

Моделирование процесса смесеобразования в цилиндре двигателя, работающего по циклу Отто-Дизеля

Каменный А.В., к.т.н. проф. Костюков А.В., к.т.н. проф. Макаров А.Р., Пустынцев М.Е.
Университет машиностроения
8 (495) 223-05-23 доб. 1054, atd@mami.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрены процессы испарения и гомогенизации топливовоздушной смеси в ДВС, работающем по циклу Отто-Дизеля.

Ключевые слова: самовоспламенение гомогенного заряда от сжатия, смесеобразование и испарение топлива, объемный характер течения с фазовым переходом, математическое моделирование.

Одним из перспективных методов организации рабочего процесса ДВС является рабочий процесс с воспламенением гомогенного заряда от сжатия (НССИ процесс или цикл Отто-Дизеля). Гомогенная смесь образуется в системе топливоподачи так же, как и в двигателях с искровым зажиганием с использованием системы впрыскивания под низким давлением во впускной коллектор или непосредственным впрыскиванием с очень ранним углом опережения топливоподачи.

Принципиальным отличием НССИ-процесса от классических дизельных и бензиновых двигателей заключается в том, что организуется одновременное многоочаговое воспламенение и горение заряда по всему объему камеры сгорания, а не во фронте пламени гомогенной или гетерогенной смеси. Температура горения гомогенного заряда, воспламеняемого от сжатия в 1,5-2 раза ниже, чем температура горения заряда во фронте пламени классических бензиновых или дизельных двигателей. Однородное температурное поле в камере сгорания НССИ-двигателя, отсутствие высокотемпературных зон определяют низкую концентрацию NO_x в отработавших газах этих двигателей [1, 2].

Высокий КПД НССИ-процесса определяется меньшим временем протекания процесса тепловыделения по сравнению как с дизелями, так и с двигателем с искровым зажиганием, а горение гомогенной смеси при $\alpha > 2$ не приводит к образованию сажи.

Двигатели с НССИ-процессом могут работать на большинстве традиционных и альтернативных видах топлива: дизельном, бензине, природном и сжиженном газе, спиртах, диметиловом эфире и др. Требования к топливу сводятся к возможности образования гомогенной смеси, а к организации рабочего процесса – к обеспечению условий в камере сгорания, при которых топливовоздушная смесь самовоспламеняется вблизи ВМТ.

Управление моментом смесевоспламенения составляет основную проблему создания серийных образцов ДВС с НССИ-процессом, от решения которой зависит, станут ли двигатели этого класса доминировать на потребительском рынке.

Необходимый температурный режим для самовоспламенения может быть также частично обеспечен варьированием температуры деталей камеры сгорания.

В [3, 4] было установлено, что температура внутренней поверхности рабочего объема цилиндра заметно влияет на момент воспламенения и динамику развития процесса сгорания.

В результате момент воспламенения, который определяется уровнем температуры топливно-воздушной смеси, изменяется соответственно в ту или иную сторону. Одновременно изменяется и закон выгорания топлива, который также в основном определяется температурой горючей смеси.

Таким образом, для организации процесса сгорания по циклу Отто-Дизеля необходимо сначала проанализировать состояния топливовоздушной смеси к моменту ее самовоспламенения и разработать рекомендации по интенсификации процесса гомогенизации.

Задача смесеобразования и испарения топлива в ДВС хорошо известна. Однако в настоящее время она в основном решается с использованием методик, не учитывающих объемный характер течения топливовоздушной смеси в цилиндре [5]. При этом хорошо известно, что в цилиндре двигателя течение топливовоздушной смеси крайне неравномерно и, следовательно, его влияние на процесс гомогенизации смеси может быть весьма значительно.

В связи с этим для решения задачи гомогенизации топливовоздушной смеси в качестве физической модели была взята объемная: цилиндр двигателя сдвигающимся поршнем, в который на такте всасывания через клапан входит воздух с каплями распыленного топлива. Стенки цилиндра, днище поршня и впускной клапан горячие. Входящая в цилиндр топливовоздушная смесь греется, в результате чего топливо начинает испаряться. На такте сжатия процесс испарения топлива продолжается, но уже в основном за счет подвода к нему тепла, выделяющегося при сжатии рабочего тела.

Таким образом, физическая модель процесса смесеобразования представляет собой нестационарное, объемное, вязкое, сжимаемое с подводом тепла течение трехкомпонентной (воздух, жидкая фаза топлива и газообразная фаза топлива) двухфазной среды с фазовыми переходами в цилиндре на тактах впуска и сжатия.

