

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНОГО ФАКЕЛА

А.А. Обозов, д.т.н., проф. кафедры
А.А. Матюхина, магистрант

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Приводится описание программы, разработанной в среде программирования MS EXCEL, позволяющей анализировать процесс развития топливного факела в камере сгорания дизеля в целях оптимизации формы камеры сгорания. Описываются приемы динамического «анимационного» представления графической информации, получаемой на основании результатов расчетов. Приводятся результаты расчета динамики топливного факела дизельного двигателя Д-240 (ММЗ), в основу которого положена «капельная теория» развития факела в объеме камеры сгорания.

К двигателям внутреннего сгорания (ДВС) предъявляются высокие технико-экономические и экологические требования, в связи с этим компании, занимающиеся созданием новых двигателей, уделяют особое внимание научно-исследовательским работам и, в частности, расчетным исследованиям с применением ЭВМ.

В настоящее время ряд зарубежных фирм разработали и используют специализированные программные комплексы (ПК), в частности это: ПК «BOOST» (AVL), «WAVE» (Ricardo), «GT-Power» (Gamma Technologies). Данные лицензионные ПК весьма дорогостоящи и доступ к ним ограничен.

Следует отметить, что для исследований процессов ДВС еще в 1980-х гг. были разработаны отечественные вычислительные ПК: «ИМПУЛЬС», «ВОЛНА», «ФАКЕЛ» (ЦНИДИ, Ленинград). В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработаны и широко используются ПК «ДИЗЕЛЬ-2/4т», «Впрыск». Доступ пользователям к данным вычислительным комплексам в настоящее время есть в интернете [1, 2].

На кафедре «Тепловые двигатели» БГТУ разработана программа для использования в вычислительной среде Microsoft EXCEL, дающая пользователю определенные удобства при исследовании процесса впрыскивания топлива и согласовании формы камеры сгорания с формой факела.



Процесс согласования формы камеры сгорания с процессом развития топливного факела можно рассматривать состоящим из трех этапов:

Этап 1. Построение динамической (анимационной) модели развития топливного факела в условиях рабочего процесса дизеля

Этап 2. Построение динамической (анимационной) модели камеры сгорания дизеля.

Этап 3. Интерактивное решение задачи по оптимизации формы камеры сгорания с использованием полученных моделей.

Этап 1. Авторами статьи за основу в вычислениях взята однозонная капельная теория развития факела [3], основные методические положения которой следующие (рис. 1):

➤ Из теории газовой динамики известно, что сила воздействия на каплю в набегающем потоке воздуха определяется по формуле

$$F = C_x \frac{\rho_v W_\phi^2}{2} S, \quad (1)$$

где W_ϕ — скорость набегающего потока (скорость капли); C_x — коэффициент сопротивления (определяется экспериментально), $C_x \approx 0,5$ для значений коэффициента Рейнольдса $Re > 10^4$; ρ_v — плотность воздуха в камере сгорания (КС), определяемая из уравнения состояния Клапейрона–Менделеева, $\rho_v = p_{11} \cdot 10^6 / R_v T_{11}$ ($\rho_v = 17,1$ кг/м³ при $p_{11} = 4,5$ МПа, $T_{11} = 915$ К, $R_v = 287$ Дж/кг·К); S — поперечное сечение капли ($S = \pi d_k^2 / 4$).

➤ В соответствии с законом сохранения импульса силы определяется ускорение (замедление) движения капли:

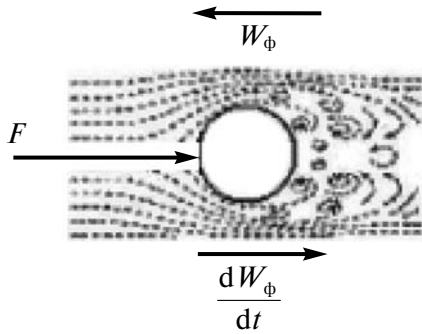


Рис.1. Движение капли в камере сгорания дизеля

$$F dt = d(m_k \cdot W_\phi) \Rightarrow \frac{dW_\phi}{dt} = F \cdot \frac{1}{m_k}, \quad (2)$$

где m_k — масса капли ($m_k = \rho_T \cdot \pi d_k^3 / 6$, d_k — диаметр капли; ρ_T — плотность топлива).

