

УДК 621.43

**Влияние формы камеры сгорания  
на характеристики и образование NO<sub>x</sub> в газовом двигателе с  
принудительным воспламенением**

**А.С. Голосов**

Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана

**The influence of the shape of the combustion chamber on the characteristics and  
the formation of NO<sub>x</sub> in the gas engine with spark ignition**

**A.S. Golosov**

*Bauman Moscow State Technical University*

*Исследуется влияние формы камеры сгорания газового двигателя. Форма камеры сгорания влияет на эффективные показатели двигателя и эмиссию вредных веществ. Верификация модели рабочего процесса газового двигателя была проведена путем сравнения результатов численных экспериментов с опытными данными, полученными в стендовых условиях на газовом двигателе с искровым зажиганием. Проведено моделирование процессов двигателя для четырех вариантов форм камеры сгорания. Моделирование проводилось в трёхмерной постановке в программном комплексе AVL-Fire. Показано изменение средней кинетической энергии турбулентности по углу поворота коленчатого вала для различных форм камеры сгорания. Показано влияние формы камеры сгорания на эффективные и экологические показатели газового двигателя с искровым зажиганием.*

*Ключевые слова: газовый двигатель, токсичность двигателя, метод трехмерного моделирования рабочих процессов*

*Keywords: gas engine, the toxicity of the engine, the method of three-dimensional modeling intake*

**Введение**

При переводе дизеля на природный газ с воспламенением от электрической искры для предотвращения детонации требуется снизить степень сжатия посредством изменения конструкции камеры сгорания. В ходе исследования установлено, что при использовании  $\omega$ -образной камеры

сгорания, обеспечивающей наилучшие эффективные показатели, можно значительно снизить выбросы оксидов азота путем регулирования угла опережения зажигания в зависимости от режимов частичной нагрузки.

В данной работе исследуется рабочий процесс газового двигателя с искровым зажиганием и турбонаддувом КАМАЗ-740.13.Г-260 со следующими параметрами: ход поршня/диаметр цилиндра  $S/D=120/120$  мм/мм, номинальная эффективная мощность  $N_e=176$  кВт при частоте вращения коленчатого вала  $n=2200$  мин<sup>-1</sup>, степень сжатия  $\epsilon=11,25$ . Ввиду того, что двигатель работает на обедненных смесях (коэффициент избытка воздуха  $\alpha_v \geq 1,3$ ), была снижена степень сжатия путем доработки камеры сгорания в поршне.

Поэтому целью данной работы является исследование влияния формы камеры сгорания на эффективные и экологические показатели газового двигателя и определение возможностей снижения выбросов оксидов азота путем регулирования угла опережения зажигания. Задача является актуальной для двигателей, работающих на частичной нагрузке, в частности для автомобильных газовых двигателей.

### **Математическая модель рабочего процесса**

Достоверное исследование формы камеры сгорания возможно проводить только на базе трехмерных математических моделей рабочего процесса, что подтверждает практика ведущих компаний. Действительно, для определения эмиссии вредных веществ или теплонапряженного состояния основных деталей камеры сгорания, необходимо осуществлять с применением локальных параметров, которые надежнее получить в трехмерной постановке.

Проблемы и преимущества конвертирования серийных дизелей на альтернативные топлива подробно проанализированы в [1, 2], поэтому здесь отметим только, что перевод дизеля на газовое топливо по существу снимает проблему эмиссии твердых частиц сажи.

Заметим, что образование  $NO_x$  происходит на основе термического механизма, а, следовательно, требуется расчет локальных нестационарных

температур в объеме КС, что можно осуществить только с помощью многозонной модели рабочего процесса.

Модель рабочего процесса, используемая в данной работе, основана на трехмерных фундаментальных уравнениях количества движения (Навье–Стокса), энергии (Фурье–Кирхгофа), диффузии (Фика) и неразрывности, которые после осреднения по методу Фавра принимают форму Рейнольдса. Для замыкания системы уравнений Рейнольдса используется  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности. Процесс турбулентного горения моделируется с помощью известной модели Магнуссена – Хартагера, а процесс образования оксидов азота, как было отмечено, – на основе расширенного механизма Зельдовича. Реализация общей математической модели рабочего процесса газового двигателя осуществляется с применением 3D CRFD-кода AVL-FIRE.