Течение топливовоздушной среды в цилиндре двигателя имеет ярко выраженный турбулентный характер. Прямое решение уравнений Навье-Стокса для такого потока в настоящее время возможно при применении численных методов с чрезвычайно мелким разбиением (мелкой сеткой) расчетной области, достаточным для разрешения турбулентных вихрей наименьших размеров, что не под силу в настоящее время даже самым мощным ЭВМ. Существуют два альтернативных метода моделирования турбулентных потоков: метод осреднения уравнений Навье-Стокса по правилам Рейнольдса (RANS) и метод «фильтрации» [6]. Метод «фильтрации», по сути, заключается в добавлении так называемых «фильтрующих» уравнений, служащих для исключения из расчета вихрей, размер которых меньше ячеек сетки конечных элементов. Применение такого метода крайне ограничено в связи с требуемыми большими вычислительными ресурсами [7, 8].

Метод осреднения уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу (RANS) активно применяется для решения широкого круга инженерных задач. Одной из наиболее простых, но активно применяемых в настоящее время является двухпараметрическая модель турбулентности, в которой решаются два уравнения переноса, определяющие турбулентную кинетическую энергию и скорость диссипации [9]. Ошибкоустойчивость, экономичность, и разумная точность для широкого диапазона турбулентных потоков делает ее одной из наиболее применимой в задачах течения в цилиндрах поршневых двигателей. Постоянные коэффициенты для этой модели турбулентности получены опытным путем, и поэтому она является полуэмпирической.

В целом процесс течения топливовоздушной смеси с фазовым переходом топлива в цилиндре поршневого двигателя, работающего по циклу Отто-Дизеля, описывается следующими уравнениями [10, 11]: уравнением неразрывности, уравнением суммы относительных объемов компонентов смеси, уравнением Навье-Стокса, уравнением переноса кинетической энергии и скорости диссипации, уравнением энергии, уравнением диффузии для многофазной, многокомпонентной среды и уравнением интенсивности передачи теплоты в трехкомпонентном потоке.

Совместно с расчетом течения и испарения топлива решалась сопряженная задача нестационарной теплопроводности в твердом теле-клапане с внешним подводом теплоты (теплообмен с движущейся топливовоздушной смесью).

Для решения описанной выше системы уравнений использовался метод конечных элементов.

Основные допущения, используемые в расчетной модели:

- капли топлива имеют сферическую форму и одинаковые размеры на входе в цилиндр;
- температура поверхностей поршня, цилиндра и камеры сгорания не меняются в процессе расчета;
- передача тепла излучением не учитывается.

Расчетная модель на такте впуска, включающая цилиндр, открытый клапан идвигающийся поршень, показана на рисунке 1.

На такте сжатия расчетная модель представляет собой цилиндр с закрытым клапаном идвигающимся поршнем (рисунок 2).

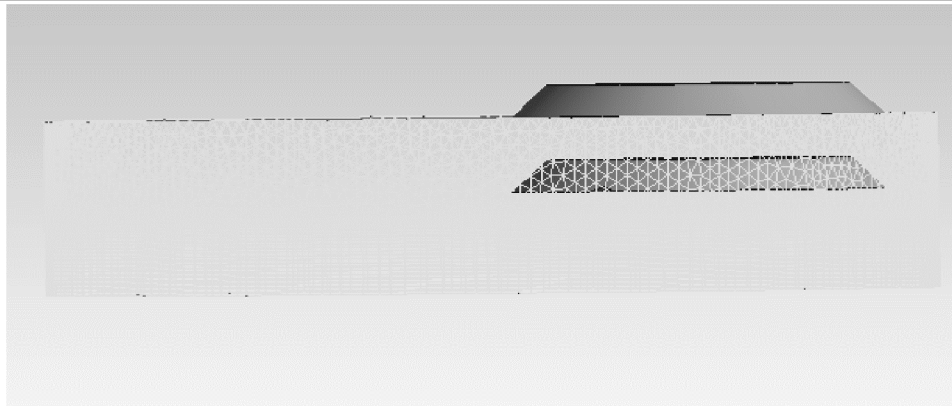


Рисунок 1 – Расчетная модель, используемая для расчета течения смеси и испарения топлива на такте впуска

Разбивка расчётной модели на конечные элементы производилась в сеточном генераторе ICEM CFD. В связи с моделированием движения поршня сетка конечных элементов выполнялась деформируемой. Это потребовало выполнения сетки с переменной жесткостью (большая жесткость у сетки в районе клапана и малая в средней и нижней частях цилиндра). Связано это с тем, что сетка в районе клапана весьма неравномерна, и в случае ее больших деформаций форма элементов делается недопустимой.