➤ При движении капли, вследствие испарения, диаметр капли изменяется по закону Срезневского:

$$d_{k0}^2 - d_k^2 = kt \Rightarrow d_k = \sqrt{d_{k0}^2 - kt}, \quad (3)$$

где d_{k0} — начальный диаметр капли (в момент начала впрыскивания $t = 0$); k — эмпирический коэффициент.

Уравнения (1)–(3) образуют систему уравнений, которая решается численным методом. Систему уравнений можно преобразовать к виду:

$$\begin{aligned} \frac{dW_\phi}{dt} &= C_x \cdot \frac{\rho_B W_\phi^2}{2} \cdot \frac{\pi d_k^2}{4} \cdot \frac{1}{\rho_T \cdot \frac{\pi d_k^3}{6}} = \\ &= \frac{3}{4} \cdot C_x \cdot \frac{\rho_B}{\rho_T} \cdot \frac{W_\phi^2}{d_k} \approx 0,375 \cdot \left(\frac{\rho_B}{\rho_T} \right) \frac{W_\phi^2}{d_k}. \end{aligned} \quad (4)$$

На основании анализа (4) можно сделать заключение о том, что в процессе развития топливного факела замедление движения вершины факела линейно зависит от константы, равной отношению плотностей воздуха в цилиндре и топлива ρ_B / ρ_T , пропорционально квадрату текущей скорости капли W_ϕ и обратно пропорционально текущему диаметру капли d_k .

Интегрирование уравнения (4) выполнено численным методом в среде программирования Microsoft EXCEL.

Начальные условия задавались следующие:

➤ $W_{\phi 0}$ — скорость вершины факела (скорость капли) в начальный момент ее движения

$$W_{\phi 0} = \sqrt{2(p_{T \text{ ср}} - p_{\text{ц}}) \cdot 10^6 / \rho_T},$$

где $p_{T \text{ ср}}$ — среднее давление топлива в распылителе форсунки в процессе впрыскивания ($p_{T \text{ ср}} = 35$ МПа); $p_{\text{ц}}$ — давление воздуха в цилиндре в процессе впрыскивания, МПа;

➤ d_{k0} — начальный диаметр капли на выходе из распылителя форсунки ($d_{k0} = 0,2$ мм, принимается равным диаметру соплового отверстия распылителя).

Результаты интегрирования уравнения (4) приведены на рис. 2.