Подробный анализ используемых моделей, а также описание программного комплекса AVL FIRE, изложены в [9]. Отметим только, что в случае газового двигателя в отличие от дизеля на традиционном топливе из общей модели рабочего процесса исключаются процессы образования сажи и лучистого теплообмена.

Верификация модели рабочего процесса газового двигателя была проведена путем сравнения результатов численных экспериментов с опытными данными, полученными в стендовых условиях на газовом двигателе с искровым зажиганием. По экспериментальным индикаторным диаграммам были уточнены значения эмпирических коэффициентов в модели сгорания Магнуссена – Хартагера, обеспечивающие хорошее согласование опытных и расчетных данных. Верифицированная модель рабочего процесса газового двигателя далее была использована для исследования эффективных и экологических показателей двигателя с различными конструкциями КС.

### **Влияние формы камеры сгорания на кинетическую энергию турбулентности**

Исследования проводились для четырех вариантов экспериментальных полуразделенных КС – симметричной, смещенной, конической,  $\omega$ -образной. В

ряде исследований [1, 5, 6], посвященных анализу газового двигателя, приведены характеристики исследуемых камер и показано, что форма КС оказывает значительное влияние на уровень турбулентности, а в результате и на протекание процесса сгорания.

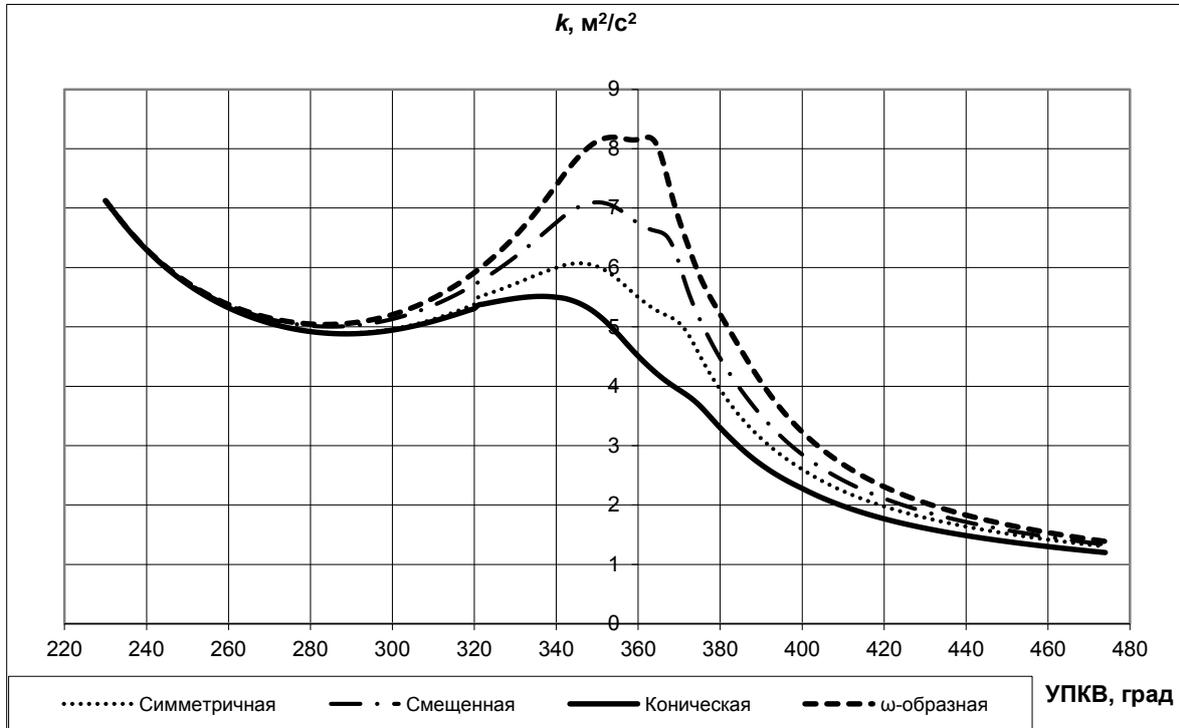


Рис. 1. Изменение средней кинетической энергии турбулентности в цилиндре газового двигателя в зависимости от формы камеры сгорания на режиме частичной нагрузки:

$$n=1550 \text{ мин}^{-1}, P_a=1,453 \text{ бар}, \alpha_B=1,5; \theta = -21 \text{ }^\circ\text{УПКВ}$$