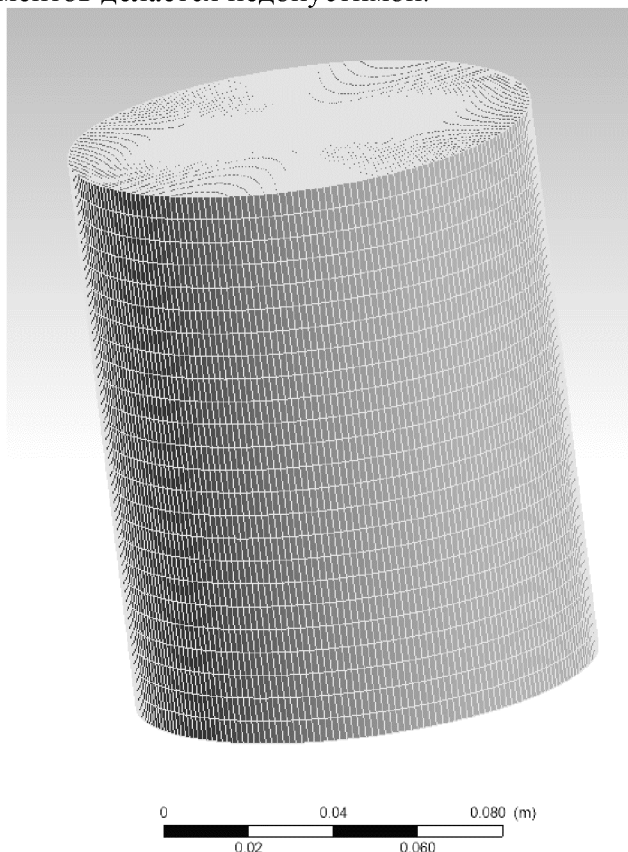


Рисунок 2 – Расчетная модель, используемая для расчета течения топливовоздушной смеси и испарения топлива на такте сжатия

В качестве граничных условий при расчете такта впуска задавались:

- полное (атмосферное) давление, температура топливовоздушной смеси на входе в расчетную модель (температура воздуха и жидкого топлива задавалась отдельно) и средний диаметр капель на входе в цилиндр;
- температура стенки цилиндра и камеры сгорания;
- температура поршня и скорость его движения;
- относительные объемы воздуха и жидкого топлива на входе в модель.

Граничные условия для расчетной модели на такте сжатия практически совпадают с условиями для такта впуска, за исключением входа в модель, который в модели для такта сжатия отсутствует.

Начальные условия использовались следующие:

- температура клапана (только для такта впуска, для такта сжатия клапан отсутствует);
- результаты расчета такта впуска (для расчета такта сжатия) – температурные, скоростные поля и др.

Температура кипения жидкой фазы топлива задавалась в виде зависимости от давления.

Теплофизические свойства воздуха и топлива задавались в зависимости от температуры.

Расчеты проводились на мощном 6-ти ядерном персональном компьютере с оперативной памятью 12 Гб и процессором Core i7 extreme 990X. Тем не менее, в связи с нестационарностью рассчитываемого процесса закладываемой деформации сетки конечных элементов (требуемой в связи с моделированием движения поршня) и большой сжимаемостью топливовоздушной смеси на такте сжатия временные затраты на расчет каждого такта были весьма велики. Большая продолжительность расчетов потребовала выполнения достаточно грубой сетки, что привело к погрешностям в некоторых расчетах при переносе величин массовых компонентов смеси при переходе с расчета такта впуска на расчет такта сжатия. Грубостью и деформацией сетки можно также объяснить и то, что расчеты тактов сжатия удалось выполнить лишь частично (примерно на 70%), вместе с тем проведенными расчетами удалось оценить влияние различных факторов (температуры поршня, частоты вращения и т.д.) на интенсивность испарения и, исходя из них, сформулировать рекомендации для повышения эффективности процесса гомогенизации топливовоздушной смеси в двигателе, работающем по циклу Отто-Дизеля.

В качестве объекта расчетного исследования использовался одноцилиндровый поршневой двигатель [12] имеющий:

- номинальную частоту вращения – 2000 мин^{-1} ;
- объем цилиндра – 1300 см^3 ;
- степень сжатия – 20.

Исходные данные:

- частота вращения варьировалась (1000 мин^{-1} и 2000 мин^{-1});
- температура стенки цилиндра, клапана и камеры сгорания бралась равной 160°C , 400°C и 250°C соответственно в зависимости от типичного теплового состояния элементов поршневых двигателей [5];
- температура поршня варьировалась от 280°C до 500°C ;
- температура компонентов топливовоздушной смеси на входе в клапан варьировалась от 30°C до 60°C ;
- относительные объемы воздуха и жидкого топлива, входящие в цилиндр, брались приблизительно равными 0.99985 и 0.00015 соответственно;
- средний диаметр капель топлива на входе в цилиндр (брался равным 0.1 мм и 0.03 мм).

