

Д.А. Масленников
Донецкий национальный
технический университет,
г. Донецк, Донецкая Народная Республика

Моделирование процессов горения в двигателях внутреннего сгорания

Аннотация. Система сжигания с гомогенным зарядом и воспламенением от сжатия является одним из наиболее перспективных решений, используемых в поршневых двигателях. Автором были проанализированы основные параметры горения, такие как: начало сгорания, продолжительность горения, индикаторное давление, концентрация оксида азота и сажи в выхлопных газах. В статье представлены результаты трёхмерного моделирования горения в двигателе с системой сжигания с гомогенным зарядом.

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

Abstract. A combustion system with homogeneous charge and compression ignition is one of the most promising solutions used in piston engines. 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. The paper presents the results of three-dimensional modeling of combustion in an engine with a combustion system with a homogeneous charge.

Key words: homogeneous charge, recirculation of the exhausted gases, heat release rate, onset of ignition, duration of combustion, fuel injection, compression ignition engine, indicator pressure, nitrogen oxides.

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 концентрацию 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

Во 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 воспламенением 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 воспламенением 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 такой 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 нерешённые проблемы, такие как: контроль начала и продолжительности горения; высокая концентрация 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: 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 являются 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 путём применения внутренней рециркуляции отработавших газов, реализованной путём 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. Эксперименты проводились для широкого диапазона открытия выпускных клапанов. Полученные данные позволили оценить эффективность применения рециркуляции отработавших газов (EGR) для контроля процесса воспламенения и горения. Был определён допустимый диапазон коэффициента избытка воздуха,

обеспечивающий стабильную и повторяемую работу такого двигателя. Использование прямого впрыска бензина в цилиндры двигателя и управление внутренней рециркуляцией выхлопных газов позволили 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 НСЦИ. Исследователи обнаружили, что существует определённое значение начальной температуры смеси (приблизительно 200°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 её состояния перед процессом сжатия. В работе [5] исследуются основные параметры горения в бензиновом двигателе с однородным зарядом с воспламенением от сжатия: начало и продолжительность горения; содержание в отработавших газах монооксида углерода (СО), несгоревших углеводородов (НС), 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 НСЦИ.

В этой статье показаны результаты исследования процесса горения в двигателе НСЦИ при помощи моделирования процессов, происходящих внутри цилиндра, с применением программ вычислительной гидродинамики и использованием компьютерной модели горения. Проведён анализ основных параметров горения: начало воспламенения, продолжительность горения, индикаторное давление, концентрация оксида азота (NO) и сажи в камере сгорания двигателя с системой сжигания однородного заряда и воспламенением от сжатия (НСЦИ).

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 также процессы теплообмена [6, 7].

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 моделировать процессы переноса тепла, смесеобразования, воспламенения и турбулентного горения 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 протекание детонации, происходящее в камере сгорания двигателя. Для создания трёхмерной модели теплового двигателя необходимо задать трёхмерную 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 трёхмерная 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° до верхней мертвой точки и до 180° после верхней мертвой точки. Расчёты включали изучение двигателя НСЦИ и сравнение со стандартным двигателем.

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 показано 2 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.

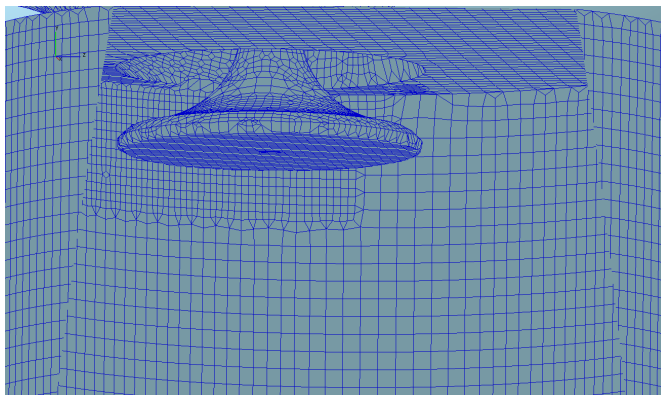
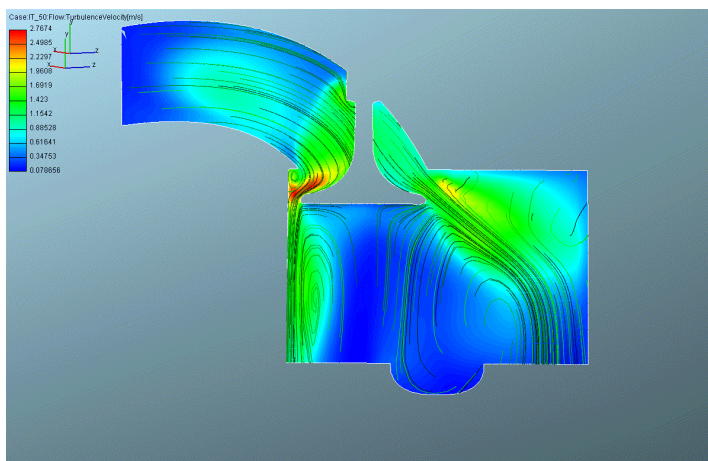
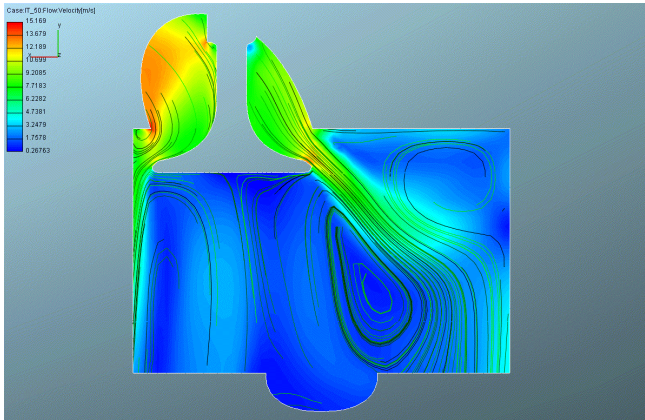


