

ния высоких динамических качеств САРТ используется три идентификатора состояния: скоростная характеристика ДВС $M_{дв}(\omega_{дв}, \beta, p_{вп})$, теплота ΔQ_v , отданная в систему охлаждения ДВС, и задающее воздействие $\omega_{вент}^{опт}$ внутреннего контура по выработке оптимального значения частоты вращения вала вентилятора как функция режима работы ДВС.

При использовании предлагаемой инвариантной САРТ со следящим электроприводом вентилятора реализуется синтез оптимальных законов регулирования температур охлаждающей жидкости на выходе из радиатора $t_{ож}^{вых}$. Оптимизация параметров электропривода, установки вентилятора относительно радиатора позволяет увеличить весовой расход охлаждающего воздуха через воздушный тракт и, соответственно, повысить теплоотдачу от радиаторов, снизить энергопотребление на динамический процесс воздухообдува. При этом без каких-либо конструктивных изменений двигателя и радиатора системы охлаждения удастся более точно поддерживать оптимальную температуру $t_{ож}^{опт}$ на выходе из радиатора на всех эксплуатационных режимах ДВС.

Описанная электронная САРТ со следящим электроприводом вентилятора имеет высокие динамические качества, инвариантность к возмущающим воздействиям и может быть использована как в бензиновых, так и в дизельных двигателях. При этом улучшаются технико-экономические показатели ДВС, упрощается компоновка системы охлаждения в моторном отсеке транспортного средства, повышается его ресурс.

Литература:

1. Тракторные дизели: Справочник / Под. общ. ред. Б.А. Взорова. - М.: Машиностроение, 1981. - 535 с.
2. Луков Н.М. Автоматическое регулирование температуры двигателей. - М.: Машиностроение, 1977. - 224 с.
3. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. - М.: Наука, 1976. - 250 с.
4. Поликер Б.Е., Михальский Л.Л. и др. Комбинированные системы автоматического управления тепловым режимом ДВС / Положительное решение на изобретение по заявке №96114216/06 (020564).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ

Девянин С.Н. (МГАУ им. В.П. Горячкина),
Марков В.А., Микитенко А.В. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Дальнейшее улучшение показателей дизелей невозможно без совершенствования процессов смесеобразования и сгорания, которые в значительной степени определяются формой камеры сгорания (КС). В дизелях применяют КС различных типов и различные способы смесеобразования. В настоящее время наиболее перспективными считаются дизели с полуразделенными и неразделенными КС и преобладанием объемного смесеобразования [1]. Причем, в этих дизелях смесеобразование осуществляется как за счет энергии впрыскиваемого в КС топлива, так и за счет энергии воздушного вихря. Поэтому при отработке процесса смесеобразования необходимо определение параметров движения воздушного заряда.

Для расчетных исследования выбрана цилиндрическая КС в поршне, применяемая в дизелях производства Алтайского моторного завода (КС типа АМЗ) (рис. 1). При использовании этой КС на такте сжатия воздушный вихрь возникает за

счет вытеснения воздуха из надпоршневого зазора (из периферийной области цилиндра) в КС в поршне (рис. 1,а).

Для оценки скорости движения воздушного заряда при его вытеснении из надпоршневого зазора δ (рис. 1,б) и исследования влияния конструктивных параметров на скорость заряда была разработана расчетная модель процесса вытеснения, основанная на фундаментальных законах и уравнениях термодинамики и аэродинамики [2-4].

При разработке математической модели использован следующий подход. Объем над поршнем был условно разделен на две части (рис. 1,в). Первая часть «В», расположенная над вытеснителем поршня и представляющая собой полый цилиндр наружным диаметром D и внутренним диаметром d , равным диаметру горловины КС в поршне.