Значения взятых в расчетах диаметров капель топлива соответствует давлению перед форсункой 60 Бар и 600 Бар, то есть диаметр капли 0.03 мм может быть получен при использовании насоса высокого давления, используемого в дизельных двигателях, в то время как капли с диаметром 0.1 мм вполне соответствует топливной аппаратуре бензинового двигателя.

Результаты математического моделирования процессов смесеобразования топливовоздушной смеси представлены на рисунках с 3 по 6.

Показанные на рисунке 3 векторные поля скоростей воздуха свидетельствуют о крайне неравномерном характере движения воздуха в цилиндре двигателя на тактах впуска и сжатия. Это подтверждает правильность подхода при разработке математической модели, учитывающего объемный турбулентный характер течения смеси в цилиндре.

Количество испарившегося топлива на такте впуска вполне соизмеримо с величиной

испарившегося топлива на такте сжатия. Это хорошо видно на рисунках с 7 по 15.

Влияние частоты вращения (времени тактов) хорошо видно на графиках, представленных рисунках 7 и 8. Увеличение частоты вращения с 1000 мин^{-1} до 2000 мин^{-1} приводит к уменьшению массы неиспарившегося топлива практически пропорционально уменьшению времени. На такте впуска относительная масса испарившегося топлива уменьшается с 0.0019 до 0.00036, а на такте сжатия – с 0.027 (время 0.051 сек) до 0.00825 (время 0.026 сек).

Время 0.051 сек и 0.026 сек соответствуют примерно одному положению поршня в цилиндре при частотах вращения вала 1000 об/мин и 2000 об/мин соответственно.

Влияние диаметра капель на процесс гомогенизации смеси виден из графиков на рисунках 11 и 12. Уменьшение диаметра капель с 0.1 мм до 0.03 мм приводит к росту относительной массы испарившегося топлива на такте впуска с 0.0019 до 0.0035, а на такте сжатия – с 0.027 до 0.055 (сравнение в момент времени 0.051).

Влияние температуры поршня, как видно из рисунков 13 и 14, весьма существенно. Так при увеличении температуры поршня с 280°C до 500°C относительная масса испарившегося топлива на такте впуска растет с 0.0043 до 0.119, а на такте сжатия – с 0.0132 до 0.0902 (сравнение на сжатии производится в момент времени 0.048 сек).

На графиках, представленных на рисунках 15 и 16, хорошо видно влияние температуры входящей смеси. Наиболее сильное влияние оказывает увеличение температуры входящего в цилиндр жидкого топлива. Так, в случае, когда входящие в цилиндр воздух и топливо имеют температуру 50°C , относительная масса испарившегося топлива на такте всасывания равна 0.0035, а при температурах воздуха 30°C и топлива 60°C относительная масса испарившегося топлива достигает величины 0.00415.

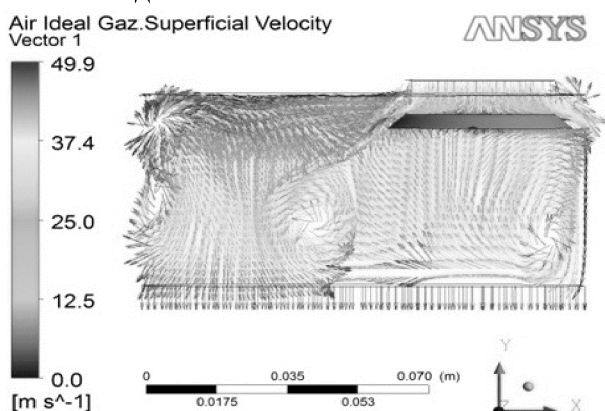


Рисунок 3 – Поле векторов скоростей воздуха в цилиндре на такте впуска в момент времени $\tau=0.001$ сек

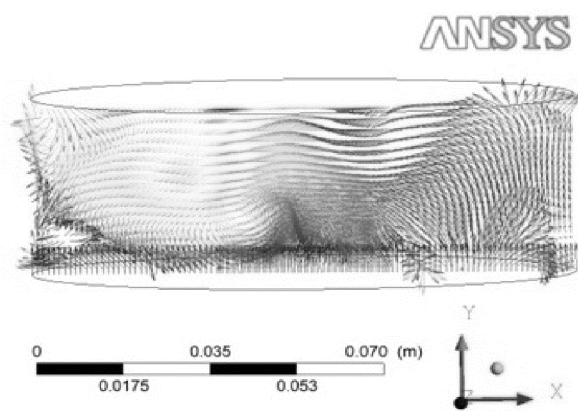


Рисунок 4 – Поле векторов скоростей воздуха в цилиндре на такте сжатия в момент времени $\tau=0.021$ сек от начала такта сжатия

