

МЕТОД РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ ДЛЯ ОТКРЫТЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В.Ю. Рудаков

В статье предложен метод расчета определения дальности и угла конуса топливной струи в процессе ее развития для открытых камер сгорания среднеоборотных дизелей. Метод синтезирует турбулентную и зонную модели, что позволяет учитывать импульсный характер впрыска, действие фронта давления и питание струи распыленным топливом. Изложена последовательность проведения расчетов по критериальным уравнениям Лышевского. Приведены результаты расчета и сопоставлены с результатами эксперимента.

Ключевые слова: зонная модель, турбулентная модель, уравнение Мещерского, осциллограмма давления впрыска, критериальные уравнения.

Введение

Ужесточение норм на состав выхлопных газов вынуждает специалистов обращать более пристальное внимание на смесеобразование и протекание рабочих процессов в дизелях. Одним из средств управления этими процессами является организация топливоподачи, что предполагает расчет геометрических параметров струи распыленного топлива (СРТ) как на стадии проектирования дизеля, так и при его доводке и испытаниях.

Среди известных методов расчета геометрических параметров СРТ в практике дизелестроения наиболее широкое применение нашел метод на основе турбулентной модели, предложенный А.С. Лышевским [1]. Однако расчетные формулы этого метода даются на основе обработки экспериментальных данных, полученных при стационарном истечении топлива из открытой форсунки, в силу чего не учитывается импульсный характер впрыска, крутизна фронта давления и питание струи распыленным топливом.

С позиций физических процессов, протекающих при впрыске топлива, наиболее совершенным является метод Свиридова, в основу которого положены зонная модель и уравнение Мещерского для движения тела переменной массы [2]. Действительно, в процессе впрыска масса топлива, подаваемого в камеру сгорания, растет, и применение уравнения Мещерского позволяет учесть факторы, которые в методе Лышевского не рассматриваются. Вместе с тем в методе Свиридова не принимается во внимание

то обстоятельство, что топливная струя является двухфазным потоком [3], в силу чего не всегда верно можно оценить силу аэродинамического сопротивления движению струи, что является причиной значительных отклонений рассчитанной траектории движения СРТ от экспериментальной. Кроме того, метод Свиридова не позволяет определять угол конуса СРТ.

В данной работе представлен метод, синтезирующий турбулентную [1] и зонную [2] модели и не имеющий указанных недостатков [4, 5]. От аналогичных методов его отличает применение уравнения Мещерского для турбулентной модели и интегрирование диаграммы давления впрыска, что позволяет учесть действие переднего фронта давления и питание СРТ распыленным топливом.

Целью данной работы является краткое обоснование предлагаемого метода наряду с особенностями практического проведения расчетов.

Применение уравнения движения тела переменной массы для турбулентной топливной струи

В разработанном методе, так же как и в методе Свиридова, в основу расчета положено уравнение Мещерского

$$m \frac{dU_{\phi}}{dt} + (U_{\kappa} - U_{\phi}) \frac{dm}{dt} = R, \quad (1)$$

где m – масса топлива; U_{ϕ} – скорость вершины струи; U_{κ} – скорость элементарной массы; t – время, в течение которого развивается данный

процесс; R – сила аэродинамического сопротивления движению топливной струи.

Наряду с этим сохранено представление о струе как о турбулентном потоке, принятое в работе [1].

Применительно к топливным струям в уравнении (1) первое слагаемое в левой части относится к впрыснутой массе топлива, а второе – к присоединяемой к ней элементарной массе.

Согласно А.С. Лышевскому перемещение S_ϕ топливной струи происходит в соответствии с выражением [1]

$$S_\phi = \sqrt{\frac{U_\phi t d_c}{a_n \sqrt{2}}}; \quad (2)$$

$$a_n = A_1 We^h \rho^k M^{n_1}; \quad We = U_n^2 \rho_T d_c / \sigma_T;$$

$$M = \mu_T^2 / \rho_T d_c \sigma_T; \quad \rho = \rho_b / \rho_T.$$

Здесь d_c – диаметр распыливающего отверстия; a_n – коэффициент свободной турбулентности; We – число Вебера; M – критерий распыливания; σ_T – коэффициент поверхностного натяжения топлива; ρ_T – плотность топлива; ρ_b – плотность воздуха; ρ – симплекс плотности; μ_T – коэффициент динамической вязкости топлива; A_1 – коэффициент; h, k, n_1 – показатели степени, определяемые на основе экспериментальных данных.

Примем, что с помощью выражения (2) можно определять перемещение впрыснутой массы топлива.

При реальном впрыске количество движения струи, вытекающей из соплового отверстия в течение интервала времени t_p , с учетом меняющейся скорости истечения будет определяться согласно выражению [6]

$$I_0 = 5 \cdot 10^5 \mu_c^2 \pi d_c^2 \int_0^{t_p} p_{впр} dt, \quad (3)$$

где t_p – длительность впрыска, в течение которого давление растет от 0 до $p_{впр}$, а вершина струи перемещается на расстояние S_ϕ ; μ_c – коэффициент расхода сопла; $p_{впр}$ – перепад давлений впрыска.

Из выражения (3) следует, что скорость топлива, входящую в (2), надо определять с помощью среднеинтегрального давления впрыска:

$$p_n = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} p_{впр} dt. \quad (4)$$

Диаграмма $p_{впр} = f(t)$ приведена на рис. 1. Критерий Вебера, входящий в выражение для a_n , также следует определять через скорость топлива, рассчитанную с помощью величины p_n .