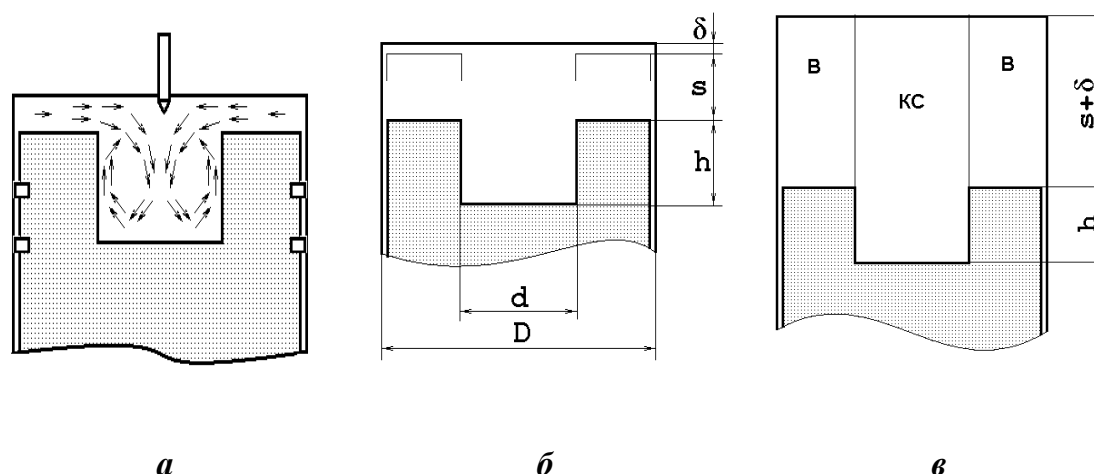


Рис. 1. Организация движения воздуха за счет вытеснения заряда:
а - механизм возникновения радиального воздушного вихря; б - геометрические характеристики КС при движении поршня к ВМТ; в - разбивка КС на две части

Высота цилиндра равна сумме перемещения поршня S и надпоршневого зазора δ . Вторая часть «КС» расположена над КС в поршне и представляет собой цилиндр диаметром d и высотой, равной сумме величин S , δ и высоты КС h . Обе полости «В» и «КС» сообщаются между собой по цилиндрической поверхности диаметром d и высотой $S + \delta$. При возникновении перепада давления между полостями происходит обмен рабочим телом через эту поверхность площадью f_k .

Состояние заряда в полостях можно описать уравнением состояния идеального газа

$$pV = MRT, \quad (1)$$

где p, V, M и T – соответственно, давление, объем, масса и температура заряда; $R = 8,314$ Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная.

Прологарифмировав левую и правую части и продифференцировав их, получим уравнение состояния в дифференциальном виде:

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dM}{M} + \frac{dT}{T} \quad (2)$$

Для исключения температуры из уравнения и упрощения вычислений процесс сжатия будем рассматривать, как политропный процесс со средним показателем политропы n . Тогда уравнение примет вид:

$$\frac{dp}{p} + n \frac{dV}{V} = n \frac{dM}{M} . \quad (3)$$

В соответствии с полученным уравнением для рассматриваемых полостей можем записать:

– изменение давления газа в полости «В»

$$dp_v = p_v \cdot n_v \cdot \left(\frac{dM_v}{M_v} - \frac{dV_v}{V_v} \right)$$

или

$$dp_v = p_v \cdot n_v \cdot \left(\frac{dM_v}{dV_v} \cdot \frac{1}{M_v} - \frac{1}{V_v} \right) \cdot dV_v ; \quad (4)$$

– изменение давления газа в полости «КС»

$$dp_{kc} = p_{kc} \cdot n_{kc} \cdot \left(\frac{dM_{kc}}{dV_{kc}} \cdot \frac{1}{M_{kc}} - \frac{1}{V_{kc}} \right) \cdot dV_{kc} . \quad (5)$$

Для поршня с камерой сгорания в процессе его движения при сжатии давление в указанных выше полостях будет изменяться по различным законам. В полости «В» давление будет расти быстрее, что приведет к перетеканию части заряда из нее в полость «КС». Количество перетекаемого заряда может быть найдено по уравнению:

$$dM_v = -\mu f_k \cdot \rho_v \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_v} \cdot \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot p_v \left[1 - \left(\frac{p_{kc}}{p_v} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \cdot dt , \quad (6)$$

где $f_k = 3,14 \cdot d \cdot (S + \delta)$ – площадь кольцевого сечения между полостями "В" и "КС"; μ – коэффициент расхода. Параметры с индексом «v» относятся к полости "В" и с индексом «kc» – к полости "КС".

