

УДК 621.43.013

Д.А. Масленников, ст. преп.

Донецкий национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СГОРАНИЯ В ДВС

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. Расчеты показали, что при одинаковых параметрах свежего заряда в цилиндре двигателя (коэффициент избытка воздуха, количество топлива) неконтролируемое горение гомогенной смеси по сравнению с контролируемым сгоранием в двигателе с прямым впрыском топлива характеризуется более высоким уровнем выбросов NO и уменьшенной концентрацией сажи.

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

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

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 эффективности. 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 (НССІ) 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 НССІ путем применения внутренней рециркуляции отработавших газов, реализованной путем перекрытия выпускных клапанов. Такое решение, используемое в двигателе, допускает работу НССІ 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. Также был определен 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, 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 НССІ.

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 (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 НССІ.

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 давления, 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, 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 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 (рисунок 1). Сетка смоделированной камеры сгорания состояла из почти 32000 вычислительных ячеек. Рассматривался двухслойный пограничный слой стенки.

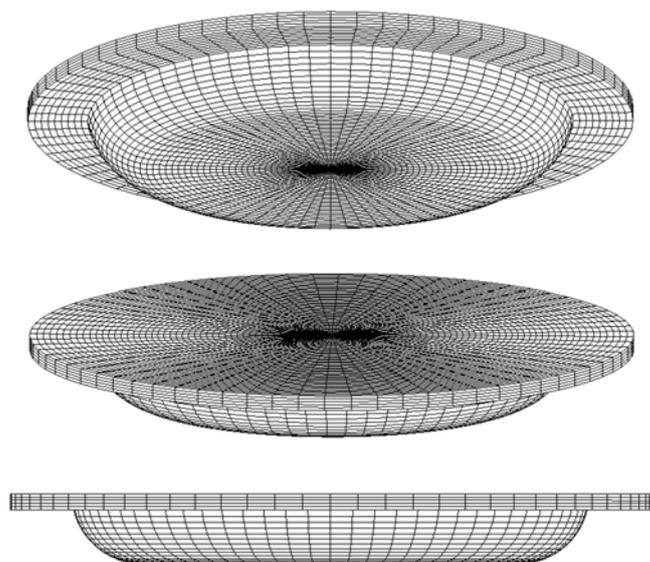


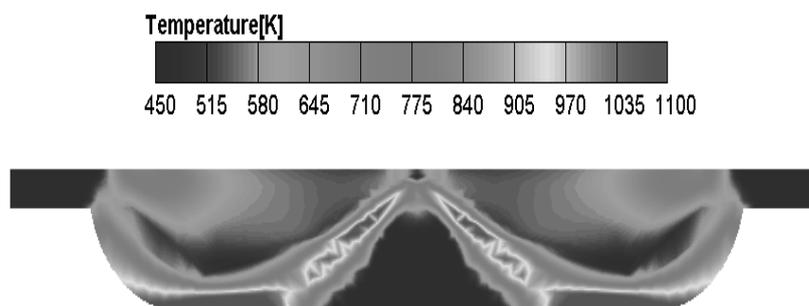
Рисунок 1. Расчетная сетка для камеры сгорания двигателя

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.

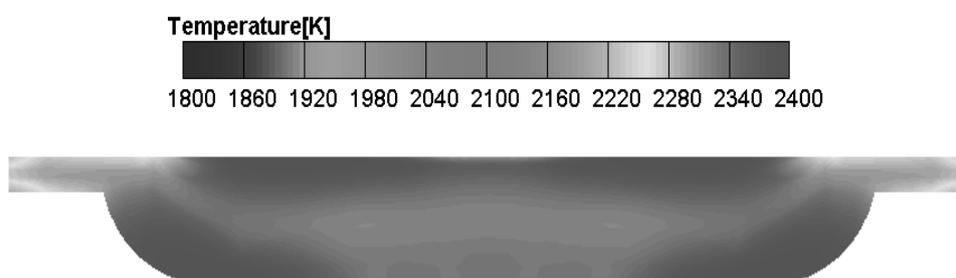
На основании данных давления, полученных при моделировании, было рассчитано индикаторное давление цикла сгорания. Указанное давление является одним из параметров, определяющих эффективность работы двигателя внутреннего сгорания.

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.