Для расчета скорости топлива воспользуемся выражением [1]

$$U_n = 1000 \mu_c \sqrt{\frac{2 p_n}{\rho_m}}, \quad (5)$$

где p_n – перепад давлений топлива перед распыливающими отверстиями.

В связи с тем, что выражение (3) позволяет более точно определять количество движения впрыснутой массы, включая фронт давления, появляется необходимость коррекции полученных А.С. Лышевским выражений, входящих в выражение (2).

Движение элементарной массы А.С. Лышевский не рассматривал. Однако, принимая во внимание, что масса dm движется в спутном потоке воздуха, в силу чего средняя скорость ее движения заметно превышает скорость движения вершины струи, и, полагая, что ее перемещение происходит аналогично начальному участку струи, можно для определения перемещения элементарной массы применить выражение для начального участка СРТ [1]:

$$\frac{S_k}{d_c} = A_2 We^{l_2} M^{n_2} \rho^{k_2} \Theta^{s_2}; \quad (6)$$

$$\Theta = t_k^2 \sigma_T / \rho_T d_c,$$

где S_k – перемещение элементарной массы; Θ – критерий нестационарности; t_k – время движения элементарной массы до вершины струи; A_2 – коэффициент; l_2, n_2, k_2, s_2 – показатели степени, определяемые на основе экспериментальных данных.

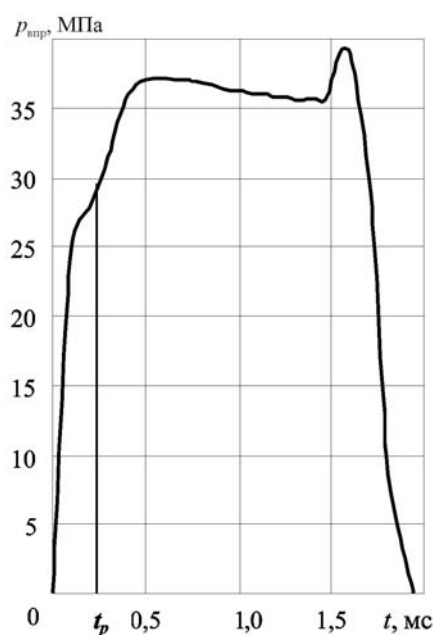


Рис. 1. Диаграмма $p_{впр}$ при $p_{ак} = 58,86$ МПа

Принимая, что элементарная масса проходит расстояние, равное длине струи, задачу о перемещении СРТ можно решить исходя из равенства

$$S_{\phi} = S_k$$

или

$$\sqrt{\frac{U_{\phi} t d_c}{a_n \sqrt{2}}} = d_c A_2 \text{We}^{1/2} M^{n_2} \rho^{k_2} \Theta^{s_2}.$$

Для элементарной массы количество движения составит

$$dI = 5 \cdot 10^5 \pi d_c^2 \mu_c^2 p_{\text{впр}} dt.$$

Как показывают эксперименты, уместно принимать в расчет среднюю скорость движения микроэлементов струи [7]. Тогда время движения элементарной массы от соплового отверстия до вершины струи со средней скоростью $V_{\text{ср}}$ составит:

$$t_k = S/V_{\text{ср}},$$

а полное время движения струи от начала впрыска на дистанцию S :

$$t_s = t_p + t_k.$$

Определить значения t_k и показателей степени, входящих в выражения (2) и (6), используя аналитические методы, по всей вероятности можно, но при этом неизбежны ошибки, вызванные допущениями, не адекватными протекающим физическим процессам. В связи с этим предпочтительнее и рациональнее определять их с помощью экспериментальных методов.

Экспериментальные исследования и их результаты

Эксперименты проводились в условиях «холодной бомбы» на установке «двигатель с прозрачными окнами» (ДПО) [8, 9], способной работать в режимах дизеля и бомбы. Конструктивная особенность установки позволяет отсоединять шток поршня от крейцкопфа и герметизировать камеру сгорания, фиксируя поршень в заданном положении. В камеру подается сжатый воздух из баллона. Впрыск топлива производится аккумуляторной электрогидравлической системой топливоподачи. Форсунка оснащена тензодатчиком давления впрыска, расположенным в пазу соплового наконечника и позволяющим регистрировать осциллограмму в момент киносъемки. Установка оснащена шпирентеновой оптической системой и скоростной кинокамерой СКС1М. Скорость киносъемки до 4910 кадров/с при штатной скорости 4000 кадров/с.

Изучалось воздействие давления впрыска, плотности воздушного заряда и диаметра распыливающих отверстий на движение топливной струи.

Давление топлива контролировалось по показаниям манометра, установленного на аккумуляторе высокого давления. Давление впрыска измерялось по осциллограммам. Задавались следующие значения давления топлива в аккумуляторе: $p_{\text{ак}} = 19,62; 29,43; 39,24; 49,05; 58,86$ МПа. Соответствующие значения давления впрыска, измеренные по максимуму осциллограммы: 8,8; 14,4; 23,6; 30,5; 37,9 МПа. Диаметр распыливающего отверстия 0,4 мм, плотность воздушного заряда 29 кг/м³.