На основании закона сохранения массы изменение заряда в полости "КС" определяется соотношением:

$$dM_{kc} = -dM_v . \quad (7)$$

Количество заряда в цилиндре считаем неизменным (утечки отсутствуют), следовательно:

$$M_a = M_v + M_{kc} = Const , \quad (8)$$

где $M_a = \rho_a \cdot V_a$; ρ_a – плотность газа в цилиндре в начале сжатия; $V_a = \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \cdot V_h$ – объем газа над поршнем в НМТ; ε – степень сжатия; V_h – рабочий объем цилиндра.

Объем цилиндрической полости «В» зависит от хода поршня S и определяется по выражению:

$$V_v = V_{cv} + \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot S . \quad (9)$$

где V_{cv} – объем полости при положении поршня в ВМТ, определяемый из соотношения

$$V_{cv} = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot \delta. \quad (10)$$

Объем цилиндрической полости «КС» определяется аналогично:

$$V_{kc} = V_{ckc} + \frac{\pi}{4} d^2 \cdot S, \quad (11)$$

где V_{ckc} – объем полости "КС" в ВМТ, определяемый в виде

$$V_{ckc} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot (\delta + h). \quad (12)$$

Соответственно изменение объемов в результате движения поршня определяется из выражений для каждой полости:

$$dV_v = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot dS \quad - \text{ для полости «В»}; \quad (13)$$

$$dV_{kc} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot dS \quad - \text{ для полости «КС»}. \quad (14)$$

С учетом зависимостей (4), (9), (13) по мере движения поршня давление в полости «В» будет меняться в соответствии с законом

$$p_v = p_a + \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot n_v \cdot \int_{s_a}^s p_v \cdot \left(\frac{dM_v}{dV_v} \cdot \frac{1}{M_v} - \frac{1}{V_v} \right) \cdot ds, \quad (15)$$

где $s=f(\varphi)$ – перемещение поршня, в зависимости от угла поворота кривошипа φ ; s_a – значение перемещения поршня в начале процесса сжатия; p_a – давление в цилиндре в начале сжатия; dM_v/dV_v – изменение массы газа при изменении объема полости "В" во время движения поршня.

Давление в полости «КС» меняется по закону

$$p_{kc} = p_a + \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot n_{kc} \cdot \int_{s_a}^s p_{kc} \cdot \left(\frac{dM_{kc}}{dV_{kc}} \cdot \frac{1}{M_{kc}} - \frac{1}{V_{kc}} \right) \cdot ds. \quad (16)$$

Масса газа в полости «В» может быть найдена по выражению:

$$M_v = M_{av} + \int_{s_a}^s \frac{dM_v}{dt} \cdot \frac{1}{C_n} \cdot ds, \quad (17)$$

где $C_n = ds/dt$ – скорость перемещения поршня.

Плотность газа в полости «В» будет равна

$$\rho_v = \frac{M_v}{V_v}. \quad (18)$$

Масса газа в полости «КС» может быть найдена из зависимости (8)

$$M_{kc} = M_u - M_v$$

Связь степени сжатия с геометрическими параметрами поршня выражается зависимостями:

$$\varepsilon = 1 + \frac{V_h}{V_{cv} + V_{ckc}} \quad \text{или} \quad \varepsilon = 1 + \frac{\frac{\pi}{4} D^2 \cdot S_n}{V_{cv} + V_{ckc}}. \quad (19)$$