Рисунок 1. Расчётная сетка для камеры сгорания двигателя



Стандартный двигатель



Двигатель HCCI

Рисунок 2. Распределение температуры в камере сгорания стандартного двигателя и двигателя HCCI

Выхлопные газы двигателя HCCI содержат более высокую концентрацию NO по сравнению со стандартным двигателем (рис. 3 и 4). Неконтролируемое горение HCCI влияет на скорость образования оксидов азота, но в то же время позволяет снизить концентрацию сажи. Это связано с более высокой температурой в камере сгорания во время рабочего такта двигателя внутреннего сгорания.

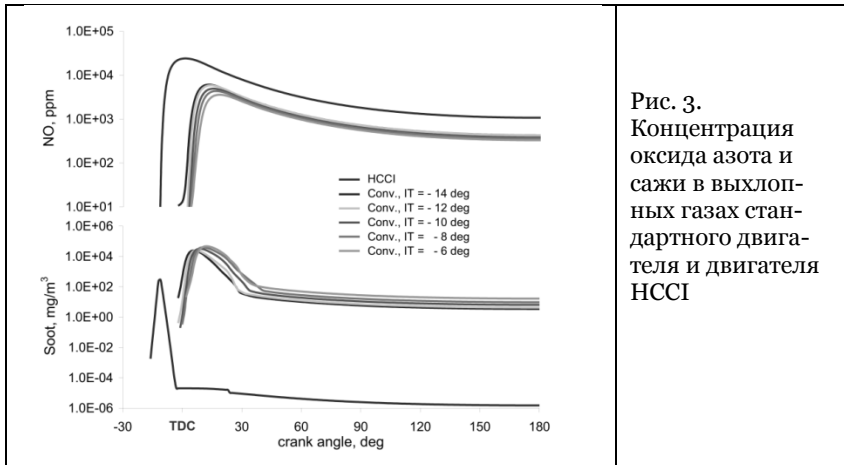


Рис. 3. Концентрация азота и сажи в выхлопных газах стандартного двигателя и двигателя HCCI

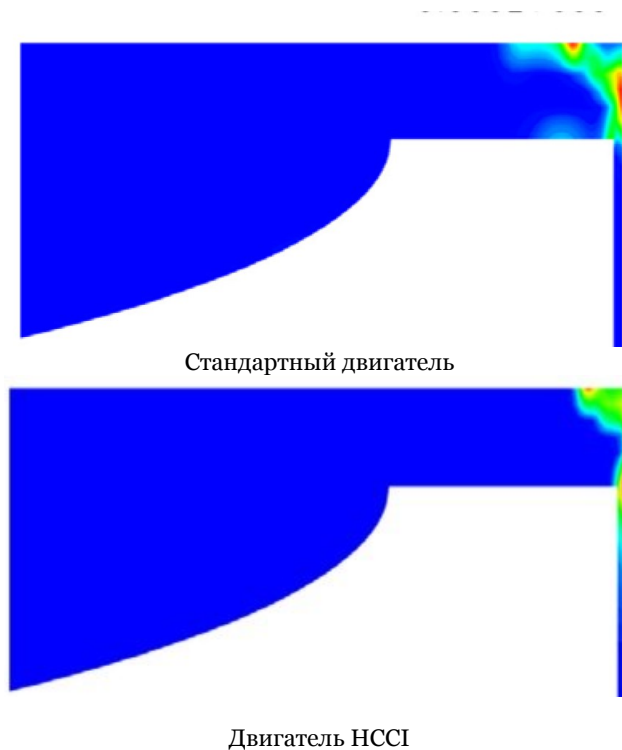


Рис. 4. Концентрация оксида азота и сажи в камере сгорания стандартного двигателя и двигателя НССИ

Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

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

2. По сравнению со стандартным двигателем слишком раннее воспламенение неконтролируемого горения НССИ приводит к увеличению максимальных значений давления, температуры и скорости высвобождения тепла в цилиндре. Однако повышенное давление не вызывает увеличения индикаторного

давления (p_i), которое является параметром эффективности работы двигателя.

3. Неконтролируемое горение НССИ 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 НССИ может быть эффективным методом сокращения выбросов NO [30]. Решение этой проблемы можно реализовать путём управления высотой открытия выпускных клапанов, а также управления внутренней и внешней рециркуляцией выхлопных газов. Изменение степени сжатия позволяет также влиять на момент начала воспламенения в двигателях НССИ.

Список литературы

1. AVL FIRE ver. 2009, ICE Physics&Chemistry. AVL Graz 2009.
2. 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-jector and Comparison with Imaging Data, SAE Technical Paper 2008-01-0137.
3. Szpica D. Simulation tests on air flow through selected types of throttle bodies, Combustion Engines, PTNSS-2010-SS1-105, 1/2010 (140).
4. Iyer C.O., Han Z., Yi J. CFD Modeling of a Vortex Induced Stratification Combustion (VISC) System, SAE Technical Paper 2004-01-0550.
5. 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.
6. Lohfink C., Baecker H., Tichy M.: Experimental Investigation on Catalyst-Heating Strategies and Potential of GDI Combustion Systems, SAE Technical Paper 2008-01-2517.
7. Maslennikov D. Badawcza identyfikacja właściwości systemu spalania z bezpośrednim wtryskiem paliwa i zapłonem iskrowym. 149 s.: il.; 30 cm + 2 recenzje. Rozprawadoktorska. PolitechnikaPoznańska, 2012. DrOIN 1457