При изучении влияния плотности воздушного заряда выдерживалось давление впрыска 14,4 МПа при таком же диаметре распыливающего отверстия. Плотность воздуха задавалась: 16; 22; 25,5; 29; 35 кг/м³.

Влияние диаметра распыливающих отверстий изучалось на сопловых наконечниках с $d_c = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ мм при $p_{\text{впр}} = 14,4$ МПа; $\rho_v = 29$ кг/м³.

Во всех случаях менялась длительность впрыска, что позволило установить взаимосвязь величин t_p и S_{ϕ} . Для всех кинограмм определялись зависимости дальности $S_{\phi} = f(t)$, одна из которых приведена на рис. 2, и по ним выявлялись значения t_p и t_k . На этом же рисунке показана функция $S_{\phi} = f(t_p)$.

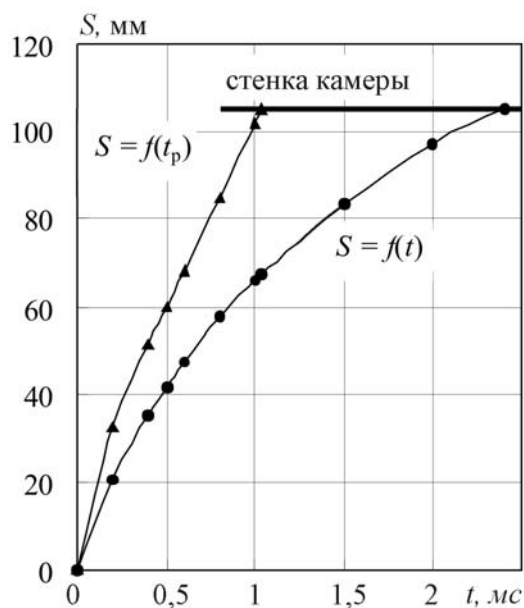


Рис. 2. Зависимости перемещения струи при $p_{\text{ак}} = 58,86$ МПа

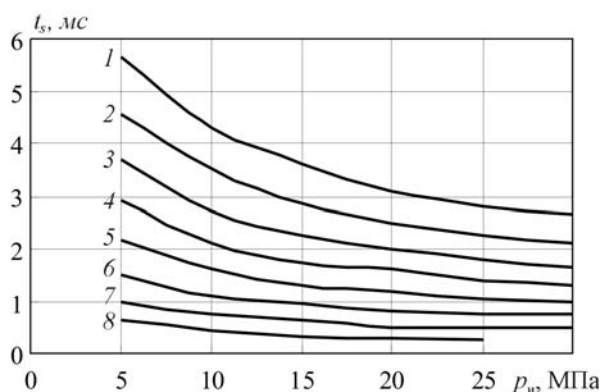


Рис. 3. Влияние $p_{и}$ на время движения струи при $\rho_b = 29 \text{ кг/м}^3$; $d_c = 0,4 \text{ мм}$ для следующих перемещений: 1 – 105 мм; 2 – 95 мм; 3 – 85 мм; 4 – 75 мм; 5 – 65 мм; 6 – 55 мм; 7 – 45 мм; 8 – 35 мм

По осциллограммам давления определялись среднеинтегральные давления впрыска. Влияние среднеинтегрального давления на время движения СРТ до фиксированных значений S_{ϕ} приведено на рис. 3.

Аналогично определялось влияние плотности воздушного заряда и диаметра распыливающих отверстий на движение СРТ (рис. 4 и 5 соответственно).

На основе результатов обработки экспериментальных данных было откорректировано выражение для коэффициента свободной турбулентности [1]:

$$a_{и} = 0,553 \text{We}^{0,07246} M^{0,2067} \rho^{0,917}, \quad (7)$$

где число Вебера определяется с помощью значений $p_{и}$.

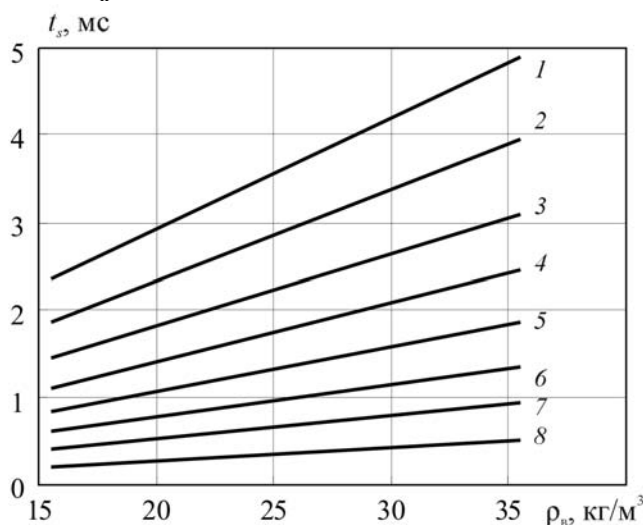


Рис. 4. Влияние ρ_b на время движения струи при $d_c = 0,4 \text{ мм}$; $U_c = 129,36 \text{ м/с}$ для следующих перемещений: 1 – 105 мм; 2 – 95 мм; 3 – 85 мм; 4 – 75 мм; 5 – 65 мм; 6 – 55 мм; 7 – 45 мм; 8 – 35 мм

