

## Исследования процессов сгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания

**Масленников Дмитрий Александрович**  
Донецкий национальный технический университет,  
г. Донецк

### *Аннотация*

*Система сжигания с гомогенным зарядом и воспламенением от сжатия является одним из наиболее перспективных решений, используемых в поршневых двигателях. В статье представлены результаты трехмерного моделирования горения в двигателе с системой сжигания с гомогенным зарядом. Были проанализированы параметры горения, такие как: начало сгорания, концентрация оксида азота и сажи в выхлопных газах.*

***Ключевые слова:** рециркуляция отработавших газов, скорость выделения тепла, начало воспламенения, продолжительность горения, впрыск топлива, двигатель с воспламенением от сжатия, индикаторное давление, оксиды азота.*

## Modeling of combustion processes in internal combustion engines

**Maslennikov Dmitry**  
Donetsk national technical university,  
Donetsk

### *Abstract*

*A combustion system with homogeneous charge and compression ignition is one of the most promising solutions used in piston engines. The paper presents the results of three-dimensional modeling of combustion in an engine with a combustion system with a homogeneous charge. The main parameters of combustion, such as: the beginning of combustion, the duration of combustion, the indicator pressure, the concentration of nitrogen oxide and soot in the exhaust gases, were analyzed.*

***Keywords:** exhaust gas recirculation, heat release rate, ignition start, duration of combustion, fuel injection, compression ignition engine, indicator pressure, nitrogen oxides.*

### **Введение**

Система сжигания с гомогенным зарядом (HCCI - Homogenous Charge Compression Ignition) теперь является одним из наиболее перспективных решений, используемых в поршневых двигателях. Такой двигатель сочетает в себе лучшие характеристики двигателей с искровым зажиганием и двигателя с воспламенением от сжатия и характеризуется низким уровнем содержания вредных соединений в выхлопных газах и высокой эффективностью. До сих пор проведенные исследования на двигателе с системой сжигания с гомогенным зарядом не решали проблему контроля момента самовоспламенения гомогенной смеси, подаваемой в двигатель, и продолжительности процесса горения. Представленная работа касается численного исследования процесса горения гомогенных смесей в двигателе с системой сжигания с гомогенным зарядом и воспламенением от сжатия. Были проанализированы основные параметры горения, включая начало воспламенения, продолжительность горения, индикаторное давление и концентрация оксида азота и сажи. Проведено моделирование этих процессов в программном комплексе CFD (computational fluid dynamics - вычислительная гидродинамика). Целью моделирования было ознакомление с ходом процесса горения в двигателе с системой сжигания с гомогенным зарядом. Выполнено сравнение основных параметров неконтролируемого горения с контролируемым сгоранием в обычном двигателе с воспламенением от сжатия.

## Состояние исследований

Процессы смесеобразования являются основным звеном в цепи обработки химической энергии, содержащейся в топливе, в механическую энергию, которая может быть использована для привода машин и устройств. Учитывая возрастающие экологические требования, которые также являются существенным барьером развития двигателестроения, преодоление которых может влиять на дальнейшее развитие этих машин и устройств, в которых происходит процесс горения топлива.

В настоящее время в мире наблюдается явный рост интереса исследования, связанного с поиском более эффективных процессов преобразования химической энергии в механическую энергию, более эффективных как с точки зрения экологии, так и энергетики. Проводимые исследования направлены на лучшее понимание явлений, связанных с распылением топлива и его сгорания и последующим управлением этими процессами. Подробное рассмотрение и описание этих явлений и процессов позволит нахождению новых, более эффективных методов управления процессом сгорания. Принимая во внимание необходимость соблюдения производителями двигателей внутреннего сгорания, предусмотренных стандартов выбросов токсичных веществ, интерес к исследованиям процессов сгорания будет в ближайшие годы возрастать.

Непосредственный впрыск топлива в цилиндр должен обеспечивать получение гомогенного горения, которое используется в системах впрыска топлива во впускной коллектор. Также должны – и это в настоящее время основные направления научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок – обеспечивать получение гетерогенной (послойной) топливно-воздушной смеси, обеспечивающей сжигание бедных смесей. В связи с этим, системы бензиновых двигателей становятся схожими на системы сгорания, используемых в дизельных двигателях.