Значение среднего показателя политропы сжатия для заряда в цилиндре определяется по выражению:

$$n_1 = \kappa - \Delta n, \quad (20)$$

где κ – показатель адиабаты для воздушного заряда; Δn – изменение показателя политропы в результате теплообмена. Значения средних показателей политропы сжатия для полостей «В» и "КС" может быть определено по аналогичным зависимостям:

$$\begin{aligned} n_{\epsilon} &= \kappa - \Delta n_{\epsilon}; \\ n_{\kappa\kappa} &= \kappa - \Delta n_{\kappa\kappa}, \end{aligned} \quad (21)$$

где $\Delta n_{\epsilon}, \Delta n_{\kappa\kappa}$ – изменение показателей в результате теплообмена в полостях "В" и "КС", соответственно.

Предполагая, что показатели политропы сжатия пропорциональны поверхности контакта заряда со стенками камеры сгорания двигателя, можно найти соотношение между Δn , Δn_{ϵ} , и $\Delta n_{\kappa\kappa}$. Принимая, что

$$\Delta n = A \cdot \frac{F}{M_a},$$

где A – постоянная для данного режима работы двигателя; M_a – масса заряда; F – поверхность полости сжатия.

Тогда имеем:

$$\Delta n_{\epsilon} = A \cdot \frac{F_{\epsilon}}{M_{\epsilon}};$$

$$\Delta n_{\kappa\kappa} = A \cdot \frac{F_{\kappa\kappa}}{M_{\kappa\kappa}};$$

$$\Delta n_{\kappa\kappa} = \Delta n_{\epsilon} \cdot \frac{F_{\kappa\kappa}}{F_{\epsilon}} \cdot \frac{M_{\epsilon}}{M_{\kappa\kappa}}.$$

С учетом формулу (8) и равенства $F = F_{\epsilon} + F_{\kappa\kappa}$ можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta n &= A \cdot \frac{F_{\epsilon}}{M_a} + A \cdot \frac{F_{\kappa\kappa}}{M_a} = \Delta n_{\epsilon} \cdot \frac{M_{\epsilon}}{M_a} + \Delta n_{\kappa\kappa} \cdot \frac{M_{\kappa\kappa}}{M_a} = \Delta n_{\epsilon} \cdot \frac{M_{\epsilon}}{M_a} + \Delta n_{\epsilon} \cdot \frac{F_{\kappa\kappa}}{F_{\epsilon}} \cdot \frac{M_{\epsilon}}{M_a} = \\ &= \Delta n_{\epsilon} \cdot \frac{M_{\epsilon}}{M_a} \left(1 + \frac{F_{\kappa\kappa}}{F_{\epsilon}} \right). \end{aligned}$$

Выражая из полученной зависимости параметр Δn_{ϵ} , имеем:

$$\Delta n_{\epsilon} = \frac{\Delta n}{\frac{M_{\epsilon}}{M_a} \left(1 + \frac{F_{\kappa\kappa}}{F_{\epsilon}} \right)} = \frac{\kappa - n_1}{\frac{M_{\epsilon}}{M_a} \left(1 + \frac{F_{\kappa\kappa}}{F_{\epsilon}} \right)}. \quad (22)$$

Аналогично получаем зависимость для параметра $\Delta n_{\kappa\kappa}$:

$$\Delta n_{\kappa\kappa} = \frac{\kappa - n_1}{\frac{M_{\kappa\kappa}}{M_a} \left(1 + \frac{F_{\epsilon}}{F_{\kappa\kappa}} \right)}. \quad (23)$$

Степень сжатия ϵ в цилиндре зависит от рабочего объема цилиндра V_h и объема полости сжатия V_c , которая определяется величиной надпоршневого зазора δ , и объемом камеры в поршне. Рассматривая цилиндрическую камеру в поршне, ее объем зависит от диаметра d и высоты h . При заданной степени сжатия высота камеры сгорания в поршне h может быть связана с другими параметрами математической зависимостью. Для ее получения рассмотрим следующие уравнения.