Для коррекции зависимости (6) применялись полученные значения t_k . Из зависимости $t_k = f(p_{впр})$ выводилась взаимосвязь $t_k = f(U_c)$, представленная на рис. 6, где U_c – скорость истечения топлива. Влияние плотности воздуха и диаметра распыливающих отверстий на перемещение элементарной массы показано на рис. 7 и 8 соответственно. С помощью полученных зависимостей, было откорректировано выражение (6):

$$\frac{S_k}{d_c} = 41,807 \frac{\text{We}^{0,161} \rho^{0,2105} M^{0,175}}{\rho^{0,291}}. \quad (8)$$

Для выяснения различий движения СРТ в бомбе и дизельном процессе ДПО переводился в режим дизеля. Полученные при этом кинограммы показали, что в условиях реального дизельного процесса дальнобойность струи не меняется, но угол конуса СРТ под действием температуры воздушного заряда и воспламенившегося топлива увеличивается в 1,5–2 раза [10], поэтому выражение для определения угла конуса α СРТ [1] адаптировалось для дизельного процесса:

$$\text{tg} \frac{\alpha}{2} = A_3 \frac{\text{We}^{l_3} \rho^{k_3}}{M^{n_3}}. \quad (9)$$

В выражении (9) значения A_3 , l_3 , k_3 , n_3 определяются по полученным зависимостям, сведенным в таблицу. Эти зависимости справедливы для интервала времени 0,2–3 мс, в течение которого увеличивается угол конуса [11]. По сравнению с данными А.С. Лышевского полученные в ходе экспериментов изменения

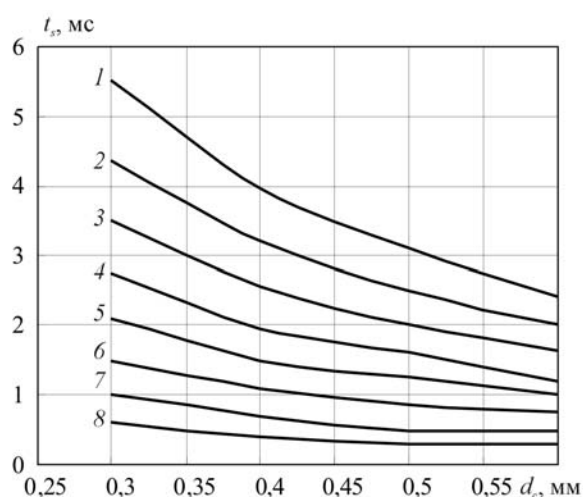


Рис. 5. Влияние d_c на время движения струи при $\rho_b = 29 \text{ кг/м}^3$; $U_c = 129,36 \text{ м/с}$ для следующих перемещений: 1 – 105 мм; 2 – 95 мм; 3 – 85 мм; 4 – 75 мм; 5 – 65 мм; 6 – 55 мм; 7 – 45 мм; 8 – 35 мм

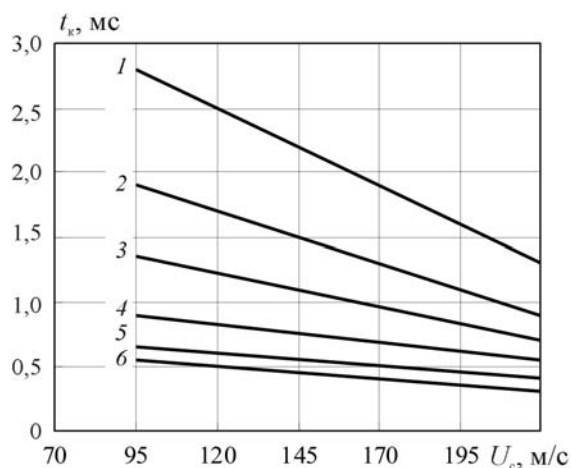


Рис. 6. Влияние скорости топлива U_c на время движения элементарной массы топлива при $\rho_b = 29 \text{ кг/м}^3$; $d_c = 0,4 \text{ мм}$ для следующих перемещений: 1 – 105 мм; 2 – 95 мм; 3 – 85 мм; 4 – 75 мм; 5 – 65 мм; 6 – 55 мм

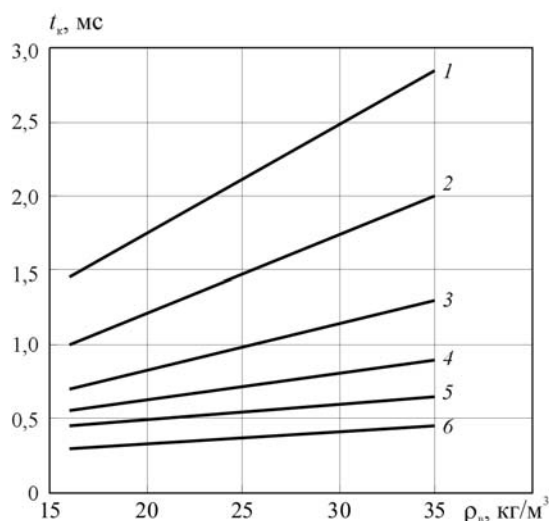


Рис. 7. Влияние плотности воздуха ρ_b на время движения элементарной массы топлива при $d_c = 0,4 \text{ мм}$, $U_c = 136,6 \text{ м/с}$ для следующих перемещений: 1 – 105 мм; 2 – 95 мм; 3 – 85 мм; 4 – 75 мм; 5 – 65 мм; 6 – 55 мм