Использование непосредственного впрыска топлива высокого давления в ДВС, в настоящее время основное направление исследований. Это позволяет любому количественное и качественное развитие способа получения горючей смеси и влияет на способ последующее сгорание.

В многих исследовательских центрах и университетах по всему миру проводятся работы по исследованию процессов, происходящих в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания с системой подачи гомогенного заряда и воспламенения от сжатия. А также влияние этих процессов на концентрацию вредных компонентов в выхлопных газах и возможности реализации этой системы в реальном двигателе. В работе [1] кратко описывается история происхождения, результаты исследований, преимущества и проблемы, вытекающие из конкретного процесса горения, характерного для двигателей с системой сжигания с гомогенным зарядом и воспламенения от сжатия, которые существенно отличаются от хорошо известных и широко используемых бензиновых и дизельных двигателей. Прошло более двадцати лет с тех пор, как концепция двигателя с системой сжигания с гомогенным зарядом была впервые предложена и продемонстрирована. За это время в развитии этой технологии был достигнут устойчивый прогресс. Исследования в этом направлении доказывают, что двигатель, работающий в режиме сжигания с гомогенным зарядом и воспламенением от сжатия, может работать с использованием различных видов топлива при чрезвычайно низких выбросах и высокой эффективностью. В последние годы технология двигателей с подачей гомогенного заряда и воспламенением от сжатия (HCCI) внедряется повсеместно благодаря своим исключительным преимуществам с точки зрения высокой эффективности и низких выбросов NOx и сажи [2]. Однако существуют и нерешенные проблемы такие как: контроль начала и продолжительности горения, высокую концентрацию оксидов углерода и несгоревших углеводородов в выхлопных газах, ограниченный рабочий диапазон нагрузок, применение искрового зажигания на высоких нагрузках. Разработано несколько стратегий контроля над смесью, которые в настоящее время рассматриваются как варианты решения этих проблем. К ним относятся различные схемы впрыска топлива, такие как непосредственный впрыск топлива, одноступенчатая или многоступенчатая подача топлива в

цилиндры (DI или MDI), а также внешняя и внутренняя рециркуляция отработавших газов (EGR), регулируемая фаза газораспределения и степень сжатия. Двигатели с системой сжигания с гомогенным зарядом (HCCI) в настоящее время является основным направлением в развитии бензиновых двигателей внутреннего сгорания. В работе [3] представлена конструкция и реализация исследовательского двигателя с прямым впрыском топлива и возможностью сгорания HCCI путем применения внутренней рециркуляции отработавших газов, реализованной путем перекрытия выпускных клапанов. Такое решение, используемое в двигателе, допускает работу HCCI на различных нагрузках и переменной частоте вращения коленчатого вала двигателя без необходимости применения воспламенения от искрового разряда. Использование прямого впрыска бензина в цилиндры двигателя и управление внутренней рециркуляцией выхлопных газов, позволило влиять на процесс сгорания и управлять скоростью выделения тепла.

В работе [4] представлены результаты исследования влияния начальной температуры и состава горючей смеси на работу двигателя на основе принципа HCCI.

Исследователи обнаружили, что существует определенное значение начальной температуры смеси (приблизительно  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Дальнейшее повышение температуры не вызывает какого-либо значительного увеличения максимального давления процесса горения, скорости нарастания давления и задержки самовоспламенения. Начальное значение температуры зависит от состава горючей смеси и ее состояния перед процессом сжатия. В работе [5] исследуются основные параметры горения в бензиновом двигателе с гомогенным зарядом с воспламенением от сжатия, такие как: начало и продолжительность горения, содержание в отработавших газах монооксида углерода (CO), несгоревших углеводородов (HC), оксидов азота (NOx). Проведена оценка влияния на процесс горения двух видов топлива, гептан и изооктан, а также их смеси.

Установлено что температура всасываемого заряда оказывает наиболее существенное влияние на характеристики горения HCCI.