1. Степень сжатия

$$\varepsilon = 1 + \frac{V_h}{V_c} \text{ или } V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1}, \text{ но } V_c = V_{св} + V_{скс}.$$

2. Используя зависимости (10) и (12) можем записать для V_c :

$$V_c = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot \delta + \frac{\pi}{4} d^2 \cdot (\delta + h) = \frac{\pi}{4} (D^2 \cdot \delta + d^2 \cdot h).$$

3. Выражая из полученной зависимости высоту камеры сгорания и вводя в расчет радиус кривошипа R и условие $S_a = 2R$ получим:

$$h = \frac{4}{\pi \cdot d^2} \left(V_c - \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \delta \right) = \frac{4}{\pi \cdot d^2} \left(\frac{\pi D^2 \cdot 2R}{4(\varepsilon - 1)} - \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \delta \right).$$

После преобразований получим искомую зависимость:

$$h = \left(\frac{D}{d} \right)^2 \left(\frac{2R}{\varepsilon - 1} - \delta \right). \quad (24)$$

Скорость движения воздушного заряда из полости «В» в полость «КС» $C_в$ определяется расходом газа из одной полости в другую и сечением между ними в соответствии с зависимостью (6):

$$C_в = \frac{1}{\mu f \cdot \rho_в} \cdot \frac{dM_в}{dt}. \quad (25)$$

С использованием изложенной методики проведены расчеты процесса вытеснения воздушного заряда в дизеле семейства АМЗ при движении поршня диаметром $D=130$ мм и ходом $S=140$ мм от НМТ к ВМТ и степени сжатия $\varepsilon=16$. Некоторые результаты расчета представлены на рис. 2.

На рис. 2,а показаны законы изменения объемов полостей «В» над вытеснителем $V_в$ и «КС» над камерой сгорания $V_{кс}$, а также скоростей их изменения $dV_в/dt$ и $dV_{кс}/dt$ от угла поворота коленчатого вала φ [град]. Как следует из рис. 2,а объем полости «В» изменяется быстрее, чем объем полости «КС» и скорость изменения объемов повторяет закон изменения скорости поршня. Объем полости «В» в ВМТ (360° п.к.в.) приближается к нулевому значению (зависит от зазора δ в ВМТ), а объем полости «КС» в ВМТ равен объему КС в поршне.

На рис. 2,б показаны законы изменения давление в полостях $p_в$ и $p_{кс}$ и площадь сечения между ними f_k . При приближении поршня к ВМТ площадь сечения между полостями снижается, давление в полостях растет.

На рис. 2,в показаны законы изменение массы газа в полостях $M_в$ и $M_{кс}$ и массового расхода газа между полостями $dM_в/dt$ (скорость изменения массы в полости «В»). Наибольшая интенсивность движения массы воздуха происходит за $10-20^\circ$ п.к.в. до ВМТ. Законы изменения плотности газа в полости «В» $\rho_в$ и скорости перетекания газа $C_в$ из полости «В» в полость «КС» показаны на рис. 2,г.

При приближении поршня к ВМТ плотность воздуха увеличивается в соответствии с изменением давления, которое для приведенного примера расчета между полостями отличается несущественно (см. рис. 2,б). Скорость достигает своего максимального значения за $2-10^\circ$ п.к.в. до ВМТ.

Представленная математическая модель может быть использована для оценки осесимметричного движение рабочей смеси от периферии к центру КС и для камер сгорания более сложной формы.