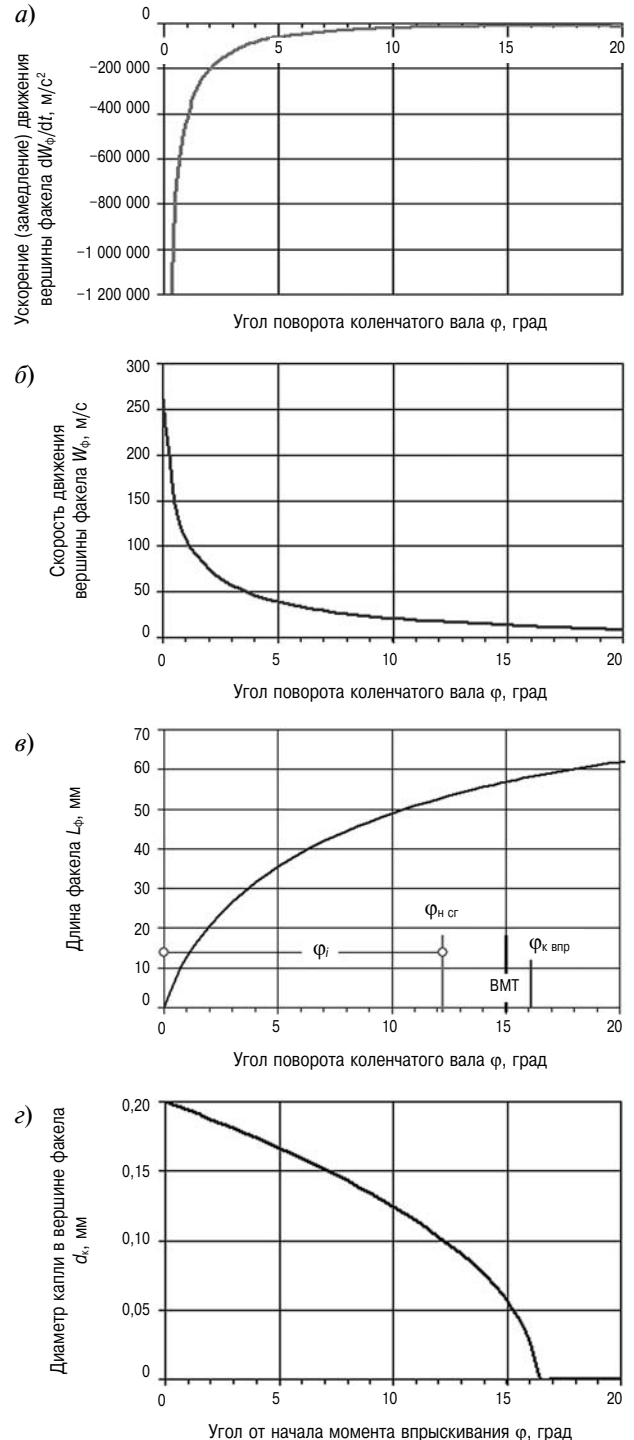


Рис. 2. Функции от угла ϕ ПКВ:

a — ускорения dW_ϕ/dt ; b — скорости W_ϕ ; v — перемещения вершины факела L_ϕ ; z — диаметра капли d_k (по формуле Срезневского).

Пояснение: на графиках моменту начала впрыскивания топлива соответствует $\phi = 0$.

При выполнении расчетов угол опережения подачи топлива $\varphi_{опт}$ выбирался из условия получения оптимального угла ПКВ, соответствующего началу процесса сгорания $\varphi_{н сг}$ (для высокооборотных двигателей $\varphi_{н сг} \approx 2-5$ град до ВМТ). Принято $\varphi_{н сг} = 2,5$ град до ВМТ и, соответственно, с учетом периода задержки воспламенения топлива τ_i получено: $\varphi_{опт} = \varphi_{н сг} + 60\tau_i n = 15$ град до ВМТ (τ_i определялся по формуле А.И. Толстова [4–6], $\tau_i = 1,2$ мс; частота вращения двигателя исследуемого режима $n = 1700$ об/мин). Момент начала сгорания топлива $\varphi_{н сг}$ обозначен на рис. 2, в. Эмпирический коэффициент k , входящий в формулу Срезневского (k — определяет скорость изменения параметра d_k), выбирался из условия получения диаметра капли $d_k \approx 50$ мкм в момент воспламенения топлива (рис. 2, г).

Среда программирования MS EXCEL дает возможность представить в динамике (анимировать) процесс развития топливных факелов (например, с шагом $\Delta\varphi = 1$ град ПКВ). С этой целью используются элементы управления среды EXCEL, например, «полоса прокрутки». Для этого в «Меню» последовательно выбираются следующие пункты: «Вид» → «Панель инструментов» → «Формы» → ... и задается «Формат элемента управления»).

Этап 2. По мнению авторов, форму камеры сгорания представляется возможным определить 5-ю параметрами, представленными на рис. 3.

Данные параметры описывают элементарные поверхности КС: внешний усеченный конус, внутренний конус и внешнюю тороидальную границу КС. При изменении какого-либо из указанных параметров в среде программирования EXCEL можно осуществлять автоматическое перестроение «графического образа» камеры сгорания. Изменение геометрических параметров КС можно выполнять плавно с заданным шагом, применив «элементы управления», описанные выше, и при этом также достигается эффект анимации. В процессе изменения формы камеры сгорания есть возможность отслеживать ее «текущий» объем (геометрическую степень сжатия ϵ).

Этап 3. Осуществляется последовательное изменение параметров (угла ПКВ, направления топливных факелов, параметров формы КС) и анализ получаемых графических образов топливных факелов и камеры сгорания. Как представляется, такой подход позволяет более оперативно и качественно решать задачи оптимизационного характера. В качестве примера на рис. 4 представлены исходная форма КС дизеля Д-240 (полуразделенная камера сгорания в поршне /КС типа ЦНИДИ/) и полученная с использованием разработанной программы оптимизированная форма КС.