В этой статье процесс горения в двигателе HCCI был исследован и проанализирован при помощи моделирования процессов происходящих внутри цилиндра с применением программ вычислительной гидродинамики, использовалась компьютерная модель горения. Проведен анализ основных параметров горения, таких как начало воспламенения, продолжительность горения, индикаторное давление, концентрация оксида азота (NO) и сажи в камере сгорания двигателя с системой сжигания гомогенного заряда и воспламенением от сжатия (HCCI).

Компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных систем. Развитию численного моделирования физических и химических процессов способствует увеличение вычислительной мощности техники, что позволяет использовать более совершенные математические модели. Возросшая вычислительная мощность позволяет моделировать не только процессы потока жидкости и газа, но и процессы горения, а так же процессы теплообмена [6].

Современные программные пакеты позволяют моделировать потоки жидкости и газа, тепловые процессы, которые происходят во впускном коллекторе, выхлопной трубе с катализатором и сажевым фильтром и камере сгорания двигателя внутреннего сгорания. Это позволяет смоделировать процессы переноса тепла, смесеобразование, воспламенения и турбулентное горение в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания. Возможно создание моделей горения однородных и неоднородных топливно-воздушных смесей в бензиновых двигателях с воспламенением от сжатия. Кинетика явлений химических реакций описывается моделями сгорания, учитывающими процессы окисления при высоких температурах. Модели описывающие процессы самовоспламенения позволяют моделировать процессы детонации, происходящие в камере сгорания двигателя. Для создания компьютерной модели теплового двигателя необходимо задать трехмерную вычислительную сетку и граничные условия поверхностей, а также начальные условия модели.

### Начальные параметры компьютерной модели

Проведено моделирование теплового цикла для двигателя НСЦИ. Степень сжатия равна 17,5. На основе реальных размеров экспериментального двигателя была построена трехмерная сетка камеры сгорания двигателя (рис. 1). Сетка смоделированной камеры сгорания состояла из почти 32000 вычислительных ячеек. Рассматривался двухслойный пограничный слой стенки.

Вычисления проводились для диапазона углов поворота коленчатого вала двигателя от 180 градусов до верхней мертвой точки, и до 180 градусов после верхней мертвой точки.

Расчеты включали изучение двигателя НСЦИ и сравнение со стандартным двигателем.

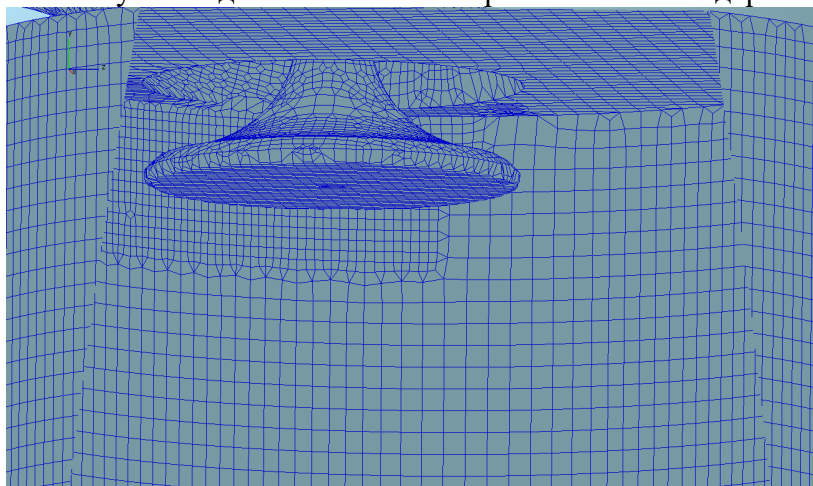
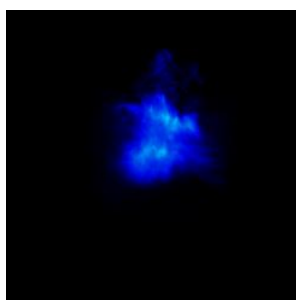


Рисунок 1. Расчетная сетка для камеры сгорания двигателя

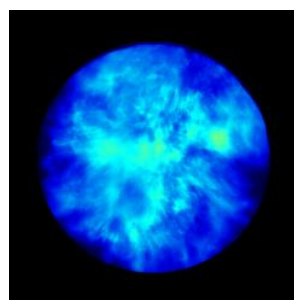
На основании данных давления, полученных при моделировании, было рассчитано индикаторное давление цикла сгорания. Указанное давление является одним из параметров, определяющих эффективность работы двигателя внутреннего сгорания.

