

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ СТРУЙ И ПАРАМЕТРОВ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ

*Докт. техн. наук, проф. КУХАРЕНОК Г. М., асп. ГЕРШАНЬ Д. Г.*

*Белорусский национальный технический университет*

В настоящее время большое распространение получили дизели с неразделенной камерой сгорания и непосредственным впрыском топлива. При этом все больше применяются камеры сгорания с широкой горловиной и центральным выступом в сочетании с профилированными впускными каналами. Такие камеры предусматривают свои условия на формирование процессов смесеобразования и сгорания.

Дальнейшее совершенствование процессов смесеобразования и сгорания является основным источником повышения экономических и экологических показателей дизелей. Одно из главных направлений совершенствования процессов смесеобразования и сгорания дизелей – согласование характеристик топливных струй с параметрами камеры сгорания.

На сегодняшний день предложено большое количество камер сгорания различных формы и размеров. Однако сложности, связанные с протеканием рабочего процесса в дизелях, не позволяют осуществлять непосредственный перенос форм и размеров данных камер сгорания на двигателя не только другой размерности, но и той же размерности без учета предъявляемых к ним требований и размеров дизелей.

Выбор формы и размеров камер сгорания, которые позволяли бы обеспечить эффективные процессы смесеобразования и сгорания, является сложной и трудоемкой задачей, требующей глубоких расчетно-теоретических исследований и экспериментальной доводки.

Для проведения численных экспериментов, которые основаны на трехмерном моделировании течения, испарения, сгорания и образования токсичных веществ, необходимы сложные и дорогостоящие программы, высококвалифици-

цированные специалисты, мощные компьютеры, что связано с большими материальными затратами. Поэтому на сегодняшний день производителями двигателей широко применяются и более простые, так называемые нульмерные, модели рабочего процесса.

Математическая модель развития топливных струй в камере сгорания дизеля основывается на методиках, представленных в работах [1–3].

Дальнобойность топливной струи на основном участке определяется по формуле

$$l = \left( \frac{d_c u_0 W_e^{0,21} M^{0,16}}{\sqrt{2} D_c \rho} \right)^{0,5} \tau^{0,5}, \quad (1)$$

где  $d_c$  – диаметр соплового отверстия;  $u_0$  – скорость истечения топлива из соплового отверстия;  $W_e$  – критерий Вебера;  $M$  – критерий, характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости;  $D_c$  – постоянный коэффициент;  $\rho$  – отношение плотностей воздуха и топлива;  $\tau$  – время развития струи.

Критерий Вебера характеризует соотношение сил поверхностного натяжения и инерции и определяется следующим образом:

$$W_e = \frac{u_0^2 d_c \rho_T}{\sigma_T}, \quad (2)$$

где  $\rho_T$  – плотность топлива;  $\sigma_T$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива.

Скорость истечения топлива из соплового отверстия

$$u_0 = \varphi \sqrt{2 \frac{P_p - P_u}{\rho_T}}, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – коэффициент скорости;  $p_p$  – давление топлива у входа в сопловое отверстие;  $p_{ц}$  – давление в цилиндре двигателя.

Критерий  $M$ , характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости:

$$M = \frac{\mu_{т}^2}{\rho_{т} d_c \sigma_{т}}, \quad (4)$$

где  $\mu_{т}$  – динамическая вязкость топлива.

Отношение плотностей воздуха и топлива

$$\rho = \frac{\rho_{в}}{\rho_{т}}. \quad (5)$$

Угол распыливания на основном участке определяется по формуле

$$\alpha = 2 \arctg \left( F_c W_e^{0,32} M^{-0,07} \rho^{0,5} \right), \quad (6)$$

где  $F_c$  – постоянный коэффициент.

Мелкость распыливания оценивается по формуле для нахождения среднего диаметра капель топливной струи

$$d_k = E_k d_c (\rho W_e)^{-0,266} M^{0,0733}, \quad (7)$$

где  $E_k$  – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции форсунки и способа осреднения размеров капель.

Расчет рабочего процесса дизеля осуществляется по программе «Расчет рабочего процесса дизеля», созданной в среде Delphi, и компьютерной модели «Согласование» с помощью CAD, CAE-систем.

Расчет производится следующим образом. По компьютерной модели проводится согласование характеристик топливных струй с параметрами камеры сгорания: определяются характеристики топливных струй, форма и размеры камеры сгорания на основании принятых условий. Полученные данные используются в программе «Расчет рабочего процесса дизеля», в которой определяются основные показатели работы дизеля. Если на некотором режиме эти показатели не удовлетворяют требуемым значениям, то возвращаемся в модель «Согласование» и производим повторный расчет.