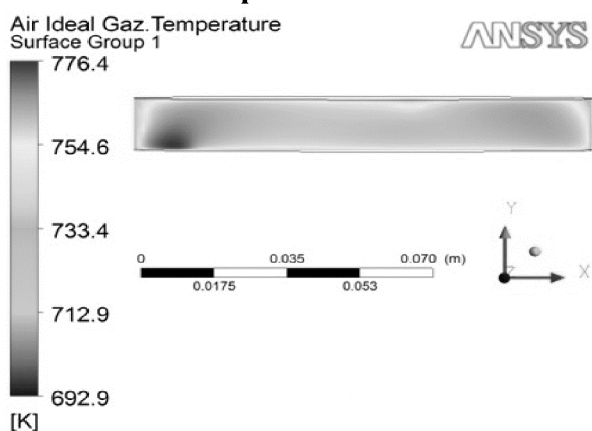


Рисунок 5 – Температурное поле топливоздушнoй смеси на такте сжатия в момент времени $\tau= 0.028$ сек от начала такта сжатия

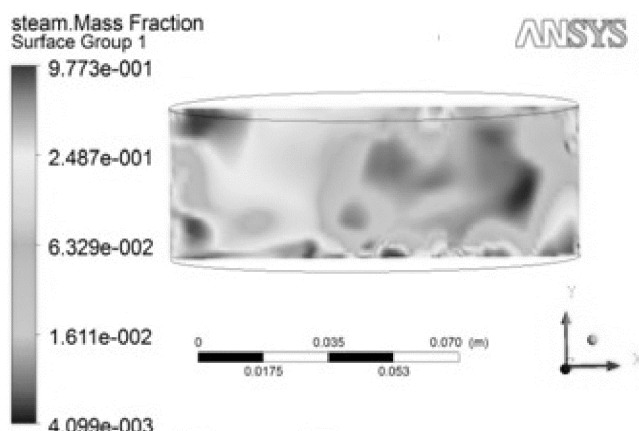


Рисунок 6 – Распределение относительной массы испарившегося топлива в цилиндре на такте сжатия в момент времени $\tau= 0.021$ сек от начала такта сжатия

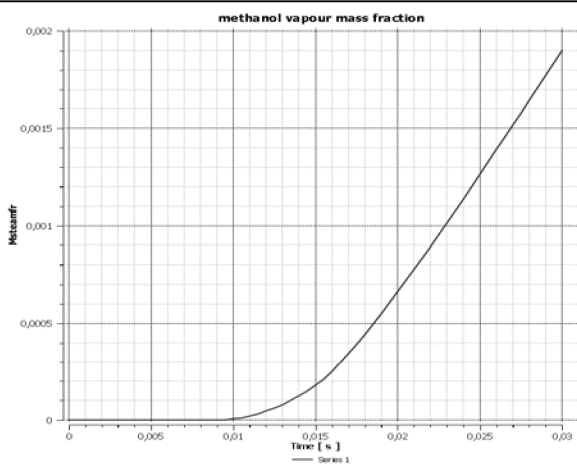


Рисунок 7 – Увеличение паровой массовой фракции топлива на такте впуска при частоте вращения коленчатого вала двигателя 1000 мин⁻¹

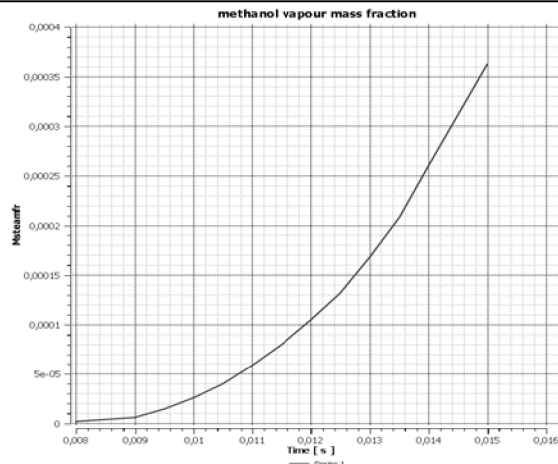


Рисунок 8 – Увеличение паровой массовой фракции топлива на такте впуска при частоте вращения коленчатого вала двигателя 2000 мин⁻¹