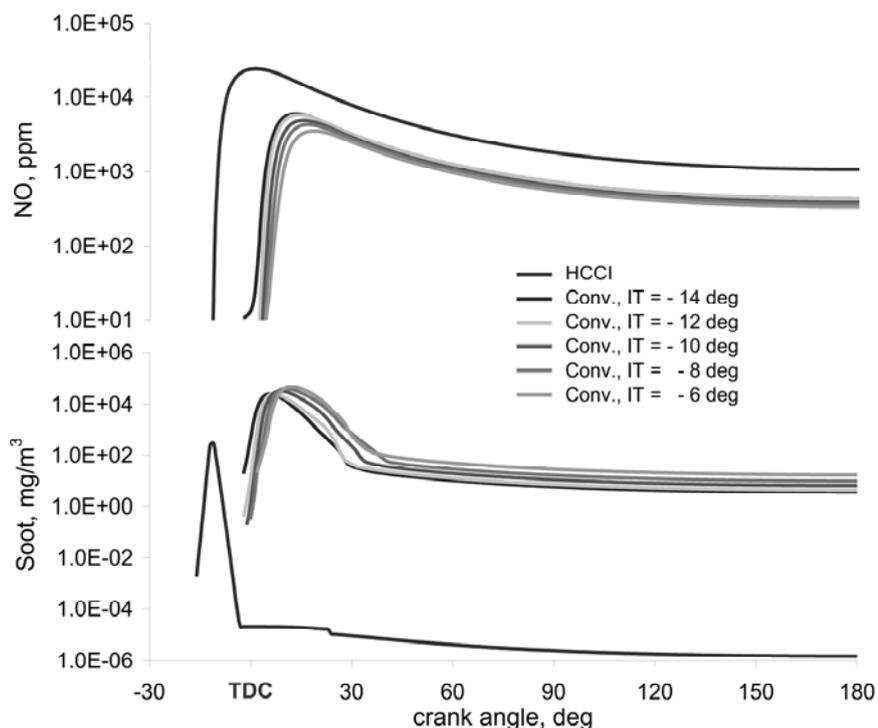
Стандартный двигатель (положение поршня - 10 град до ВМТ)



Двигатель HCCI

Рисунок 2. Распределение температуры в камере сгорания стандартного двигателя и двигателя HCCI для положения поршня 10 град до ВМТ.

Выхлопные газы двигателя HCCI содержат более высокую концентрацию NO по сравнению со стандартным двигателем (рисунок 4 и 5). Неконтролируемое горение HCCI 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.



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

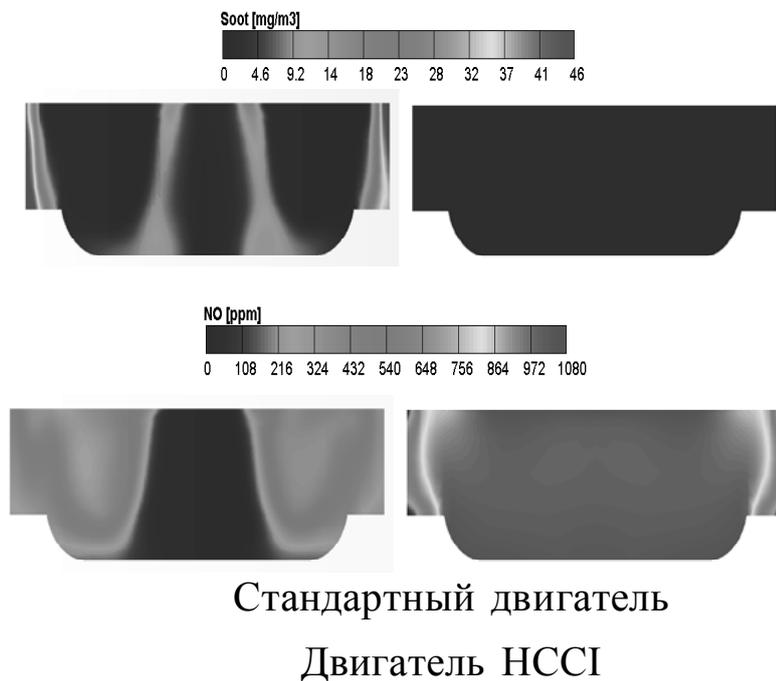


Рисунок 5. Концентрация оксида азота и сажи в камере сгорания стандартного двигателя и двигателя HCCI

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 (p_i), 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 [30]. 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.

Список источников

1. Motyl K., Rychter T. 2003. HCCI engine – a preliminary analysis. „Journal of Kones”, vol. 10, p. 3–4.
2. Fabrizio Bisetti, J.-Y. Chenb, Evatt R. Hawkes, Jacqueline H. Chen. 2008. Probability density function treatment of turbulence/chemistry interactions during the ignition of a temperature-stratified mixture for application to HCCI engine modeling. „Combustion and Flame”, vol. 155, p. 571–58.
3. Hunicz J., Niewczas A., Kordos P. 2010. A reseaech into a gasoline HCCI engine. „Combustion engines”, No. 1/2010 (140), p. 3–13.
4. Motyl K., Lisowski A. 2008. Wpływ temperatury początkowej i składu mieszaniny palnej na pracę silnika HCCI zasilanego biogazem. „Inżynieria Rolnicza” 1(99)/2008, p. 311–317.
5. Lu X.C., Chen W., Huang Z. 2005. A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part 2. Effect of operating conditions and EGR on HCCI combustion. „Fuel” ,84, p. 1084–1092 .
6. Jamrozik A., Kociszewski A., Sosnowski M., Tutak W. 2006. Simulation of combustion in SI engine with pre- chamber. „CADMD’2006”, p. 66–69.
7. Jamrozik A., Tutak W., Kociszewski A., Sosnowski M. 2006. Numerical Analysis of Influence of Prechamber Geometry in IC Engine with Two-Stage Combustion System on Engine Work Cycle Parameters. „Journal of Kones”. Vol 13, No 2, p. 133–142.