Видно, что высокий уровень турбулентности, характерный для процесса впуска, заметно снижается с приближением поршня к верхней мертвой точке (ВМТ) для всех форм КС. К концу процесса сжатия вихревое движение в камере, расположенной в поршне, усиливается, и кинетическая энергия турбулентности повышается из-за течения из надпоршневого объема. Своего максимального значения кинетическая энергия турбулентности достигает при нахождении поршня вблизи ВМТ, т.к. этому способствует образование очага сгорания в области свечи зажигания.

Видно, что для  $\omega$ -образной КС при нахождении поршня в ВМТ величина кинетической энергии турбулентности в цилиндре имеет наибольшее значения из представленных КС.

### Влияние формы КС на токсичность двигателя

Наилучшими эффективными показателями рабочего цикла из всех исследуемых вариантов обладает  $\omega$ -образная КС. Но в то же время, высокие локальные температуры цикла становятся причиной интенсификации образования оксидов азота (рис. 2). С другой стороны, использование конической КС показывает худшие эффективные показатели газового двигателя.

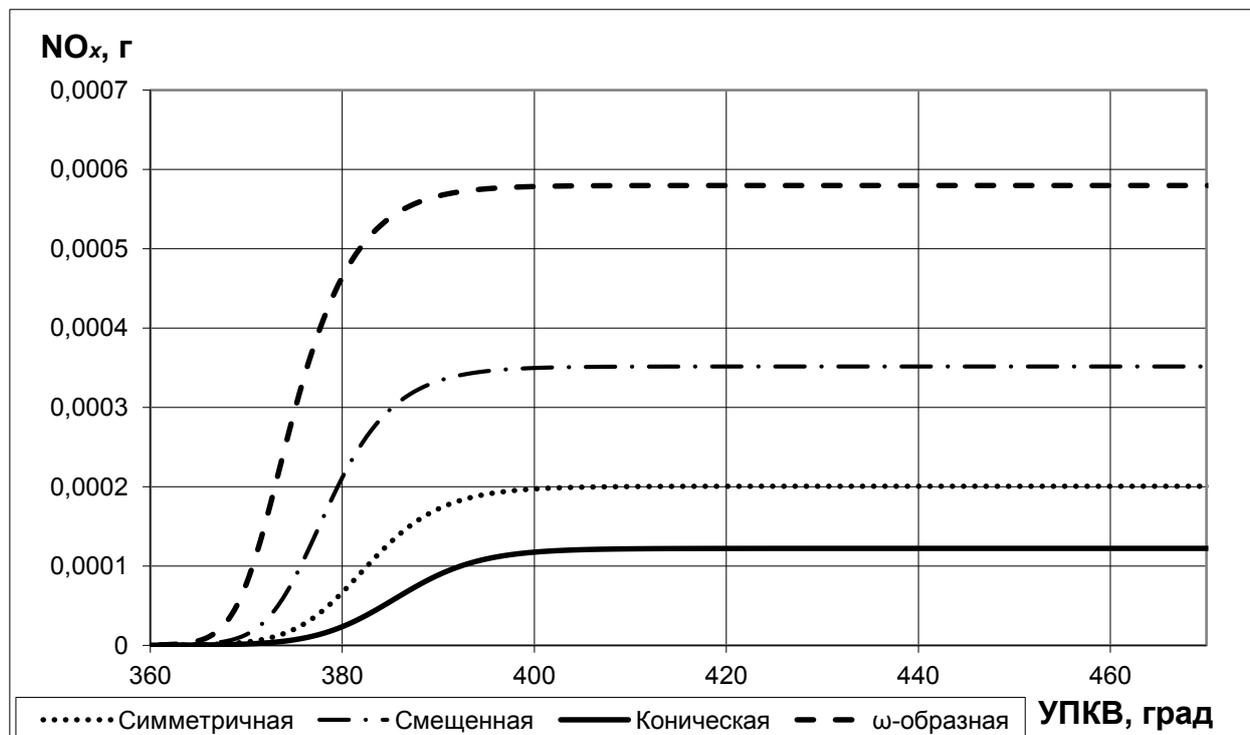


Рис. 2. Изменение массы образовавшихся за цикл оксидов азота в цилиндре газового двигателя в зависимости от формы камеры сгорания (режим частичной нагрузки)

В целом, по результатам численных экспериментов, приведенным выше, видно, что с точки зрения эффективных показателей двигателя наилучшим вариантом является  $\omega$ -образная КС. Использование такой КС приводит к оптимальным значениям максимального давления цикла  $p_z$  и скорости

тепловыделения, а в итоге – к лучшим эффективным показателям газового двигателя [6]. Однако с экологической точки зрения использование  $\omega$ -образной КС в газовом двигателе требует снижения эмиссии оксидов азота, а также уровня тепловых нагрузок на основные детали.

Таким образом, при применении природного газа в качестве моторного топлива на серийных дизелях с принудительным зажиганием, особое внимание следует уделить форме камеры сгорания. Подтверждена непосредственная связь между кинетической энергией турбулентности и скоростью тепловыделения в КС газового двигателя. Численные эксперименты, приведённые в данной работе, показали, что наибольшей турбулентностью характеризуется  $\omega$ -образная КС, а наименьшей – коническая.

Очевидно, что метод трехмерного моделирования рабочего процесса, используемый в данной работе, позволяет определить угол опережения зажигания, обеспечивающий оптимальное сочетание эффективных и экологических показателей газового двигателя в зависимости от формы камеры сгорания.

