

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФОРКАМЕРНО-ФАКЕЛЬНЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

А.К. Лимонов, главный конструктор; А.В. Сеземин, инженер .  
ОАО РУМО, г. Нижний Новгород

Представлены результаты работ, направленные на повышение экономичности и надежности работы газового двигателя ОАО РУМО 8ГЧН22/28 с форкамерно-факельным зажиганием. Показано влияние конструктивных и регулировочных параметров форкамеры на энергетические параметры факела, что оказывает существенное влияние на характер протекания рабочего процесса. Разработаны рекомендации по организации эффективного малотоксичного процесса газового двигателя.

Топливо-энергетическая и экологическая ситуация, складывающаяся в мире, свидетельствует о том, что природный газ, как моторное топливо, является реальной альтернативой жидким углеводородным топливам. Однако природный газ только тогда может считаться экологически безопасным топливом, когда решены проблемы оптимальной организации рабочего процесса газового двигателя (ГД) [2].

В настоящее время на ОАО РУМО проводятся работы, направленные на повышение экономических и экологических показателей газового двигателя 8ГЧН22/28 (рис. 1) с форкамерно-факельным зажиганием (ФФЗ). Основные технические характеристики приведены в табл. 1.

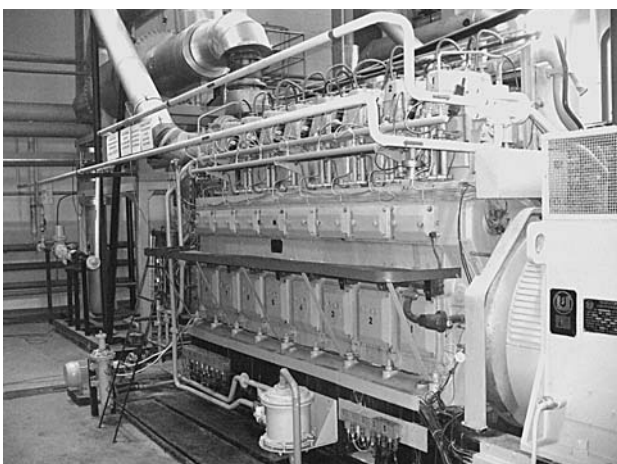


Рис. 1. Электроагрегат на базе газового двигателя 8ГЧН22/28 производства ОАО РУМО на электростанции в г. Строитель, Белгородская область

В процессе эксплуатации двигателей 8ГЧН22/28 в составе электроагрегата были выявлены значительные резервы повышения эффективности организации процесса сгорания топлива, связанные с исключением пропуска вспышек и детонации, в результате чего коэффициент полезного действия двигателя может быть значительно улучшен.

Поэтому основная цель настоящего исследования может быть сформулирована как разработка эффективного рабочего процесса двигателя 8ГЧН22/28, при котором будут обеспечены: приемлемый уровень экономических и экологических показателей; допустимый уровень теплового состояния и механической напряженности деталей цилиндра-поршневой группы (ЦПГ); приемлемый уровень степени нарастания давления в цилиндре двигателя.

Возможный комплекс мероприятий, направленных на совершенствование рабочего процесса газового двигателя с форкамерно-факельным зажиганием, приведен на рис. 2.

При конструировании ГД или доводке рабочего процесса ГД с ФФЗ к основному направлению его совершенствования следует отнести конструктивные мероприятия, связанные с эффективностью работы форкамеры. При выборе конструктивных параметров форкамеры необходимо учитывать, что ее главная функция — обеспечить эффективное сгорание обедненной смеси в цилиндре двигателя на всех режимах работы от пуска и холостого хода до номинальной мощности и 15 % перегрузки. Поэтому основным критерием конструктивного совершенства форкамеры является получение на выходе из форкамеры факела с необходимой энергией  $E$ , величина кото-

Таблица 1

Технические характеристики  
газового двигателя 8ГЧН 22/28

Номинальная мощность, кВт	1052
Частота вращения, об/мин	1000
Степень сжатия (геометрическая)	10,5
Часовой расход газа*, $\text{м}^3/\text{ч}$	310
Среднее эффективное давление, МПа	1,48

\* Расход указан при теплотворной способности газа 7950 ккал/ $\text{м}^3$ .



**Рис. 2. Пути совершенствования рабочего процесса газового двигателя с форкамерно-факельным зажиганием**

рой пропорциональна весу смеси  $G_{\phi}$ , сгорающей в форкамере и коэффициенту тепловыделения  $\xi$  [8]:

$$E = G_{\phi} \cdot H_{u\phi} \xi,$$

где  $H_{u\phi}$  — теплота, полученная от сгорания газовой смеси в форкамере.

С учетом того, что

$$G_{\phi} = V_{\phi} \rho_{\phi} \text{ и } H_{u\phi} = \frac{H_u}{1 + \alpha_{\phi} l_0},$$

где  $V_{\phi}$  — объем форкамеры;  $\rho_{\phi}$  — плотность смеси в форкамере;  $H_u$  — низшая теплота сгорания газа;  $l_0$  — теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания;  $\alpha_{\phi}$  — коэффициент избытка воздуха в форкамере, окончательно энергию факела можно определить по формуле

$$E = \xi V_{\phi} \rho_{\phi} \frac{H_u}{1 + \alpha_{\phi} l_0}. \quad (1)$$

В соответствии с формулой (1) энергия факела возрастает с увеличением объема форкамеры и плотности смеси в ней, т. е. с увеличением степени сжатия. Однако физическое увеличение объема форкамеры приводит не только к увеличению индикаторного КПД, но и к повышению теплонапряженного состояния деталей камеры сгорания и, как следствие, к увеличению выбросов  $\text{NO}_x$  и возникновению детонации. Поэтому совершенствование рабочего процесса должно идти по пути оптимизации конструкции форкамеры, суть которого состоит в нахождении оптимального компромисса между снижением энергии пламен-

ных струй (за счет снижения объема форкамеры) и реализацией соотношения между индикаторным КПД, детонационной стойкостью и необходимым уровнем выбросов вредных веществ с отработавшими газами [9].

Энергия факела, выходящего из форкамеры, должна быть достаточной для надежного воспламенения газовой смеси в камере сгорания. Исходя из этого условия, можно определить минимальный объем форкамеры и основные конструктивные параметры, влияющие на него. Из теории воспламенения Зельдовича Я.Б. [4] известно, что необходимая энергия воспламенения  $E_b$  зависит от теплопроводности рабочей смеси  $\lambda$ , теплоемкости

смеси  $c_p$ , низшей теплоты сгорания  $H_u$ , плотности газовой смеси в цилиндре  $\rho_{\text{ц}}$  и нормальной скорости распространения пламени  $u_n$ :

$$E_b = a \frac{\lambda^2 H_u}{c_p u_n \rho_{\text{ц}}}, \quad (2)$$

где  $a$  — постоянная величина.

Приравняв выражения (1) и (2), получаем формулу для расчета минимального объема форкамеры:

$$\phi_{\text{min}} = a \frac{\lambda^2}{c_p u_n \rho_{\text{ц}}} \cdot \frac{1 + \alpha_{\phi} l_0}{\xi \rho_{\phi}} = \Phi_{\text{ц}} \cdot \Phi_{\phi}, \quad (3)$$

где  $\Phi_{\text{ц}}$  — фактор влияния параметров цилиндра;  $\Phi_{\phi}$  — фактор влияния параметров форкамеры.

Из формулы (3) следует, что минимальный объем форкамеры должен снижаться с увеличением плотности газовой смеси, т. е. с увеличением степени сжатия. Обычно объем форкамеры составляет 2–7 % от объема камеры сжатия [1, 3, 6].

Эффективное использование располагаемой энергии для воспламенения смеси зависит в значительной степени от размеров факела и дальности его проникновения в сжатую рабочую смесь, что определяется размерами, конфигурацией и ориентацией выходного сопла форкамеры в объеме камеры сгорания.

Дальность факела — важнейший параметр, непосредственно влияющий на распределение топлива по объему камеры сгорания, способствуя более полному использованию воздуха в цилиндре двигателя. При этом длина факела должна согласовываться с выбранной фор-

мой камеры сгорания. Дальнобойность факела зависит от противодействия среды и скорости истечения газозвушной смеси, эффективного сечения сопловых отверстий и величины цикловой подачи. Диаметр сопловых отверстий и их количество влияют на объем топливного газа, поступающего как в полость цилиндра, так и в полость форкамеры для получения в ней к моменту подачи искры требуемого состава смеси.

Повышение дальнобойности факела и эффективность горения смеси (за счет турбулизирующего действия на заряд) в камере сгорания в значительной степени определяется отношением объема форкамеры  $V_f$  к суммарной площади сечения сопловых отверстий  $f_c$ . У существующих ГД с ФФЗ это отношение  $V_f/f_c = 15-70$  [1] и, как правило, уточняется при доводке рабочего процесса. При слишком больших отношениях  $V_f/f_c$  факел быстро пронизывает объем камеры сгорания ГД и может вызвать перегрев противоположной стенки. При слишком малом отношении  $V_f/f_c$  (т. е. при большом сечении сопловых отверстий) эффективность факельного зажигания снижается [3].

Уменьшение суммарной площади сечения сопловых отверстий приводит к задержке воспламенения в основной камере, но ускоряет последующий процесс основного турбулентного сгорания, что приводит к росту скорости нарастания давления и более жесткому сгоранию [7]. Это негативно сказывается на работе деталей ЦПГ и кривошипно-шатунного механизма. Скорость истечения из сопла форкамеры определяется плотностью смеси, температурой и перепадом давления в форкамере. Повышение перепада давления и скорости струи при уменьшении диаметра сопловых отверстий может вызвать слишком большие задержки воспламенения, вплоть до его прекращения [6, 7].

Количество сопловых отверстий определяет количество направленных факелов, выбрасываемых из форкамеры в основную камеру сгорания. При наличии одного соплового отверстия оптимального сечения можно предположить, что факел будет достаточно мощным, чтобы создать эффективные очаги горения бедной цилиндрической смеси. Однако центральное расположение форкамеры и одно сопловое отверстие не является оптимальным из-за возможности перегрева поршня или втулки цилиндра [1, 3]. Боковое расположение форкамеры и наличие одного соплового отверстия ухудшают условия сгорания основного заряда в связи с увеличением пути, проходимого пламенем от места зажигания [6]. Особенно нерационально боковое расположение форкамеры для больших ГД из-за наиболее благоприятных условий возникновения

детонации, а для ее предотвращения необходимо сокращать путь прохождения пламени.

При разделении оптимального сечения на несколько отдельных сечений энергия отдельных факелов уменьшается в связи с увеличением гидродинамических сопротивлений. Оптимальное количество сопловых отверстий зависит от объема камеры сгорания ГД, а также ее формы. При этом следует отметить, что увеличение числа отверстий малого диаметра не дает положительных результатов [6].

Наибольшая энергия факела требуется для устойчивой работы при наибольшем обеднении смеси в цилиндре, особенно это касается ГД с качественным регулированием. Воспламенение богатых смесей от мощного факела может вызвать нежелательное увеличение давления сгорания и жесткую работу двигателя.

Поэтому в ГД с ФФЗ целесообразно осуществлять регулировку энергии факела. При выбранных конструктивных параметрах форкамеры это возможно за счет реализации регулировочных мероприятий, таких как корректировка угла опережения зажигания, коэффициентов избытка воздуха и продувки форкамеры, регулирование давления перед автоматическим клапаном подачи газа в форкамеру.

При заданном ограничении максимального давления сгорания первоочередной задачей является обеспечение оптимальных параметров рабочего процесса. Одно из наиболее простых и эффективных способов решений поставленной задачи — регулирование угла опережения зажигания (УОЗ). При определении оптимальных параметров рабочего процесса за счет регулировки УОЗ необходимо учитывать изменение теплового состояния деталей ЦПГ. Анализ полученных индикаторных диаграмм ГД показывает, что увеличение УОЗ приводит к росту максимальных давлений сгорания и температур цикла. Одновременно возрастает время взаимодействия горячих

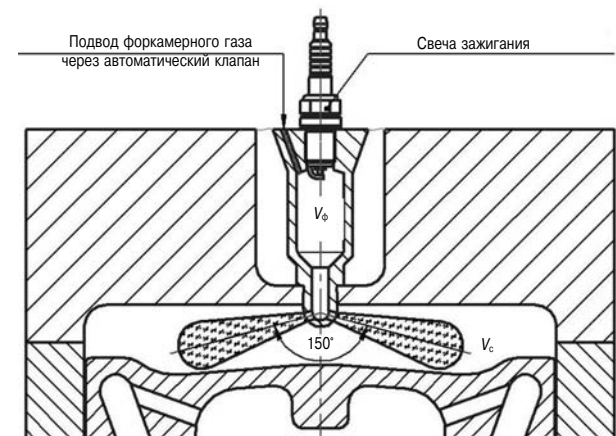


Рис. 3. Схема ФФЗ газового двигателя 8ГЧН 22/28

газов с поверхностями деталей ЦПГ, что приводит к их перегреву. Уменьшение УОЗ вызывает повышение температуры отработавших газов, что может вызвать прогорание выпускных клапанов и седел.

Величина УОЗ для каждого двигателя в большинстве случаев подбирается опытным путем и зависит от частоты вращения коленчатого вала, химического состава газа, нагрузки, а также от состава рабочей смеси.