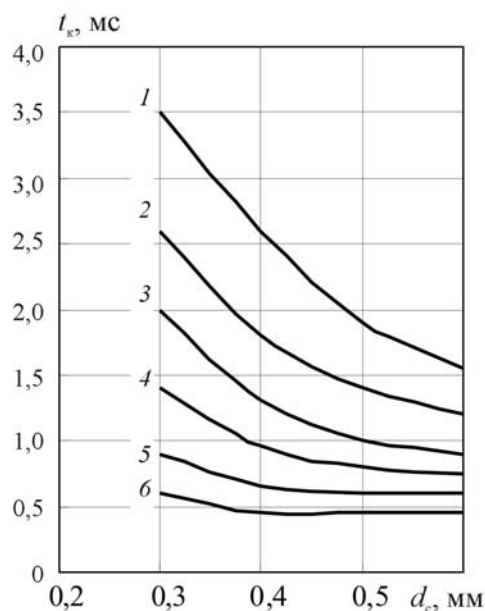


Рис. 8. Влияние диаметра распыливающих отверстий d_c на время движения элементарной массы топлива при $\rho_b = 29 \text{ кг/м}^3$; $U_c = 136,6 \text{ м/с}$ для следующих перемещений: 1 – 105 мм; 2 – 95 мм; 3 – 85 мм; 4 – 75 мм; 5 – 65 мм; 6 – 55 мм

угла конуса оказались самым непосредственным образом связанными с действием давления впрыска.

Порядок проведения расчетов по разработанному методу

Для расчета геометрии струи необходимо располагать индикаторной диаграммой, значением диаметра распыливающих отверстий, диаграммой (осциллограммой) давления впрыска $p_{\text{впр}} = f(t)$, снятой перед распыливающими отверстиями, и значениями физических параметров топлива. По индикаторной диаграмме определяют плотность воздушного заряда за период впрыска; по диаграмме $p_{\text{впр}} = f(t)$ интегрированием по формуле (4) определяется

Зависимости для коэффициентов при определении угла конуса СРТ

t, MC	$\lg A_3$	l_3	k_3	n_3	
0,2–0,6	$3,333t^2 - 7,99t - 0,075$	$0,24t - 0,019$	$0,019 + 0,113t - 0,025t^2$	$1,075t + 0,055$	
0,6–0,8		$0,143t + 0,058$		$0,513t + 0,402$	
0,8–1				$0,913$	
1–1,2				$1,84 - 0,775t$	
1,2–1,4	$3,3t - 8,86$	$0,235$	$0,019 + 0,113t - 0,025t^2$	$1,84 - 0,775t$	
1,4–1,6		$0,242 - 0,02t$			
1,6–2,3	$0,214t - 3,922$	$0,236 - 0,0183t$		$0,019 + 0,113t - 0,025t^2$	$0,63 - 0,0233t$
2,3–3					

среднеинтегральное давление топлива. Далее реализуется следующий алгоритм расчета.

1. Принимается значение шага расчета t_p (обычно $t_p = 0,1$ мс).

2. По зависимости $p_n = f(t)$ для момента t_p определяют величину p_n и рассчитывают скорость U_n по формуле (5).

3. Определяется число Вебера по значению U_n .

4. С помощью полученного числа Вебера рассчитывается коэффициент свободной турбулентности по формуле (7).

5. Выражение (2) подстановкой известных и рассчитанных величин приводят к виду:

$$S_\phi = k_\phi \sqrt{t_p + t_k}, \quad (10)$$

где k_ϕ – численный коэффициент, получаемый в результате преобразований.

6. Из зависимости $p_{впр} = f(t)$ для принятого t_p определяется значение $p_{впр}$. Полученное значение $p_{впр}$ подставляется в выражение (5) вместо p_n , и рассчитывается скорость U_k массы dm , затем – число Вебера для найденного значения U_k .

7. Перемещение S_k массы dm определяется из формулы (8), в которую подставляют полученное значение критерия Вебера. Входящий в эту формулу критерий нестационарности подстановкой значений σ_t , ρ_t и d_c приводится к виду

$$\Xi = k_\Xi t_k^2,$$

где k_Ξ – коэффициент, получаемый в результате преобразований.

В выражение (8) также подставляют все известные и рассчитанные величины и приводят к виду

$$S_k = k_k t_k^{0,421}, \quad (11)$$

где k_k – численный коэффициент, получаемый в результате подстановок.

8. Из совместного рассмотрения зависимостей (2) и (8) определяют значение t_k .

Полагая $S_\phi = S_k$, получаем

$$k_k t_k^{0,421} = k_\phi \sqrt{t_p + t_k}. \quad (12)$$

Последнее равенство приводим к уравнению относительно времени t_k :

$$A t_k^{0,842} - t_k - t_p = 0,$$

где A – численный коэффициент, получаемый в результате операций с уравнением (12).

Решая последнее уравнение, находим значение t_k . Перемещение вершины струи (значения S_ϕ и S_k) получают, подставляя величину t_k в выражения (10) и (11). Они должны быть

равными. Значения величины t_k определяются в соответствии с принятой точностью расчета. Получаемым при этом различием S_ϕ и S_k в пределах 0,5 мм можно пренебречь.

9. По формуле (9) рассчитывают угол конуса струи. Показатели степени рассчитывают по формулам, приведенным в таблице, согласно времени t .