Разработанная компьютерная модель позволяет визуально наблюдать развитие топливных

струй в цилиндре дизеля в любой момент впрыскивания, а также определять положение топливных струй относительно камеры сгорания и их взаимодействие со стенкой камеры. На рис. 1 представлены элементы компьютерной модели: поршень, впускные и выпускные клапаны, впускные и выпускные каналы, седла клапанов, форсунка, топливные струи.

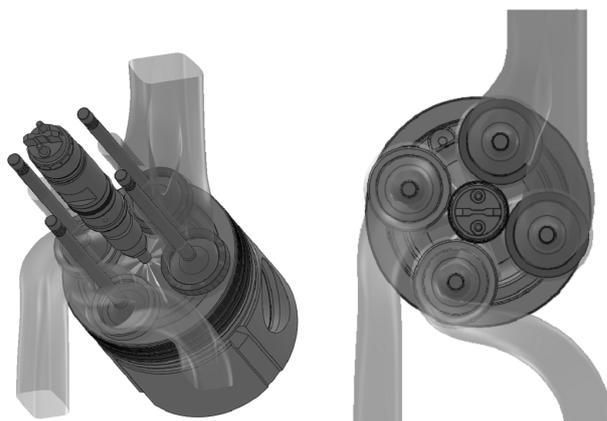


Рис. 1. Компьютерная модель «Согласование»

Развитие топливных струй определяется по указанной выше математической модели. Поршень имеет возможность перемещаться. Параметры камеры сгорания и сопловых отверстий распылителя сведены в специальную матрицу. Они могут оперативно изменяться в процессе расчета.

Согласование характеристик топливных струй с параметрами камеры сгорания с помощью компьютерной модели происходит следующим образом. Задается шаг расчета в градусах поворота коленчатого вала или по времени. Выбираются необходимые режимы работы двигателя. Вводятся исходные данные. Задается некоторая начальная камера сгорания. После этого начинается согласование характеристик топливных струй с параметрами камеры сгорания, которое можно начинать с любого режима работы двигателя. Согласование проводится изменением характеристик впрыска топлива, параметров наддува, угла опережения впрыска и т. д. Если в процессе расчета на некоторых режимах не удалось обеспечить необходимые мощностные, экономические и экологические показатели работы двигателя, то меняются параметры камеры сгорания или параметры сопловых отверстий распылителя так, чтобы

обеспечить согласование и необходимые показатели работы двигателя на данных режимах. На всех остальных режимах меняются первоначально выбранные характеристики впрыска топлива, параметры наддува, угол опережения впрыска и т. д. Если на некоторых из данных режимов не удалось обеспечить согласования, то снова меняются параметры камеры сгорания или параметры сопловых отверстий. Далее согласование проводится аналогично. Это происходит до тех пор, пока не будут получены необходимые мощностные, экономические и экологические показатели работы двигателя на рассматриваемых режимах.

Для согласования характеристик топливных струй с параметрами камеры сгорания необходимо обеспечить [4–6]:

- полноту использования свежего заряда в цилиндре;
- соответствие свободной длины топливной струи и момента воспламенения топлива в струе;
- согласование характеристик топливных струй с формой и интенсивностью вихря;
- попадание топливных струй на боковую стенку камеры сгорания с максимальным использованием площади стенки для процесса смесеобразования.

Согласование характеристик топливных струй с параметрами камеры сгорания проводилось для дизельного двигателя 4ЧН11/12,5 с четырьмя клапанами на цилиндр. Двигатель снабжен турбонаддувом с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, системой топливоподачи аккумуляторного типа. Некоторые параметры дизельного двигателя представлены в табл. 1.

На основании анализа камер сгорания, используемых в современных высокооборотных дизелях с непосредственным впрыском [6–11], для данного двигателя выбрана открытая камера сгорания с выступом на днище и стенке.

Согласование характеристик топливных струй с параметрами камеры сгорания проводилось на различных скоростных и нагрузочных режимах. К параметрам, характеризующим данную камеру сгорания, относятся: диаметры камеры сгорания и горловины, глубина камеры сгорания, высота центрального выступа, углы наклона верхней и нижней частей стенки.