Из рисунка видно, что исходная форма КС была существенно изменена: оптимальная форма

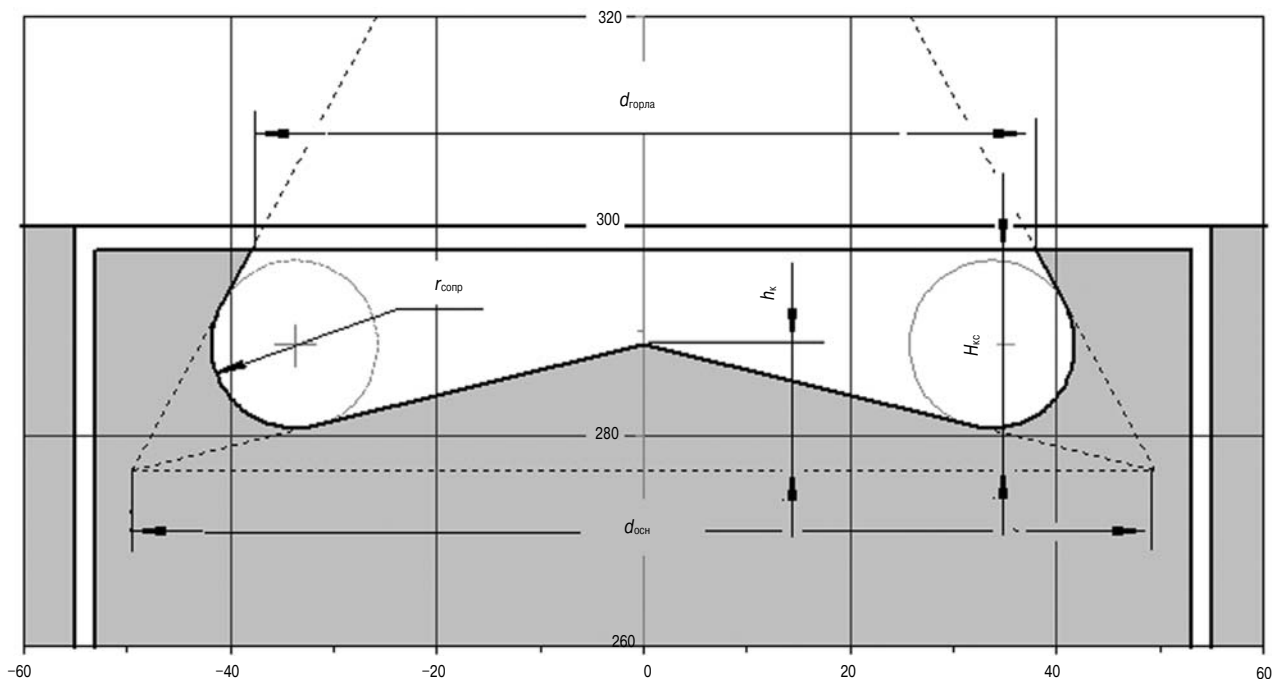


Рис. 3. Геометрическое описание формы камеры сгорания дизеля:

$H_{кc}$ — глубина КС (высота усеченного конуса); $d_{осн}$ — диаметр основания КС; $d_{горла}$ — диаметр горла КС; h_k — высота внутреннего конуса; $r_{сопр}$ — радиус сопряжения внешнего усеченного и внутреннего конусов