10. В начале расчета значения S_ϕ и S_k имеют небольшие значения. Поскольку движение СРТ рассчитывается как геометрическая последовательность координат (точек), необходимо для каждой новой точки выполнить расчет по п. 1–9 для нового увеличенного значения t_p и далее повторять расчет до тех пор, пока струя не достигнет стенки камеры сгорания. Если последнее значение S_ϕ соответствует тому, что струя оказалась за пределами камеры сгорания, полученные точки можно соединить линией. Пересечение полученной траектории с прямой, отложенной на расстоянии $S_\phi = S_{\max}$ от оси t , даст искомые величины S_ϕ и t . Значение $S_{\max}$ принимают из чертежа головки поршня, перемещение которого рассчитывается по формуле

$$S_n = R[(1 - \cos \varphi) + 0,25\lambda(1 - \cos 2\varphi)],$$

где S_n – перемещение поршня; R – радиус кривошипа; λ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна; φ – угол поворота коленчатого вала.

Практическое применение метода

С помощью данного метода были выполнены расчеты параметров движения топливной струи для различных рабочих режимов и камер сгорания дизелей типа ЧН 21/21 и ЧН 26/26. С этой целью использовались экспериментальные данные, полученные на установке ДПО, в Центральном научно-исследовательском дизельном институте и на Коломенском тепловозостроительном заводе. Ниже приведены результаты расчета для тепловозного дизеля 1А9ДГ с параметрами рабочего режима: эффективная мощность $N_e = 677$ кВт; частота вращения коленчатого вала $n = 570$ мин⁻¹; давление воздушного заряда в конце сжатия $p_c = 3,6$ МПа; температура воздушного заряда $T_c = 600$ °С; длительность впрыска топлива $t_{впр} = 4,53$ мс; угол опережения впрыска $\theta = 19^\circ$; цикловая подача топлива $q_{ц} = 0,067$ г. Диаграмма давления впрыска и ее среднеинтегральная характеристика приведены на рис. 9.

Расчет дальности струи. Задаем-ся значениями

$$t_p = 0,55 \text{ мс}, d_c = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

По индикаторной диаграмме определяем плотность воздушного заряда $\rho_b = 14,51 \text{ кг/м}^3$. По диаграмме $p_n = f(t)$, приведенной на рис. 9, определяем $p_n = 17,5 \text{ МПа}$. Далее рассчитываем скорость топлива U_n :

$$U_n = 1000 \mu_c \sqrt{\frac{2p_n}{\rho_\tau}} = 1000 \cdot 0,73 \sqrt{\frac{2 \cdot 17,5}{828}} = 150,51 \text{ м/с}.$$

Находим число Вебера, симплекс плотности и критерий распыливания (см. (2)) и рассчитываем величину коэффициента свободной турбулентности по зависимости (7):

$$We = \frac{U_n^2 \rho_\tau d_c}{\sigma_\tau} = \frac{150,51^2 \cdot 828 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}}{27,468 \cdot 10^{-3}} = 273162,2;$$

$$\rho = \rho_b / \rho_\tau = \frac{14,51}{828} = 0,017524;$$

$$M = \frac{\mu_\tau^2}{\rho_\tau d_c \sigma_\tau} = \frac{(2,07 \cdot 10^{-3})^2}{828 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 27,468 \cdot 10^{-3}} = 0,000471;$$

$$a_n = 0,553 We^{0,07246} M^{0,2067} \rho^{0,917} = 0,553 \cdot 2,476983 \times 0,205265 \cdot 0,024514 = 0,006893.$$

Получаем выражение для S_ϕ :

$$S_\phi = \sqrt{\frac{U_n t d_c}{a_n \sqrt{2}}} = \sqrt{\frac{150,51 t \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}}{0,006893 \sqrt{2}}} = 78,7 \sqrt{t_p + t_k}.$$

По диаграмме давления впрыска определяем величину $p_{впр} = 30 \text{ МПа}$, рассчитываем скорость топлива U_k и находим для нее число Вебера:

$$U_k = 1000 \mu_c \sqrt{\frac{2p_n}{\rho_\tau}} = 1000 \cdot 0,73 \sqrt{\frac{2 \cdot 30}{828}} = 196,51 \text{ м/с}.$$

$$We = \frac{U_k^2 \rho_\tau d_c}{\sigma_\tau} = \frac{196,51^2 \cdot 828 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}}{27,468 \cdot 10^{-3}} = 465621,04.$$

Получим выражение для критерия нестационарности:

$$\Theta = \frac{\sigma_\tau t_k^2}{\rho_\tau d_c^3} = \frac{27,468 \cdot 10^{-3} (t_k \cdot 10^{-3})^2}{828 \cdot (0,4 \cdot 10^{-3})^3} = 0,518342 t_k^2.$$

Тогда выражение для S_k на основе зависимости (8) примет вид:

$$S_k = 41,807 d_c \frac{We^{0,161} \Theta^{0,2105} M^{0,175}}{\rho^{0,291}} = 41,807 \times 0,4 \cdot 10^{-3} \frac{8,176233 \cdot 0,870817 t_k^{0,421} \cdot 0,261685}{0,308246} = 101,08 t_k^{0,421}.$$