### Результаты моделирования

На рисунке 2 показано распределение температуры в камере сгорания обычного двигателя и двигателя НСЦИ. По результатам моделирования видно, что когда процесс сгорания стандартного двигателя находится в начальной стадии, в то же время в двигателе НСЦИ процесс горения уже происходит во всем объеме камеры сгорания.



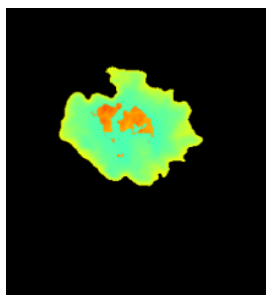
Стандартный двигатель



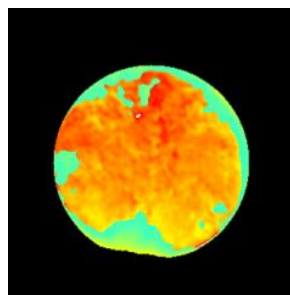
Двигатель НСЦИ

Рисунок. 2 Распределение температуры в камере сгорания

Выхлопные газы двигателя НСЦИ содержат более высокую концентрацию NO по сравнению со стандартным двигателем (рис. 3). Неконтролируемое горение НСЦИ влияет на скорость образования оксидов азота, но в тоже время позволяет снизить концентрацию сажи. Это связано с более высокой температурой в камере сгорания во время рабочего такта двигателя внутреннего сгорания.



Стандартный двигатель



Двигатель HCCI

Рисунок. 3 Распределение оксидов азота в камере сгорания

## Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать выводы:

1. Процесс горения HCCI по сравнению со стандартным двигателем с воспламенением от сжатия характеризуется более ранним зажиганием и более короткой продолжительностью горения.

2. По сравнению с со стандартным двигателем слишком раннее воспламенение неконтролируемого горения HCCI приводит к увеличению максимальных значений давления, температуры и скорости высвобождения тепла в цилиндре. Однако повышенное давление не вызывает увеличения индикаторного давления, которое является параметром эффективности работы двигателя.

3. Неконтролируемое горение HCCI характеризуется более высокой эмиссией оксида азота (NO) и более низкой эмиссией сажи (сажи), чем в случае управляемого горения в двигателе с прямым впрыском топлива.

4. Контроль процесса воспламенения и горения в двигателе HCCI может быть эффективным методом сокращения выбросов NO. Решение этой проблемы может быть реализовано путем управления высотой открытия выпускных клапанов, а также управление внутренней и внешней рециркуляцией выхлопных газов. Изменение степени сжатия также позволяет влиять на момент начала воспламенения в двигателях HCCI.

## Литература

1. Befrui B., Corbinelli G., Robart D., Reckers W., Luxembourg G.D.: LES Simulation of the Internal Flow and Near-Field Spray Structure of an Outward-Opening GDI In-jetor and Comparison with Imaging Data, SAE Technical Paper 2008-01-0137.

2. Szpica D.: Simulation tests on air flow through selected types of throttle bodies, Combustion Engines, PTNSS-2010-SS1-105, 1/2010 (140).

3. Iyer C.O., Han Z., Yi J.: CFD Modeling of a Vortex Induced Stratification Combustion (VISC) System, SAE Technical Paper 2004-01-0550.

4. Kim S.-J., Kim Y.-N., Lee J.-H.: Analysis of the In-Cylinder Flow, Mixture Formation and Combustion Processes in a Spray-Guided GDI Engine, SAE Technical Paper 2008-01-0142.

5. Lohfink C., Baecker H., Tichy M.: Experimental Investigation on Catalyst-Heating Strategies and Potential of GDI Combustion Systems, SAE Technical Paper 2008-01-2517.

6. D. Maslennikov: Badawcza identyfikacja właściwości systemu spalania z bezpośrednim wtryskiem paliwa i zapłonem iskrowym. 149 s. : il. ; 30 cm + 2 recenzje. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, 2012 DrOIN 1457