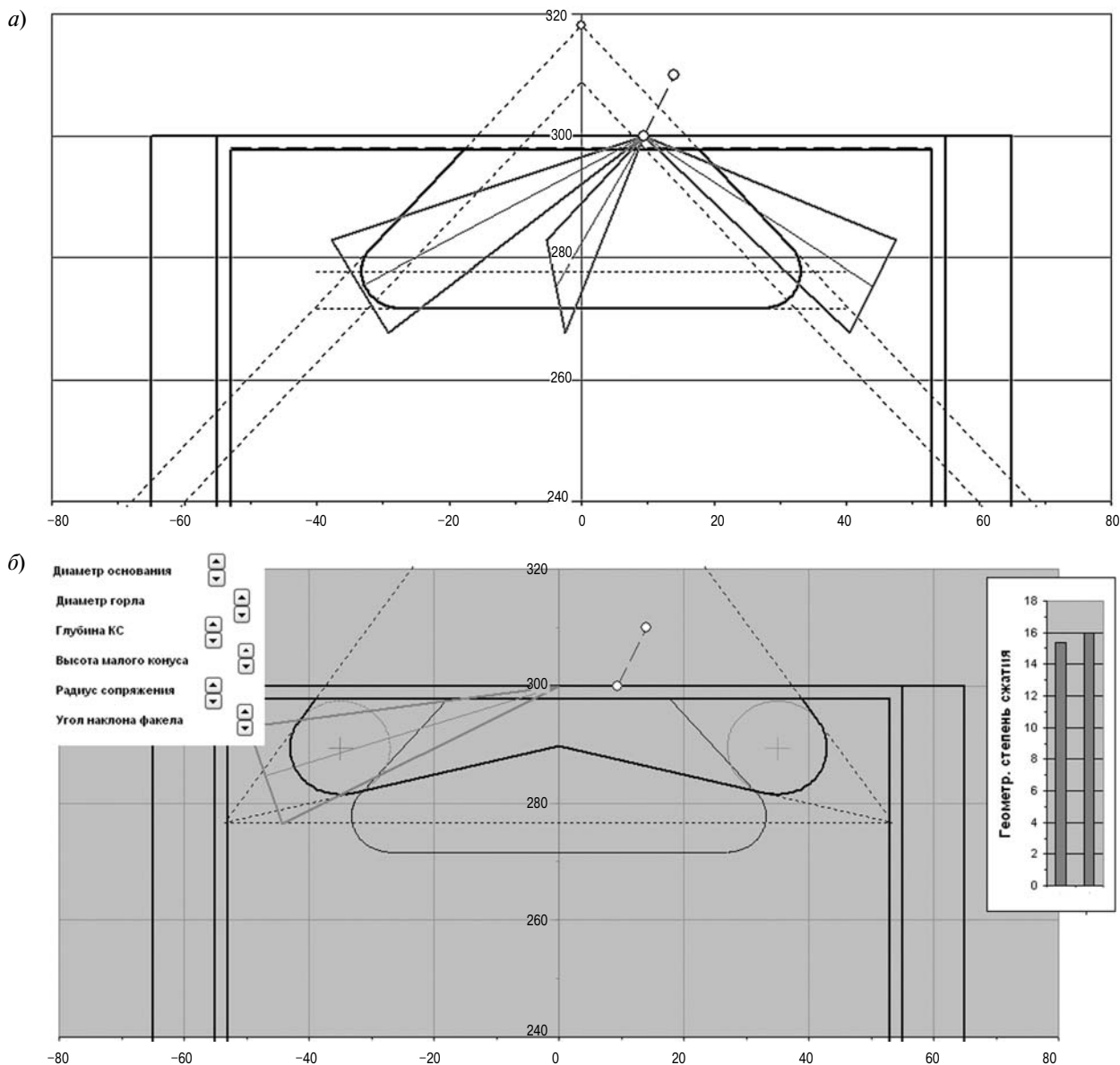


Рис. 4. Исходная форма КС дизеля Д-240 (а) и оптимизированная форма КС (б)
(на рисунке видны элементы управления анимацией и элемент контроля геометрической степени сжатия ϵ)

камеры сгорания может быть отнесена к КС открытого типа. Изменены также положение распылителя форсунки и направление топливных факелов. Способ смесеобразования в оптимизированной КС изменился с объемно-пленочного на объемный.

Авторы статьи будут благодарны за критические замечания к материалу статьи, которые помогут в дальнейшем скорректировать данное направление исследований.

Литература

1. Кулешов А.С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: дис. ... докт. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2011. 235 с.

2. DIESEL-RK: [Электронный ресурс]. URL: <http://diesel-rk.bmstu.ru> (дата обращения 16.03.2019).

3. Свиридов Ю.Б., Малявинский Л.В., Вихерт М.М. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1979. 248 с.

4. Толстов А.И. Индикаторный период запаздывания воспламенения и динамика цикла быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия «Исследование рабочих процессов в быстроходных дизелях». Труды научно-исследовательской лаборатории двигателей. М.: Машгиз, 1955. № 1. С. 5–55.

5. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. Харьков: Выща школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. 169 с.

6. Обозов А.А., Субботенко Д.И. Определение периода задержки воспламенения топлива для дизелей без наддува. Совершенствование энергетических машин, Сб. научных трудов. Брянск: БГТУ, 2015. С. 44–50.