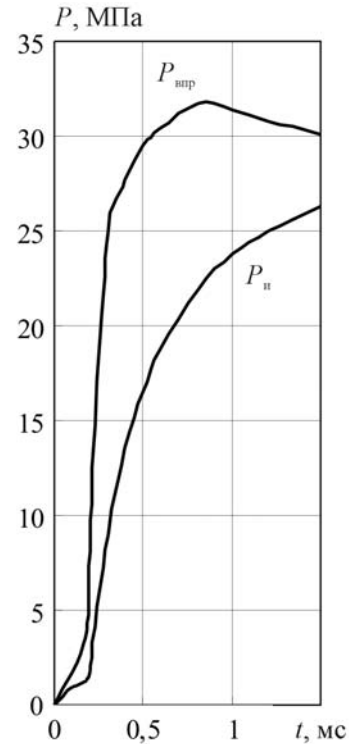


Рис. 9. Диаграмма давления впрыска и ее интегральная характеристика

Определяем координаты вершины струи:

$$78,7 \sqrt{t_p + t_k} = 101,08 t_k^{0,421};$$

$$1,65 t_k^{0,842} - t_k - 0,55 = 0;$$

$$t_k = 0,78 \text{ мс}; t = 0,55 + 0,78 = 1,33 \text{ мс};$$

Расчет угла конуса СРТ. Принимаем

$$S_\phi = S_k = 91,5 \text{ мм}.$$

Из выражения в таблице находим:

– коэффициент A_3 :

$$\lg A_3 = 3,3t - 8,86 = 3,3 \cdot 1,33 - 8,86 = -4,471;$$

$$A_3 = 0,00003381;$$

– значение показателя степени $l_3 = 0,235$;

– показатели степени k_3 и n_3 :

$$k_3 = 0,019 + 0,113t - 0,025t^2 = 0,019 + 0,113 \cdot 1,33 - 0,025 \cdot 1,33^2 = 0,1251,$$

$$n_3 = 1,84 - 0,775t = 1,84 - 0,775 \cdot 1,33 = 0,8093.$$

Поскольку на угол конуса влияет $p_{впр}$, берем число Вебера, определенное для U_k :

$$We = 465 621,04; We^{0,235} = 21,477694.$$

Также используем найденные ранее критерий распыливания и симплекс плотности:

$$\rho = 0,17524; \rho^{0,1251} = 0,602946;$$

$$M = 0,000471; M^{0,8093} = 0,002030.$$

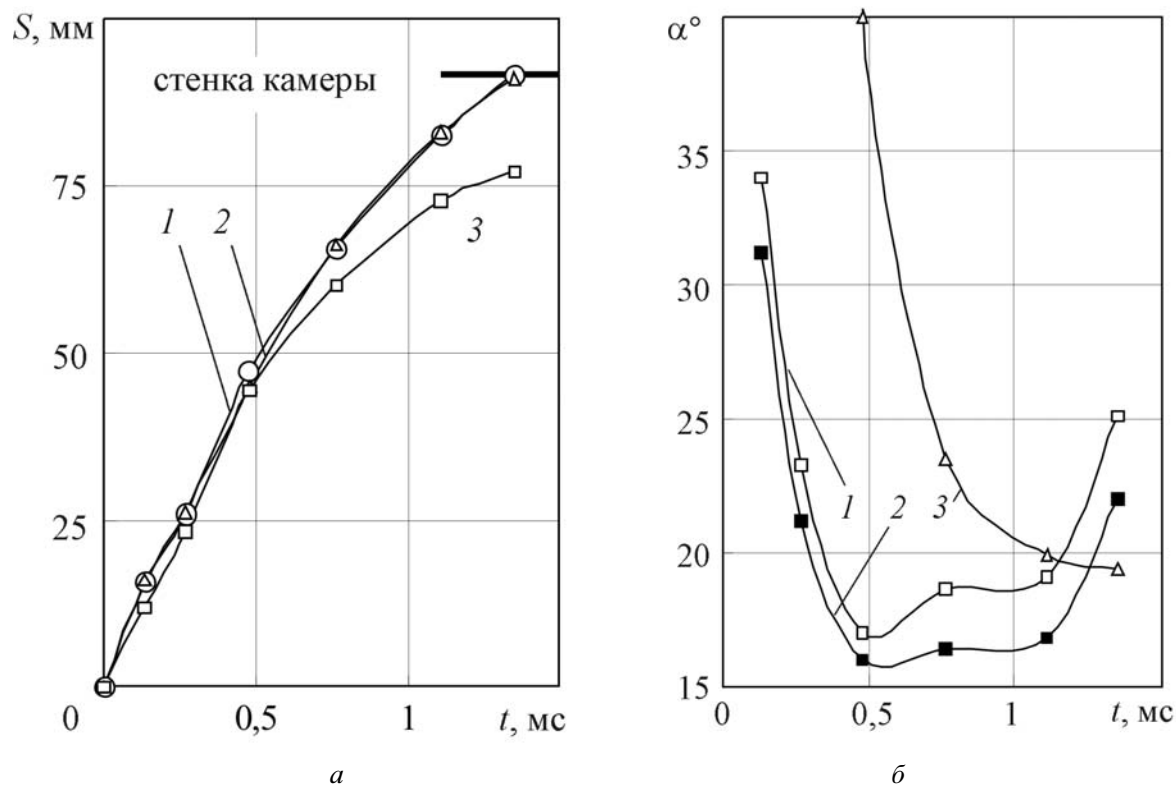


Рис. 10. Зависимости для перемещения вершины (а) и угла конуса (б) топливной струи:
 1 – рассчитано по предлагаемому методу; 2 – получено экспериментально;
 3 – рассчитано по методу Лышевского