### **Литература:**

[1] Кавтарадзе Р.З. *Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород*. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 238 с.

[2] Kavtaradze R.Z., Natriashvili T.M., Zelentsov A.A. Ignition Delay and Emission of the Noxious Substances in Double-Fuel Engines Working on the natural Gas and Syngases / Chapter 15 (p. 109-120) in the Book: Innovative Methods for Improvement of Technical, Economic and Ecological Efficiency of Motor Cars (ISBN:978-1-63463-671-1). – New-York: NOVA-Publishers, 2015. – 138 p.

[3] Кавтарадзе Р.З. Улучшение экологических показателей водородного дизеля с непосредственным впрыскиванием газообразного водорода. РАН // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – Т. 45. – № 4. – С. 20-29.

[4] Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 3-е изд. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 515 с.

[5] Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. 2-е изд. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 589 с.

[6] Леонтьев А.И., Кавтарадзе Р.З., Шибанов А.В., Зеленцов А.А., Сергеев С.С. Влияние формы камеры на нестационарные процессы переноса и

турбулентного сгорания в дизеле, конвертированном в газовый двигатель // Известия РАН, «Энергетика». – 2009. – № 2. – С. 49-63.

[7] Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Голосов А.С. Численная методика расчета концентрации  $\text{NO}_x$  на основе многозонной модели рабочего процесса дизеля. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015617793. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22.07.2015.

[8] Леонтьев А.И., Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Голосов А.С., Панкратов С.А. Повышение эффективности рабочего процесса поршневого двигателя путем прямого преобразования теплоты выпускных газов в электрическую энергию // РАН. Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54. – № 1. – С. 99-107.

[9] Кавтарадзе Р.З., Зиновьев И.А. Влияние частичной гомогенизации процесса сгорания на экологические показатели дизеля. ISSN 0236-3933. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-113-127 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2016. – № 4. – С.113-127.

[10] FIRE. Users Manual. Version 2015. AVL List GmbH Graz, Austria, 2015. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL FIRE between Moscow State Technical Univ. n.a. N.E. Bauman and AVL List GmbH, 2015).

[11] Шибанов А.В. Влияние конструктивных и регулировочных факторов на образование вредных веществ в быстроходном дизеле, конвертированном на природный газ // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – 2007. – 145 с.