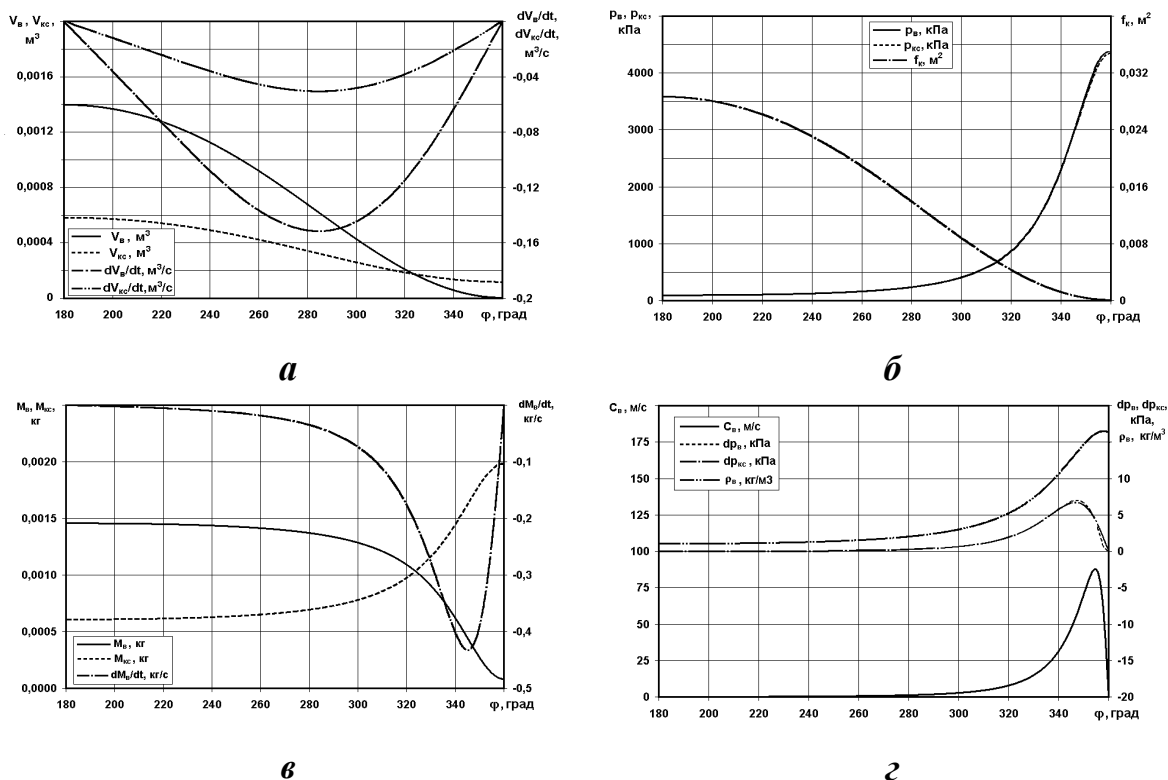


Рис. 2. Изменение параметров движения воздуха в КС типа АМЗ по углу поворота кривошипа φ : а - объемов полостей «В» и «КС»; б - давления в этих в полостях p_B и p_{KC} и площади сечения между ними f_K ; в - массы газа в полостях M_B и M_{KC} и скорость изменения массы в полости «В» dM_B/dt ; г - плотности газа в полости «В» ρ_B и скорости перетекания газа C_B из полости «В» в полость «КС».

Литература:

1. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для ВУЗов / В.П. Алексеев, В.Ф. Воронин, Л.В. Грехов и др. Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. - М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.
2. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. - М.: Госэнергоиздат, 1968. - 496 с.
3. Исаев С.И. Термодинамика: 3-е издание. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. - 414 с.
4. Теплотехника / А.М. Архаров, А.Г. Кузнецов, В.И. Шатров и др. Под ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева: Учебник для ВУЗов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 712 с.

УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОДИЗЕЛЕМ

Капустин А.А., Шимченко Н.И., Дубников Д.В.

(Санкт-Петербургский государственный университет экономики и сервиса)

В последние годы активно исследуются возможности использования на мобильной технике альтернативных топлив, в частности природного газа. Особенно привлекателен перевод дизелей на газодизельный процесс с применением сжатого природного газа и постоянной добавкой (впрыском) запального заряда дизельного топлива. При годовом пробеге автомобиля 30-40 тыс. км стоимость оборудования для питания сжатым газом полностью окупается через 1,5-2 года за счет экономии только на жидком