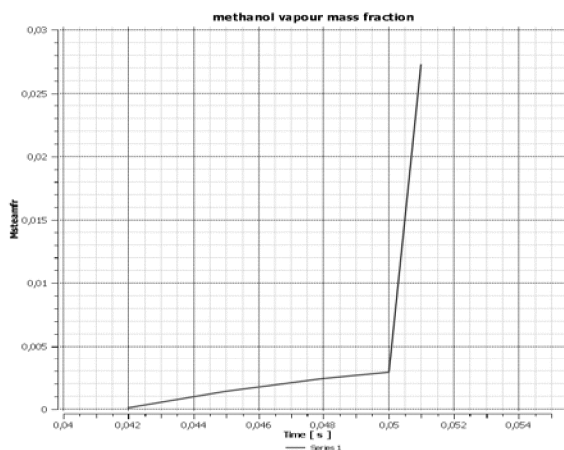


Рисунок 9 – Увеличение паровой массовой фракции топлива на такте сжатия при частоте вращения коленчатого вала двигателя 1000 мин⁻¹

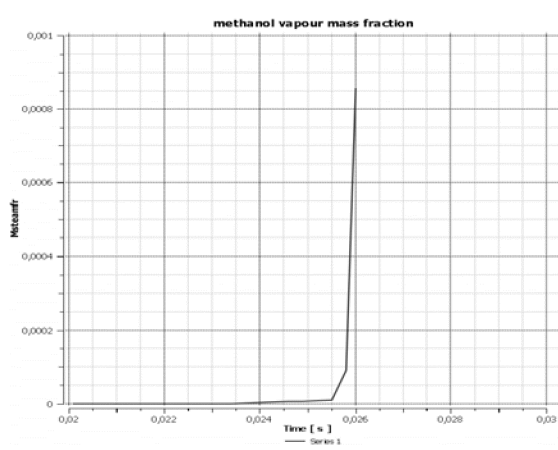


Рисунок 10 – Увеличение паровой массовой фракции топлива на такте сжатия при частоте вращения коленчатого вала двигателя 2000 мин⁻¹

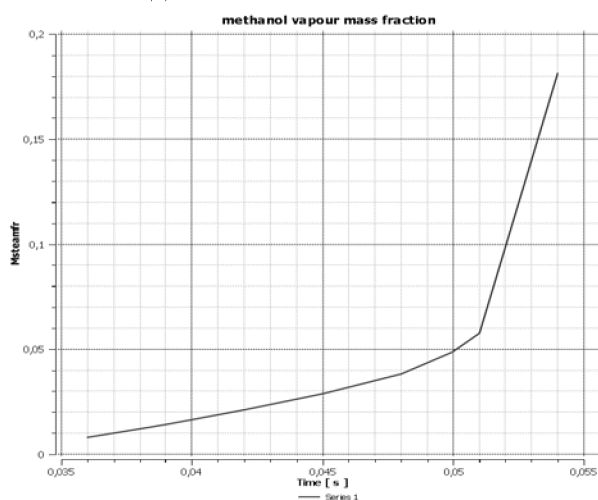


Рисунок 11 – Увеличение относительной массы паровой фракции топлива на такте сжатия при среднем диаметре капель входящего в цилиндр распыленного топлива 0.03 мм

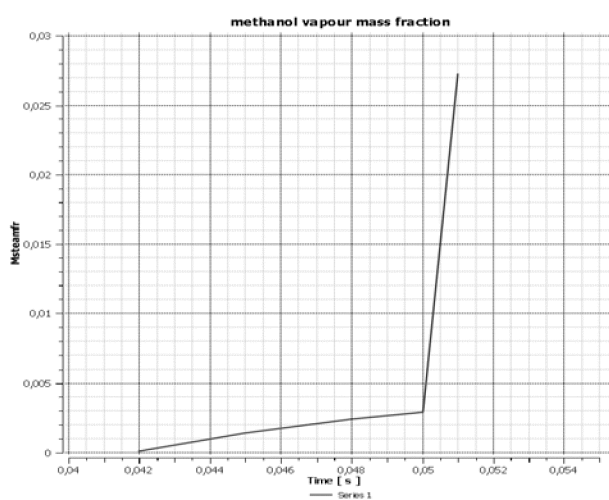


Рисунок 12 – Увеличение относительной массы паровой фракции топлива на такте сжатия при среднем диаметре капель входящего в цилиндр распыленного топлива 0.1 мм

