы определяется производной текущего импульса

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ РАСПЫЛЕННОЙ СТРУИ В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ

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

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 РС 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 РС 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 РС имеем

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

С учетом (27) и (28), из (26) получим уравнение динамики РС (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 РС

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

– 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 РС при впрыске топлива в среду с противодавлением – бомбу постоянного объема (БПО) при различных значениях параметров процесса.

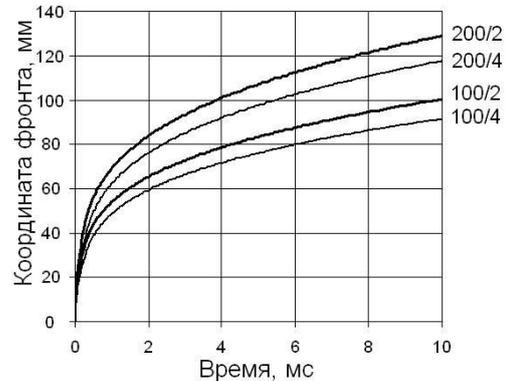


Рисунок 3 – Динамика координаты фронта РС при давлении впрыска 100 и 200 МПа и противодавлении 2 и 4 МПа.

Условная начальная скорость РС и время впрыска: 485 м/с и 0,341 мс (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).

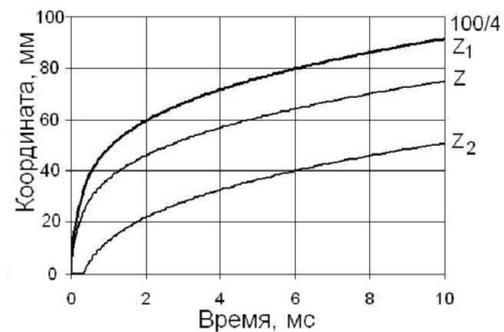


Рисунок 4 – Динамика РС при давлении впрыска 100 МПа и противодавлении 4 МПа: z<sub>1</sub> – координата фронта РС; Z – координата центра масс РС; z<sub>2</sub> – координата задней границы РС. Время впрыска 0,345 мс. Цикловая подача 10 мг/сопло. Диаметр сопла 0,3 мм

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.

Описанная в данной работе математическая модель нестационарной РС как материальной точки переменной массы предназначена для численного моделирования ди-

намики впрыска и предназначена для описания РС до момента реального реагирования смеси в объеме реактора. Она является существенным уточнением ранее предложенной модели [2-5].

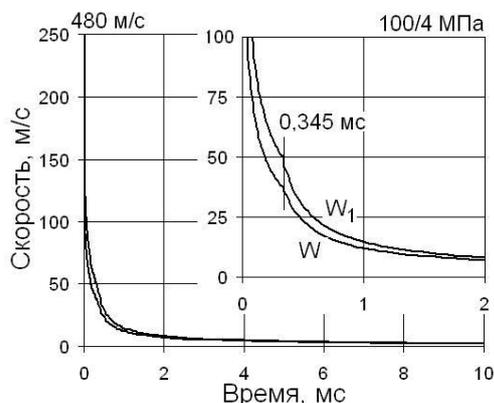


Рисунок 5 – Динамика скорости центра масс  $W$  и скорости фронта  $w_1$  РС при давлении впрыска 100 МПа и противодавлении 4 МПа. Время впрыска 0,345 мс.

#### 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. 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. –ВолгГТУ. – 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](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](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](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 Александр Викторович**, аспирант кафедры ДВС<sup>1</sup>,

**Ульрих Сергей Александрович**, к.т.н., доц., доцент<sup>2</sup>,

**Яковлев Сергей Валентинович**, к.т.н., доцент кафедры ДВС<sup>1</sup>,

**Сеначин Павел Кондратьевич**, д.т.н., проф., профессор кафедры ДВС<sup>1</sup>, ведущий научный сотрудник<sup>3</sup>, e-mail: [senachinpk@mail.ru](mailto:senachinpk@mail.ru)

<sup>1</sup>Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул,

<sup>2</sup>Барнаульский юридический институт МВД России, Барнаул,

<sup>3</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск