

## ОПТИМИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СГОРАНИЯ В ДИЗЕЛЬНЫХ И ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА

С.Б. Милляев, зам. гл. конструктора,  
ОАО «Коломенский завод»

Нормативы вредных выбросов для мощных среднеоборотных двигателей становятся все более жесткими. Одной из главных проблем является снижение выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) при сохранении высокой топливной экономичности. Предложен метод для снижения максимальных температур цикла за счет позднего впрыска топлива и совмещения фазы максимальной скорости сгорания с моментом достижения максимальной скорости отвода тепла. Техническим результатом является эффективное снижение выбросов  $\text{NO}_x$  при заданном значении расхода топлива. Метод нашел применение на среднеоборотных двигателях внедорожного класса типа Д49 и Д500 при работе на дизельном и газообразном топливах.

### Введение

Известно, что количество выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  зависит от величин средней и локальных температур рабочего тела в камере сгорания. Чем выше эти температуры, тем больше скорость образования оксидов азота. Способы снижения  $\text{NO}_x$  хорошо известны [1, 2, 3], однако их практическая реализация, как правило, связана со снижением КПД рабочего цикла.

Целью исследования является снижение выбросов оксидов азота при заданном значении расхода топлива за счет снижения скорости нарастания давления и температуры рабочего тела посредством совмещения фазы максимальной скорости тепловыделения и периода максимальной скорости отвода тепла в стенки цилиндра.

### Методика исследований

В основу методики оптимизации показателей сгорания топлива и алгоритма ее реализации положено решение уравнений (1–5) на основе первого закона термодинамики, и уравнений кинематических функций (6–7) для кривошипно-шатунного механизма.

Принято допущение, что положение максимума скорости тепловыделения соответствует угловому положению поршня относительно верхней мертвой точки  $\alpha Q_{50}$ , при котором выделяется половина

общего количества теплоты при сгорании топлива. Это положение соответствует так называемому «центру тяжести сгорания», определяемому по интегральной характеристике тепловыделения. Целевое значение  $\alpha Q_{50 \text{opt}(\text{NO}_x \text{ min})}$ , при котором достигается минимальная скорость образования  $\text{NO}_x$  отвечает, в соответствии с данной методикой, максимуму относительной скорости увеличения объема цилиндра. Изменение объема характеризуется кинематическими функциями  $\gamma_k$  и  $\sigma_k$  для скорости и перемещения поршня. Начало сгорания  $\alpha_{\text{start}}$  соответствует моменту воспламенения, а конец сгорания  $\alpha_{\text{end}}$  — моменту достижения максимального количества выделившейся теплоты.

Тепловыделение:

$$\frac{dQ(\alpha)}{d\alpha} = \frac{k}{k-1} P(\alpha) \frac{dV(\alpha)}{d\alpha} + \frac{1}{k-1} V(\alpha) \frac{dP(\alpha)}{d\alpha} + \frac{dQ(\alpha)_w}{d\alpha}; \quad (1)$$

$$Q(\alpha) = \int_{\alpha_{\text{start}}}^{\alpha} \frac{dQ(\alpha)}{d\alpha} d\alpha, \quad Q = \int_{\alpha_{\text{start}}}^{\alpha_{\text{end}}} \frac{dQ(\alpha)}{d\alpha} d\alpha; \quad (2)$$

$$\alpha Q_{50} = \alpha \{|Q(\alpha) - 0,5Q| = \min|Q(\alpha) - 0,5Q|\}. \quad (3)$$

Снижение выбросов  $\text{NO}_x$ :

$$\Delta \alpha Q_{50} = \min(\alpha Q_{50} - \alpha Q_{50 \text{opt}(\text{NO}_x \text{ min})}); \quad (4)$$

$$\alpha Q_{50 \text{opt}(\text{NO}_x \text{ min})} = \alpha \{(1/V)(dV/d\alpha)\}_{\text{max}}; \quad (5)$$

$$\frac{1}{V(\alpha)} \frac{dV(\alpha)}{d\alpha} = \frac{\pi}{360} \frac{\gamma_k}{(1/(\varepsilon - 1) + \sigma_k/2)}. \quad (6)$$

Скорость и перемещение поршня:

$$\begin{aligned} \gamma_k &= \sin(\alpha)(1 + \lambda \cos(\alpha)), \\ \sigma_k &= 1 - \cos(\alpha) + 0,5\lambda \sin^2(\alpha). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $Q(\alpha)$  — количество теплоты, образующейся при сгорании топлива в функции от угла поворота кривошипа  $\alpha$ ;  $P(\alpha)$  — давление газов;  $V(\alpha)$  — объем цилиндра;  $Q(\alpha)_w$  — потери теплоты в стенки камеры сгорания;  $k = c_p/c_v$  — отношение теплоемкостей газов;  $\alpha Q_{50}$  и  $\alpha Q_{50 \text{opt}(\text{NO}_x \text{ min})}$  — фазовые показатели сгорания.

Выбор показателя оптимального сгорания  $\alpha Q_{50}$  имеет два ключевых преимущества. Во-первых, он может быть рассчитан непосредственно при наличии диаграммы давления в цилиндре. Во-вторых, он слабо зависит от межцикловой не-

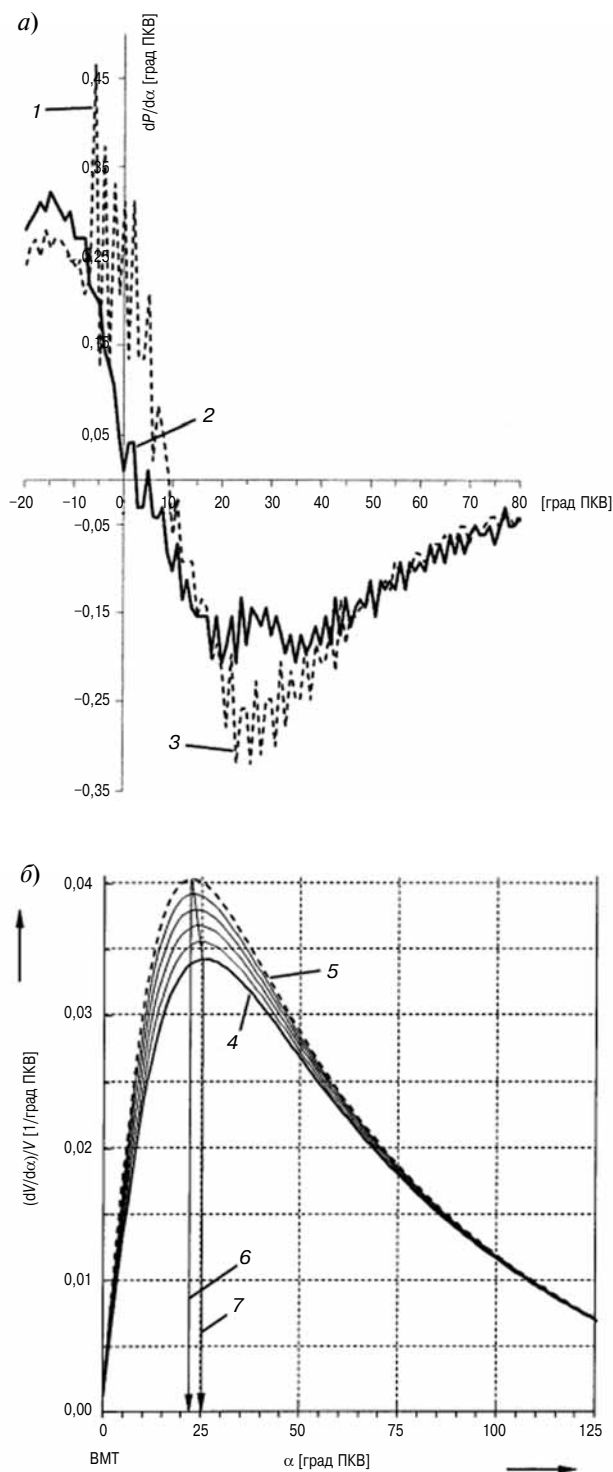
стабильности процесса сгорания и имеет хорошую повторяемость результатов. Начало и окончание сгорания, также как и пик скорости тепловыделения, напротив, более чувствительны к межцикловым изменениям давления и на выходе образуют «шумные» сигналы. В то же время значение показателя  $\alpha Q_{50}$  может быть надежно вычислено на всех режимах работы двигателя.

Экспериментальные исследования проводились на отсеках дизелей ОД49 и ОД500, полноразмерных двигателях типа 12ЧН26/26 (5-26ДГ-03, 21-26ДГ-01) и 12ЧН26,5/31 (12ЛДГ500), а также на отсеке двигателя ОД49, оборудованном для работы по газовому циклу с искровым зажиганием. Получены результаты испытаний газового двигателя в составе мотор-генератора 6ГМГ (12ГЧН26/26) промышленного применения.

### Результаты исследований

В ходе проведенных исследований установлено, что наибольший эффект по снижению образования  $NO_x$  можно реализовать путем организации смесеобразования и сгорания в фазе, при которой максимальная скорость тепловыделения соответствует максимальной относительной скорости увеличения объема цилиндра на такте рабочего хода, которая зависит лишь от углового положения кривошипа [4]. Что же касается определения фазы максимальной скорости тепловыделения, то она зависит от многих факторов и главным образом от параметров топливоподачи. Поставленная цель достигается путем корректировки угла начала впрыска топлива, что в сочетании с объемом цикловой подачи обеспечивает начало горения при заданном положении поршня. При этом достижение максимальной скорости сгорания обеспечивается при углах поворота кривошипа, соответствующих положению максимума относительной скорости увеличения объема цилиндра, когда имеет место наибольшая скорость отвода тепла. Процесс сгорания, преимущественно в диффузионной фазе, смещается на линию расширения, а максимум скорости тепловыделения соответствует фазе максимальной скорости изменения объема цилиндра. Благодаря быстрому отводу части тепла (внутренней энергии) от рабочего тела максимальные значения температур будут снижены. Такое протекание процесса сгорания повышает эффективность работы и обеспечивает минимальную скорость образования  $NO_x$ .

Скорость нарастания давления и максимальная температура газов снижаются в результате активного отвода теплоты от газов. Снижение расхода топлива и высокий КПД обеспечиваются при скоростях тепловыделения, достаточных для малой продолжительности сгорания, и оптимально согласованных с ходом поршня. Если большая



**Рис. 1.** Изменение скорости нарастания давления газов в дизеле  $dP/d\alpha$  [МПа/град ПКВ] и функции изменения объема цилиндра  $(dV/d\alpha)/V$  [1/град ПКВ] в зависимости от угла поворота кривошипа [4]:

*a* — графики изменения скорости нарастания давления  $dP/d\alpha$  при различных значениях угла опережения впрыска топлива (5 град ПКВ до ВМТ — сплошная линия, 10 град ПКВ до ВМТ — штриховая линия); *b* — графики изменения кинематической функции объема цилиндра  $(dV/d\alpha)/V$  на участке рабочего хода при различных значениях степени сжатия ( $\epsilon = 15$  — сплошная линия,  $\epsilon = 20$  — штриховая линия)

часть теплоты высвобождается слишком рано, возрастают потери теплоты в стенки камеры сгорания. Позднее выделение теплоты приводит к ухудшению термического КПД, высоким температурам отработавших газов и выбросу продуктов неполного сгорания топлива.

На рис. 1, а приведены графики скорости нарастания давления газов  $dP/d\alpha$  (МПа/град ПКВ) в цилиндре двигателя типа Д49 (12ЧН26/26) на режиме полной мощности  $P_e = 1470$  кВт при  $n = 750$  об/мин [4]. Штриховая линия соответствует углу начала впрыска топлива 15 град ПКВ до ВМТ, сплошная — 5 град ПКВ до ВМТ. Как видно на графиках, при раннем впрыске топлива (штриховая линия) начало горения сопровождается резким скачком давления в фазе 10 град ПКВ до ВМТ (поз. 1). Поздний впрыск топлива, при котором начало горения соответствует фазе 0 град ПКВ (ВМТ), приводит к значительному снижению скорости нарастания давления  $dP/d\alpha$  (поз. 2). В диапазоне углов 22–25 град ПКВ после ВМТ наблюдаются минимальные скорости нарастания давления (поз. 3), что свидетельствует о потере внутренней энергии газов при быстром увеличении объема цилиндра.

На рис. 1, б приведены графики относительной скорости изменения объема цилиндра  $(dV/d\alpha)/V$ , согласно уравнениям (6) и (7) [4]. Значение этого параметра, как следует из зависимостей для  $\gamma_k$  и  $\sigma_k$ , связана только с конструкцией двигателя ( $\lambda$  и  $\epsilon$ ). Численные расчеты показали, что величина  $\lambda$  (отношение радиуса кривошипа к длине шатуна) в пределах ее реальных значений 0,2–0,32 оказывает незначительное влияние на функцию изменения объема. При этом угловое отклонение положения экстремальных значений функции не более  $\pm 0,5$  град ПКВ. Существенное влияние на функцию изменения объема оказывает степень сжатия двигателя. Сплошная линия соответствует степени сжатия  $\epsilon = 15$  (поз. 4), штриховая — предельному значению  $\epsilon = 20$  (поз. 5).

Для двигателя типа Д49 в зависимости от степени сжатия положение максимума функции объема находится в диапазоне углов 22–25 град ПКВ после ВМТ (поз. 6 и 7). Испарение и выгорание топлива ускоряется за счет турбулизации заряда в пристеночных зонах, вызванной движением поршня. Интенсивность турбулентности зависит от функции изменения объема  $(dV/d\alpha)/V$ . Фаза максимальной скорости тепловыделения должна соответствовать положению максимума приведенной выше функции объема цилиндра.

На рис. 2 представлен опытный отсек дизеля ОД49 и типовой комплект датчиков для оценки качества процессов сгорания и впрыска топлива.



Рис. 2. Отсек двигателя ОД49 с комплектом датчиков для индицирования давления впрыска топлива, давления газов в процессах сгорания и газообмена

Помимо индицирования давлений регистрировались и другие параметры, необходимые для анализа, в том числе концентрации  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$  и дымность отработавших газов. Технические характеристики отсека: диаметр цилиндра 260 мм, ход поршня 260 мм, рабочий объем цилиндра 13,8 дм<sup>3</sup>, степень сжатия 12,5–16,5, номинальная частота вращения 1000 об/мин.

На рис. 3 приведены диаграммы давления газов  $P$  и давления топлива  $P_f$  на входе в форсунку. Для оценки фаз подачи топлива приведена диаграмма подъема иглы форсунки  $L_i$  по углу поворота коленчатого вала. Информация о характере впрыска топлива позволяет более точно определить

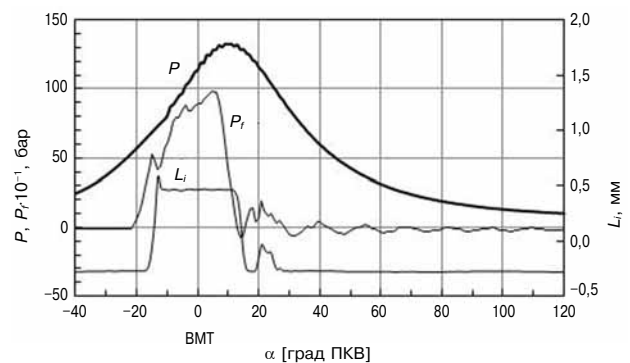


Рис. 3. Диаграммы впрыска топлива (давление топлива на входе в шелевой фильтр форсунки), подъема иглы форсунки и давления газов в камере сгорания двигателя ОД49 на режиме полной мощности

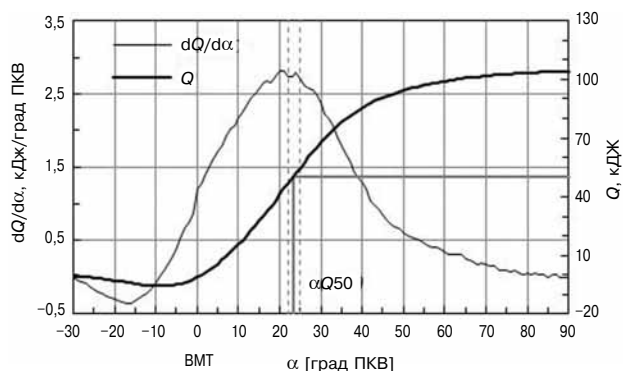


Рис. 4. Интегральная ( $Q$ ) и дифференциальная ( $dQ/d\alpha$ ) характеристики тепловыделения в цилиндре двигателя ОД49

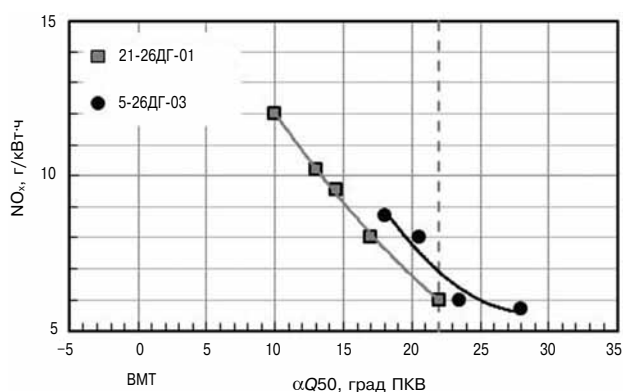


Рис. 5. Изменение удельных выбросов оксидов азота в зависимости от фазы сгорания  $\alpha Q_{50}$  тепловозных дизель-генераторов

фазовые показатели сгорания. На рис. 4 приведены результаты обработки диаграммы давления газов на тепловыделение.

На рис. 5 показано, что наименьший выброс  $NO_x$  на режиме полной мощности может быть достигнут при положении фазы сгорания 22 град ПКВ после ВМТ и более поздних фазах. Однако выбор оптимального значения показателя зависит от заданного уровня расхода топлива (согласно предложенной методике наиболее эффективной является фаза сгорания в диапазоне 22–25 град ПКВ после ВМТ).

Концепция снижения выбросов  $NO_x$ , изложенная выше, находит применение при разработке газовых двигателей. Детальные исследования процесса сгорания проводились на отсеке ОД49, оборудованном для работы на природном газе (рис. 6).

На двигателе установлена система зажигания Altronic CD200, электромагнитный клапан подачи газа 4ЭКГ.03, электронный регулятор частоты вращения ГЭРЧВ-01 (ООО «ППП Дизельавтоматика»). Поршень с «плоской» камерой сгорания, степень сжатия 12,6. Фазы газораспределения обе-

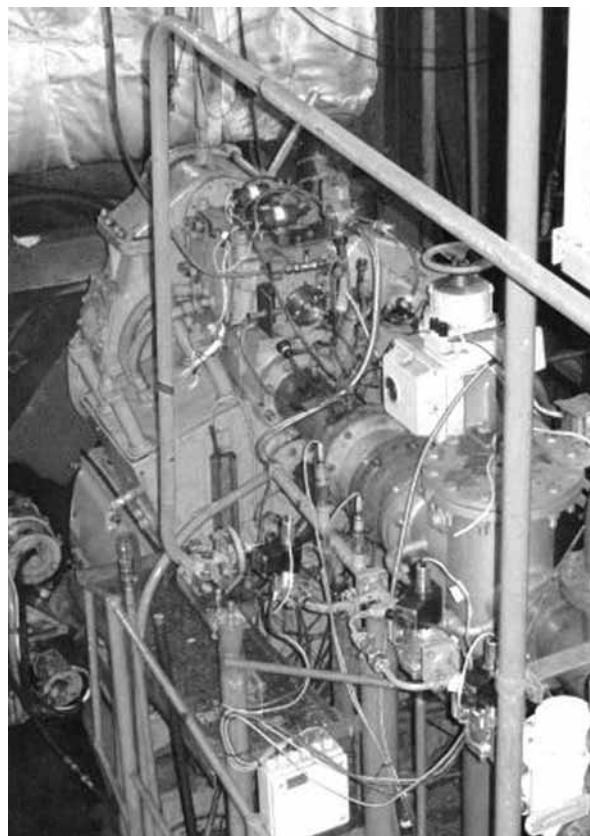
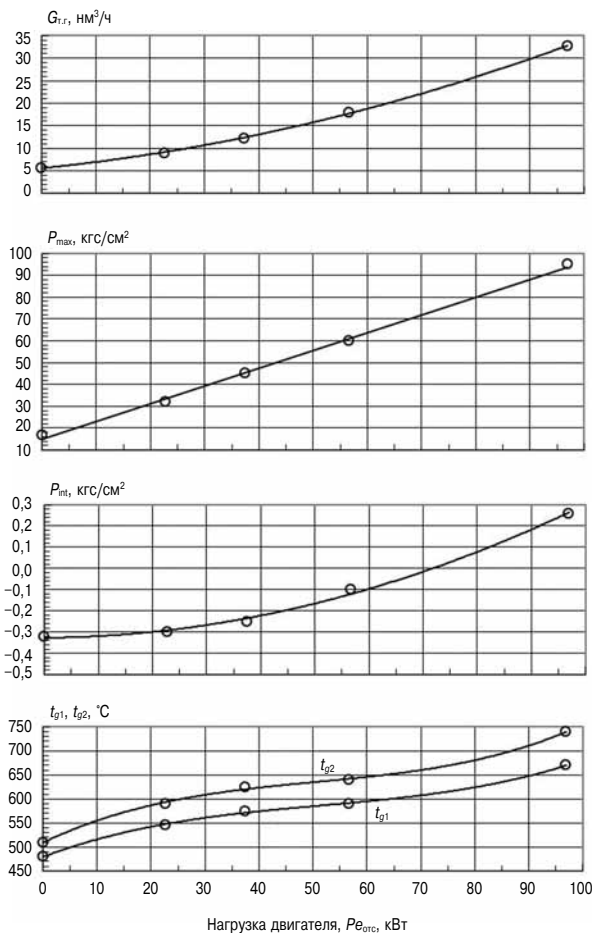


Рис. 6. Опытный одноцилиндровый газовый отсек ОД49 (1ГЧН26/26)

спечивали продувку цилиндра продолжительностью 45 град ПКВ. В ходе испытаний была выявлена область стабильной работы и выбраны регулировки двигателя на режимах газового двигателя-генератора 9ГМГ для маневрового теплового.

На рис. 7 приведены основные рабочие параметры отсека с оптимизированными значениями коэффициента избытка воздуха и угла опережения зажигания.

Доводка процесса сгорания на газовом отсеке включала применение различных вариантов источников искры. Применялись свечи с резбовым соединением М14×1,25 (GK3-5), М18×1,5 (GL3-5) и М18×1,5 (MPC 1900) со встроенной предкамерой. Испытания показали, что со свечой М18 концентрация  $NO_x$  на выпуске снижается на 10–15 % по сравнению с работой двигателя со свечой М14. Однако при этом увеличивается расход топлива примерно на 3 %. На границах стабильной области работы наблюдается детонация при значениях коэффициента  $\lambda$  (по датчику кислорода) меньше 1,1–1,2 и неполное сгорание газа, вплоть до пропуска вспышек —  $\lambda > 1,65$  на режиме полной мощности. Применение встроенной предкамеры (пассивного типа) расширяет области работы двигателя и позволяет при прочих равных условиях увеличить коэффициент  $\lambda$  на 0,1–0,2

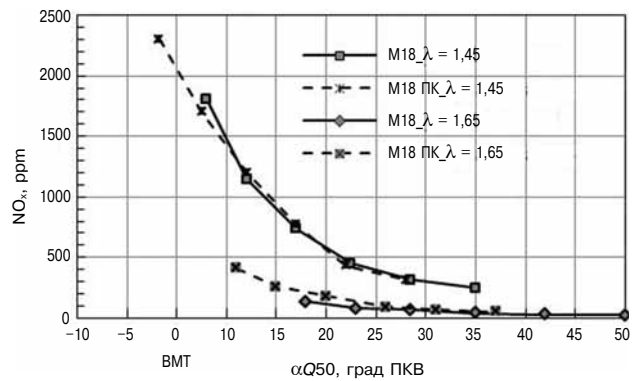


**Рис. 7. Параметры отсека ОД49 на режимах имитации тепловозной характеристики газового двигатель-генератора 9ГМГ ( $G_{т.г}$  — расход топливного газа,  $P_{max}$  — максимальное давление сгорания в цилиндре,  $P_{int}$  — давление воздуха в ресивере двигателя,  $t_{g1}$  и  $t_{g2}$  — соответственно температура газов за цилиндром и в выпускном коллекторе)**

единицы, как на полной мощности, так и на частичных нагрузках.

На рис. 8 показан характер изменения концентрации  $NO_x$  в отработавших газах в зависимости от фазы сгорания  $\alpha Q50$  при частичной нагрузке 35 %  $Pe$ . В диапазоне углов 22–25 град ПКВ предкамера свечи практически не влияет на выброс  $NO_x$ , однако уровень концентрации существенно зависит от состава смеси. Так, увеличение коэффициента  $\lambda$  от 1,45 до 1,65 приводит к снижению концентрации  $NO_x$  от 500 до 150 ppm.

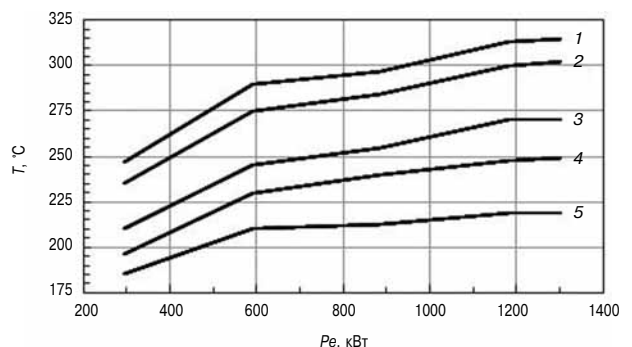
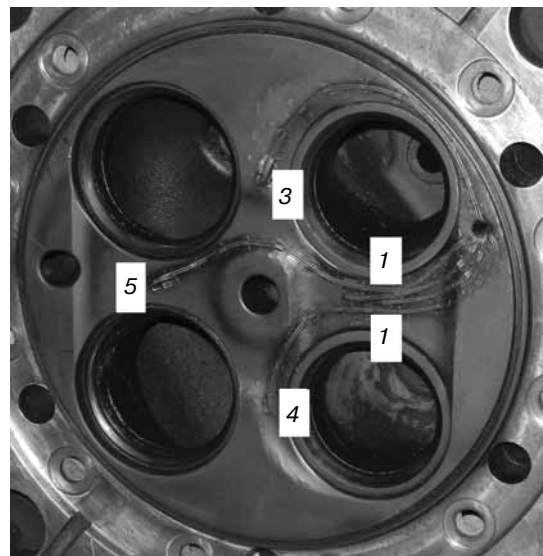
При работе газового двигателя характерно повышение температуры выпускных газов на выходе из цилиндра вследствие малой степени расширения продуктов сгорания и меньших, по сравнению с дизелем, скоростей сгорания метановоздушных смесей. Для оценки теплового состояния деталей камеры сгорания выполнено термометрирование крышки и втулки цилиндра с использованием хромель-алюмелевых термопар. Испытания двигателя в составе газового мотор-



**Рис. 8. Изменение концентрации  $NO_x$  на выпуске отсека ОД49 в зависимости от фазы сгорания  $\alpha Q50$  при нагрузке 35 %  $Pe$  ( $n = 770$  об/мин)**

генератора 6ГМГ (12ГЧН26/26) проводились на режимах нагрузочной характеристики при  $n = 1000$  об/мин. Термопары заключались в трубки из нержавеющей стали с внутренним диаметром 1,2 мм. На огневом днище крышки цилиндра спаи термопар приваривались импульсной сваркой к поверхности днища (рис. 9).

На режиме максимальной мощности 1300 кВт температура днища между выпускными клапанами



**Рис. 9. Результаты термометрирования газового мотора (12ГЧН26/26) на режимах нагрузочной характеристики при  $n = 1000$  об/мин**

составила 315 °С (температура втулки цилиндра в районе газового стыка 140 °С), что обеспечивает необходимый запас прочности. Допустимые значения температур крышек цилиндров из высокопрочного легированного чугуна не должны превышать 350 °С.

В качестве топлива применялся природный газ следующего состава:  $\text{CH}_4 = 96\%$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,2\%$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,7\%$ ,  $i\text{-C}_4\text{H}_{10} = 0,1\%$ ,  $n\text{-C}_4\text{H}_{10} = 0,1\%$ ,  $\text{CO}_2 = 0,2\%$ ,  $\text{N}_2 = 0,7\%$ . Оценку применимости газового топлива целесообразно проводить по метановому числу [2], которое для данного газа составляет не менее 85 ед. Газовый мотор в комплектации с модернизированным поршнем имел геометрическую степень сжатия 12,6. Высокая детонационная стойкость газа позволяет обеспечить надежную работу в диапазоне углов опережения зажигания до 32–36 град ПКВ до ВМТ и значениях коэффициента избытка воздуха до 1,4–1,5 по датчику кислорода при нагрузках, близких к полной мощности.

Процесс сгорания с низким выбросом  $\text{NO}_x$  связан с решением проблемы нестабильности горения обедненных смесей. Область работы двигателя определяется, главным образом, границами детонации и пропуска вспышек. Обе границы сближаются для более высоких значений коэффициента избытка воздуха и среднего эффективного давления. Конкретные значения параметров и их пределы сильно зависят как от свойств газа, так и от системы сгорания (источника искры, способа подачи газа), частоты вращения и размеров цилиндра двигателя.

#### Выводы

1. В рассмотренной методике реализуется возможность использования кинематической функции изменения объема цилиндра для определения фазовых показателей сгорания в целях снижения выбросов  $\text{NO}_x$ , как в дизельных двигателях, так и в газовых двигателях с искровым зажиганием.

2. Наибольший эффект в снижении выбросов  $\text{NO}_x$  достигается путем организации процесса сгорания в фазе, при которой максимальная скорость тепловыделения соответствует максимуму относительной скорости увеличения объема цилиндра на такте рабочего хода, которая в свою очередь зависит лишь от углового положения кривошипа.

3. Главной проблемой для газовых двигателей является обеспечение стабильного сгорания при высоком КПД, поэтому требуется оценка влияния на процесс сгорания конструкции двигателя, системы подачи газа и зажигания, внешних условий на впуске и выпуске, состава топливного газа.

#### Литература

1. *Никитин Е.А.* Многотопливный, перспективный и экологически чистый / Е.А. Никитин, Э.А. Улановский, В.А. Рыжов, С.Б. Миляев // Двигатель. — 2000. — № 5–6 (11–12). — С. 50–52.
2. *Рыжов В.А.* Опыт эксплуатации двигателей Д49 на топливах широкого фракционного состава / В.А. Рыжов, Э.А. Улановский, С.Б. Миляев // Сб. науч. трудов. — Вып. 23: Двигатели и энергоустановки. — Харьков: ХАИ, 2001. — С. 174–177.
3. Пат. 2163975 Российская Федерация, МПК7 F 02 В 3/12. Способ работы двигателя внутреннего сгорания / Никитин Е.А., Улановский Э.А., Миляев С.Б. [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО НВФ «Конвер». — № 2000103288/06; заявл. 14.02.2000; опубл. 10.03.2001, Бюл. № 7. — 4 с. : ил.
4. Пат. 2634343 Российская Федерация, МПК7 F 02 В 3/12. Способ работы двигателя внутреннего сгорания / Рыжов В.А., Миляев С.Б.; заявитель и патентообладатель ОАО ХК «Коломенский завод». — № 2015154881; заявл. 22.12.2015; опубл. 25.10.2017, Бюл. № 30. — 9 с. : ил.
5. *Рыжов В.А., Печенин В.В.* Совершенствования дизелей 16Д49 дизель-дизельных агрегатов 1ДДА12000 кораблей корвет проекта 20380 // Двигателестроение. — 2014. — № 1 (255). — С. 12–19.