Определяем угол конуса струи по выражению (9):

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} &= A_3 \frac{We^{l_3} \rho^{k_3}}{M^{n_3}} = \\ &= 0,00003381 \frac{465\,621,04^{0,2350} \cdot 0,017524^{0,1251}}{0,000471^{0,8093}} = \\ &= 0,00003381 \frac{21,48 \cdot 0,602946}{0,002030} = 0,215725; \\ \alpha/2 &= 12,17^\circ, \quad \alpha = 24,35^\circ. \end{aligned}$$

На рис. 10, а видно практически полное совпадение расчетной и экспериментальной дальности струи. Дальность, рассчитанная по методу Лышевского, отклоняется от этих данных по мере удлинения струи. Расчетные и экспериментально полученные значения угла конуса, представленные на рис. 10, б, близки друг к другу, в то время как угол конуса, рассчитанный по методу Лышевского, имеет значительное отклонение.

Одна из кинограмм данного процесса движения СРТ приведена на рис. 11.

В настоящее время разрабатывается для внедрения в практику программа, позволяющая производить расчеты на ЭВМ.

Возможная относительная погрешность метода не превышает 6,2 % для дальности и 12,5 % для угла конуса.

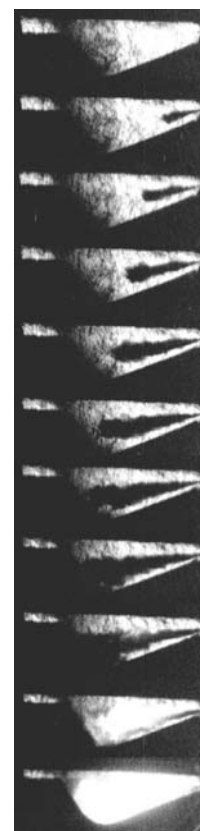


Рис. 11. Кинограмма впрыска топлива для дизеля 1А9ДГ

Заключение

В данной работе показана возможность применения уравнения движения тела переменной массы для турбулентной модели топливной струи. На основе уравнения Мещерского и интегрирования давления впрыска разработан метод определения параметров движения топливной струи. Экспериментальные исследования предоставили возможность оценить влияние переднего фронта давления впрыска, плотности воздушного заряда и диаметра распыливающих отверстий на движение топливной струи. Моделирование дизельных процессов позволило выявить газодинамическое и тепловое воздействия воздушного заряда на развитие топливной струи. Приведенный пример расчета показывает достаточно хорошее соответствие результатов расчета с экспериментом.

Список литературы

1. Лышевский А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях. – Л.: Судостроение, 1971. – 248 с.
2. Свиридов Ю.Б., Малявинский Л.В., Вихерт М.М. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей. – Л.: Машиностроение, 1979. – 246 с.
3. Лебедев О.Н., Чирков С.Н. Теоретические основы процессов смесеобразования в дизелях. – Новосибирск.: Изд. НГAVT(НИИВТ), 1999. – 388 с.
4. Крупский М.Г., Рудаков В.Ю., Чугунов А.В. Методика расчета геометрических параметров струи распыленного топлива в камерах сгорания дизелей // Новые технологии. 2000. № 2. С. 31–33.
5. Крупский М.Г., Рудаков В.Ю. Расчет геометрических параметров струи топлива при впрыске в камеру сгорания дизеля // Двигателестроение. 2008. № 1. С. 24–25.
6. Крупский М.Г., Рудаков В.Ю. Методика расчета геометрических параметров и динамики струи распыленного топлива при впрыске дизельной форсункой // Тез. докл. Всерос. науч.-техн. семинара по автоматическому управлению и регулированию теплотехнических установок им. проф. В.И. Крутова. 31 января, 2007 г. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2007. № 4. С. 116–117.
7. Рудаков В.Ю. Особенности развития топливной струи при двухфазном впрыске // Двигателестроение. 2011. № 1. С. 9–11.
8. Установка для исследования процессов, протекающих в камере сгорания дизеля / Е.А. Никитин, Г.В. Никонов, М.Г. Крупский, Ю.Ф. Куянов // Двигателестроение. 1988. № 1. С. 8–9.
9. Кузин В.Е., Рудаков В.Ю. Системы и измерительная аппаратура установки «Двигатель с прозрачными окнами» // Улучшение экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания. – М.: Изд. ВЗПИ, 1989. С. 32–37.
10. Рудаков В.Ю. Исследование теплового и газодинамического воздействия воздушного заряда на развитие топливной струи // Двигатель. 2004. № 4. С. 7–9; 2005. № 1. С. 46–47.
11. Рудаков В.Ю. Закономерности угла конуса топливной струи // Тез. докл. Всерос. науч.-техн. семинара по автоматическому управлению и регулированию теплотехнических установок им. проф. В.И. Крутова, 27 января, 2010 г. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 2. С. 2.

Материал поступил в редакцию 21.03.2011

**РУДАКОВ
Владимир
Юрьевич**

E-mail: kimgou.kolomna@mail.ru
Тел.: +7 (496) 618-16-72

Инженер кафедры ДВС Коломенского института (филиала) Московского государственного открытого университета. Область научных интересов – теоретические и экспериментальные исследования дизельных двигателей. Автор 15 научных статей.