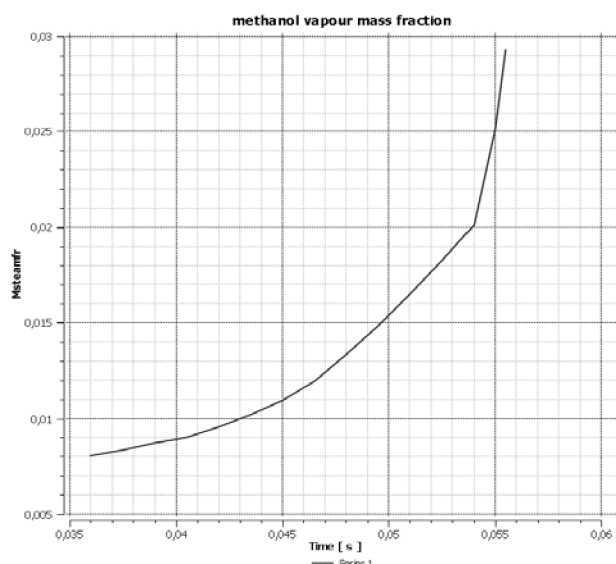


Рисунок 13 – Увеличение относительной массы паровой фракции топлива на такте сжатия при температуре поршня равной 280°C

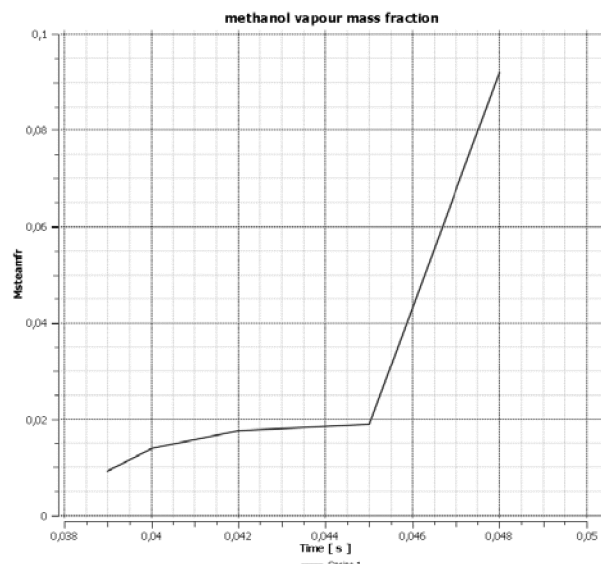


Рисунок 14 – Увеличение относительной массы паровой фракции топлива на такте сжатия при температуре поршня равной 500°C

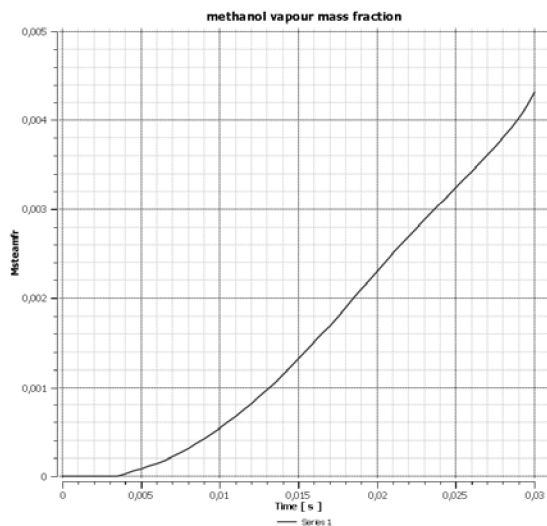


Рисунок 15 – Увеличение относительной массы паровой фракции топлива на такте впуска при температуре входящих в цилиндр воздуха и топлива равных 30°C и 60°C соответственно

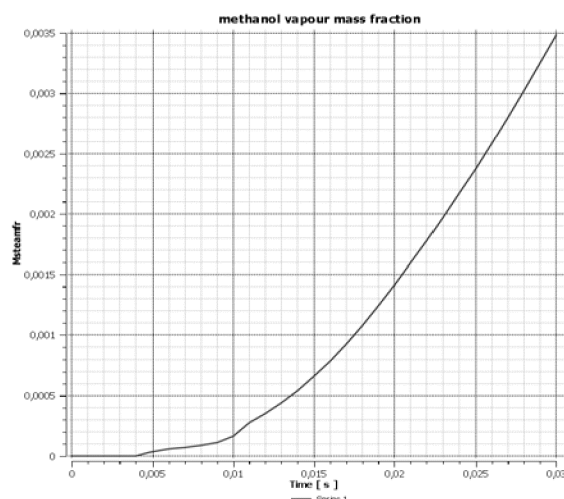


Рисунок 16 – Увеличение относительной массы паровой фракции топлива на такте впуска при температуре входящих в цилиндр воздуха и топлива равных 50°C

На такте сжатия разница в испарившемся топливе увеличивается. При температуре смеси 50°C относительная масса испарившегося топлива равна 0.05, а при температурах воздуха 30°C и топлива 60°C — 0.11 (сравнение на такте сжатия производится в момент времени 0.051сек).