Под характеристиками топливных струй понимаются их углы распыливания, дальнобойности, средние диаметры капель, угловое расположение в камере сгорания.

Таблица 1

Параметры дизельного двигателя

Наименование параметра	Значение
Максимальный угол опережения впрыска, град.	10
Максимальная продолжительность впрыска топлива, град. ПКВ	27
Удельный эффективный расход топлива на номинальном режиме, г/(кВт·ч)	210
Номинальная эффективная мощность двигателя, кВт	140
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	2300
Максимальное давление впрыска топлива, МПа	180
Максимальное давление наддува, МПа	0,26
Максимальная температура наддувочного воздуха, К	318

Диапазоны изменения параметров двигателя на каждом скоростном и нагрузочном режиме определялись с учетом экспериментальных данных.

В процессе исследования параметры сопловых отверстий распылителя и параметры камеры сгорания изменялись в пределах, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Диапазоны изменения параметров сопловых отверстий и камеры сгорания

Наименование параметра	Значение
Вертикальный угол наклона сопловых отверстий, град.	74–79
Диаметр сопловых отверстий, мм	0,15–0,18
Относительный диаметр камеры сгорания	0,62–0,69
Относительный диаметр горловины камеры сгорания	0,79–0,84
Относительная глубина	0,09–0,15
Относительная высота центрального выступа	0,5–0,8
Угол наклона верхней части стенки, град.	14–21
Угол наклона нижней части стенки, град.	14–21

Несмотря на изменения указанных выше параметров, объем камеры сгорания сохранялся постоянным. Диаметр камеры сгорания, ее горловины и глубина камеры сгорания указаны относительно диаметра цилиндра. Высота центрального выступа указана относительно глубины камеры сгорания.

Развитие топливных струй формировалось следующим образом. Топливные струи изначально попадают на нижнюю часть стенки камеры сгорания, как показано на рис. 2. Большую часть впрыска они находятся в камере сгорания. Угол распыливания топливных струй согласуется с интенсивностью осевого вихря. За период задержки воспламенения топлива вихрь должен повернуться на угол, равный разности углов: между осями струй и распыливания топливной струи. Попадание струй на зеркало цилиндра исключено. На рис. 2 показаны топливные струи в камере сгорания в момент подлета к стенке.

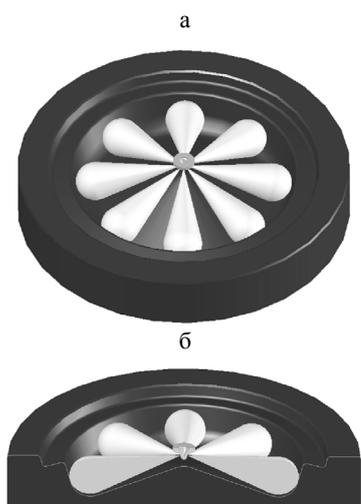


Рис. 2. Развитие топливных струй в камере сгорания в момент подлета к стенке: а – в плане; б – в плоскости, проходящей по оси поршня

В результате расчета были определены параметры сопловых отверстий распылителя и камеры сгорания (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3

**Параметры сопловых отверстий и камеры сгорания**

Наименование параметра	Значение
Вертикальный угол наклона сопловых отверстий, град.	77
Диаметр сопловых отверстий, мм	0,159

Окончание табл. 3

Наименование параметра	Значение
Относительный диаметр камеры сгорания	0,67
Относительный диаметр горловины камеры сгорания	0,82
Относительная глубина	0,12
Относительная высота центрального выступа	0,6
Угол наклона верхней части стенки, град.	15
Угол наклона нижней части стенки, град.	15

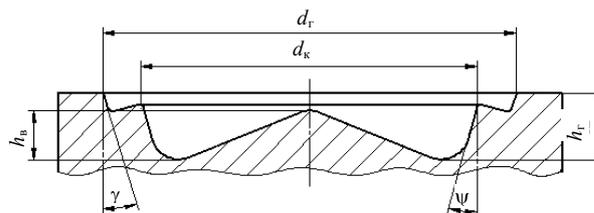


Рис. 3.  $d_r$  – диаметр горловины камеры сгорания;  $d_k$  – диаметр камеры сгорания;  $h_r$  – глубина камеры сгорания;  $h_b$  – высота центрального выступа;  $\gamma$  – угол наклона верхней части стенки;  $\psi$  – угол наклона нижней части стенки

Центральный выступ камеры сгорания спроектирован таким образом, чтобы обеспечить наиболее полное использование воздуха в ней. При этом попадание топлива на центральный выступ сведено к минимуму для всех режимов работы дизеля.