Таким образом, определяющими факторами эффективного протекания рабочего процесса в цилиндре ГД с ФФЗ являются: объем форкамеры; количество, диаметр и расположение сопловых отверстий; фазы газораспределения и угол опережения зажигания.

В результате проведенных работ по доводке рабочего процесса газового двигателя 8ГЧН22/28 получено, что оптимальное соотношение объемов форкамеры и камеры сгорания составляет  $V_{\text{ф}}/V_{\text{с}} = 1,36\%$  ( $V_{\text{ф}} = 15,88 \text{ см}^3$ ). Форкамера имеет шесть сопловых отверстий диаметром 4 мм и углом между ними  $150^\circ$  (рис. 3) При значении угла опережения зажигания в диапазоне 26–28 град ПКВ до ВМТ и давлении форкамерного газа 0,18 МПа, часовой расход газа на номинальной мощности составляет  $290 \text{ нм}^3/\text{ч}$ .

При этих условиях КПД двигателя достигает 40%, а уровень выбросов  $\text{NO}_x$  не превышает  $250 \text{ мг}/\text{нм}^3$  при 5 %  $\text{O}_2$ , что соответствует нормам, принятым Экономической Комиссией ООН для Европы [5].

В результате выполненной оптимизации сохраняется условие конвертируемости дизельного двигателя указанной размерности в его газовую модификацию при сохранении фаз газораспределения с большим перекрытием впускных и выпускных клапанов с целью снижения температуры отработавших газов.

#### Литература

1. Васильев Ю.Н., Гриценко А.И., Золоторевский Л.С. Транспорт на газе. — М.: Недра, 1992. — 342с.
2. Гайворонский А.И. Марков В.А., Илатовский Ю.В. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях. — М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. — 480 с.
3. Генкин, К.И. Газовые двигатели. — М.: Машиностроение, 1977. — 196 с.
4. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт и др. — М.: Наука, 1980. — 478 с.
5. Мельник Г.В. Нормирование выбросов двигателей внедорожного применения: точка зрения двигателестроителей // Двигателестроение. — 2008. — № 2 (232). — С. 50–56.
6. Равкин А.А. Унифицированные газовые дизельные двигатели. — М.: Недра, 1967. — 196 с.
7. Соколик А.С. Карпов В.П. Форкамерно-факельное зажигание как основа нового класса двигателей / Сб. «Сгорание и смесеобразование в дизелях». — М.: АН СССР, 1960. — С. 125–142.
8. Шевцов Г.Е. Факельное зажигание в 2-тактном газовом двигателе // Труды ЦНИДИ. — 1964. — № 50. — С. 116–138.
9. Combustion concept for improvement of knocking limit and application to high performance gas engine / T. Takemoto, T. Nakazono, H. Nishizawa, T. Abe, K. Nishida // CIMAC Congress 2001, Hamburg. — P. 1073–1088.

#### НОВОСТИ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ

##### ЕВРО-4 В ДЕЙСТВИИ

31 декабря 2012 г. в соответствии с Техническим регламентом «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ», закончился срок действия одобрений типов транспортных средств и сертификатов соответствия автомобильной техники экологического класса 3 (Евро-3).

Таким образом, начало 2013 г. ознаменовало полноценное вступление в действие на территории Российской Федерации требований к выбросам вредных веществ автомобилями Евро-4. Новый уровень требований особо значим для отечественных производителей ватомобильных двигателей и коммерческих транспортных средств (грузовых автомобилей и автобусов), так как именно в этом сегменте автомобильной техники потребуются наиболее существенные изменения в конструкции и технологии производства, что объективно скажется на увеличении их стоимости. Базовые слагаемые технологий снижения вредных выбросов, освоенных в производстве двигателей и транспортных средств

экологического класса 4, при дальнейшем их усовершенствовании (как показывает зарубежный опыт) смогут обеспечить выполнение требований следующих этапов снижения выбросов вредных веществ до уровня Евро-5 и Евро-6.

В связи с этим реализация мероприятий, предложенных «Стратегией развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2020 года» и, в первую очередь, по инновационному обновлению и модернизации производства автомобильных двигателей и автомобилей — необходимое условие сохранения российского рынка для российского автопроизводителя.

Итак, Евро-4 в России в действии... Ближайшие три года покажут насколько чище станут российские мегаполисы и регионы, станут ли реальностью сформулированные в «Стратегии» ожидаемые конечные результаты и насколько эффективными окажутся механизмы модернизации отрасли автомобилестроения, предложенные вышеуказанной стратегией в условиях вступления России в ВТО.