Таким образом, как видно из приведенных выше графиков, наибольший эффект на процесс гомогенизации топливовоздушной смеси оказывает увеличение температуры поверхности поршня.

Проведенные варианты расчеты процесса смесеобразования на тактах впуска и сжатия в цилиндре поршневого двигателя, работающего по циклу Отто-Дизеля, показали, что степень распыла топлива и температура входящей в цилиндр топливовоздушной смеси оказывают существенное влияние на процесс гомогенизации топливовоздушной смеси.

Значительный вклад в процесс гомогенизации смеси происходит на такте впуска, поэтому впрыскивать топливо желательно в начале такта впуска.

Увеличение температуры топлива на входе в цилиндр, в отличие от увеличения температуры воздуха, не будет приводить к существенному снижению мощности и эффективности двигателя.

Поэтому интенсификация процесса гомогенизации топливоздушнoй смеси посредством подогрева топлива перед его подачей в цилиндр представляется весьма перспективной. Подогрев топлива будет эффективным и безопасным, если его осуществлять, например, горячим теплоносителем, взятым из системы охлаждения двигателя.

Наибольшее влияние на процесс испарения топлива, а следовательно, и гомогенизацию топливоздушнoй смеси, как показал расчетный анализ, оказывает увеличение температуры поверхности поршня.

Увеличение температуры поршня до 500°C и выше может быть получено за счет установки на поршень накладки из жаропрочной стали с низким коэффициентом теплопроводности или посредством нанесения на поршень керамического покрытия.

Этот вывод был подтвержден результатами экспериментальных исследований на одноцилиндровом ДВС установки ИТ9-2 при его работе по циклу Отто-Дизеля. Устойчивое самовоспламенение топливоздушнoй смеси на двигателе было получено только после установки на поршень накладки из жаропрочной стали.

Литература

1. Гусаков С.В., Вальеха Мальдонадо П., Довольнов А.М., Епифанов И.В. Транспортные ДВС с самовоспламенением гомогенного заряда. Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2008, № 5.
2. Гусаков С.В., Махмуд Мохаммед Эль Гобаши Эль Хачар Опыт моделирования рабочего процесса ДВС с воспламенением гомогенного заряда от сжатия. Вестник Российского университета дружбы народов, 2004, № 2 (9).
3. Калмалтдинов В.Г., Марков В.А. Расчетные исследования процесса сгорания и показателей рабочего цикла НССИ двигателя работающего на смеси природного газа и диметилового эфира. АГЗК+АТ № 6 (54)/2010.
4. Калмалтдинов В.Г., Марков В.А. Влияние температуры огневой поверхности цилиндра на процесс сгорания и показатели рабочего цикла НССИ двигателя. Грузовик, 2010, № 12.
5. Райков И.Я., Макаров А.Р., и др. Конструкция автомобиля: Том 2 – Двигатель, типография ФГУП НПО машиностроения, Москва 2001.
6. Брэдшоу П. Турбулентность. Машиностроение, М., 1981.
7. Singer В.А. Modeling the transition region // NASA CR 4492 – 1993.
8. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей М., Мир, 1991.
9. Jones W.P. Launder В.Е. The calculation of low-Reynolds number phenomena with a two-equation model of flow near a spinning disc. // Letters in Heat and Mass transfer. -1974. -1, № 2.
10. Enwald Н., Peirano E. and Almstedt A.E. Eulerian Two-Phase Flow Theory Applied to Fluidisation Int. J. Multiphase Flow, 22 Suppl., pp 21-66, 1996.
11. Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidisation. Academic Press, 1994
12. Костюков А.В., Макаров А.Р., Пустынцев М.Е., Каменный А.В. Двигатель, работающий с самовоспламенением гомогенной смеси от сжатия (НССИ-Процесс). Автомобильная промышленность, 2012, № 6.

Разработка системы двухступенчатого наддува для двигателей КАМАЗ EURO-5

д.т.н. проф. Каминский В.Н., Григоров И.Н., Каминский Р.В., Сибиряков С.В., Кучев С.М.,
Лихачев В.Н.

Университет машиностроения, НПО "Турботехника", НТЦ ОАО "КАМАЗ"
turbo@kamturbo.ru

Аннотация. Описывается разработанная система двухступенчатого наддува, позволяющая выполнить требования экологических норм EURO-5 на двигателях