Камера сгорания состоит из двух объемов, что позволяет, с одной стороны, в широком диапазоне регулировать распределение топлива в надпоршневом пространстве и в камере сгорания, а с другой – создать две зоны с разной интенсивностью и структурой движения газов. Кроме того, расширение верхней части камеры и наклонное расположение ее стенки устраняют трудности, связанные с установкой свечей накалывания.

**ВЫВОДЫ**

Разработан программный комплекс для моделирования характеристик топливных струй и параметров камеры сгорания, включающий программу расчета рабочего процесса дизеля и компьютерную модель для согласования характеристик топливных струй с параметрами камеры сгорания дизеля. Модель позволяет визуально наблюдать развитие топливных струй в цилиндре дизеля в любой момент впрыскивания, рассчитывать характеристики струй с учетом формы и размеров камеры сгорания, опера-

тивно изменять характеристики впрыска топлива, параметры наддува, форму и размеры камеры сгорания. Кроме того, компьютерная модель позволяет на стадии проектирования дизеля определять параметры сопловых отверстий распылителя форсунки, обеспечивающие требуемые характеристики топливных струй.

Определены размеры камеры сгорания и характеристики впрыска топлива для дизеля 4ЧН11/12,5 мощностью 140 кВт.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кухаренок, Г. М.** Выбор параметров сопловых отверстий распылителей форсунок дизелей / Г. М. Кухаренок, Д. Г. Гершань // Многоцелевые гусеничные и колесные машины: актуальные проблемы и пути их решения: материалы междунар. науч. конф., посвященной 100-летию со дня рождения М. Ф. Балжи (16–17 октября 2008 г.). – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 106–112.
2. **Кухаренок, Г. М.** Моделирование характеристик топливных струй в цилиндре дизеля / Г. М. Кухаренок, Д. Г. Гершань // Вместе к эффективному дорожному движению: сб. науч. статей междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2008. – С. 112–116.
3. **Разлейцев, Н. Ф.** Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях / Н. Ф. Разлейцев. – Харьков, 1980. – 169 с.
4. **Кухаренок, Г. М.** Рабочий процесс высокооборотных дизелей. Методы и средства совершенствования / Г. М. Кухаренок. – Минск: БГПА, 1999. – 180 с.
5. **Кухаренок, Г. М.** Моделирование процесса сгорания топлива в дизелях с учетом паразитных объемов внутрицилиндрового пространства сжатия / Г. М. Кухаренок, Д. Г. Гершань // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: сб. науч. статей междунар. науч.-практ. конф. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 189–193.
6. **Семенов, Б. Н.** Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности / Б. Н. Семенов, Е. П. Павлов, В. П. Копцев. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 240 с.
7. **Грехов, Л. В.** Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учеб. для вузов / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с.
8. **Двигатели внутреннего сгорания:** в 3 кн. – Кн. 1: Теория рабочих процессов: учеб. для вузов / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 479 с.
9. **Кавтарадзе, Р. З.** Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учеб. для вузов / Р. З. Кавтарадзе. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 720 с.
10. **Системы управления дизельными двигателями:** пер. с нем. – М.: ЗАО «КЖИ» «За рулем», 2004. – 480 с.
11. **Файнлейб, Б. Н.** Топливная аппаратура автотракторных дизелей / Б. Н. Файнлейб. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 352 с.

Поступила 14.12.2010

УДК 621.436

## ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЕЗАКСАЖА КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

*Канд. техн. наук ВЕРШИНА Г. А.,  
инженеры ГАЛОНСКИЙ С. Э., ПИЛАТОВ А. Ю., ТАМКОВИЧ Е. С.*

*Белорусский национальный технический университет*

Одним из путей повышения удельной мощности двигателя внутреннего сгорания (ДВС) является осуществление двухтактного цикла. Экспериментальные исследования и сравнительные расчеты показывают, что литровая мощность двухтактного двигателя при прочих равных параметрах больше литровой мощности четырехтактного двигателя в 1,5–1,7 раза [1, 2].

В то же время бензиновые ДВС с кривошипно-камерной продувкой вследствие неизбежности выброса части горючей смеси в выпускное окно имеют более низкую экономичность и повышенную токсичность отработавших газов по сравнению с четырехтактными.

Улучшить характеристики двухтактных бензиновых ДВС можно за счет усовершенст-