
ИССЛЕДОВАНИЕ НССИ-ПРОЦЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НУЛЬМЕРНОЙ ОДНОЗОННОЙ ХИМИКО-КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ

С.В. Гусаков, И.В. Епифанов

Кафедра комбинированных ДВС
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Выполнен расчет с использованием химико-кинетического механизма окисления природного газа GRI-Mech 3 и анализ процесса сгорания топливовоздушной смеси в зависимости от температуры на впуске, коэффициента избытка воздуха в НССИ-процессе и степени сжатия двигателя.

В отличие от процесса сгорания в двигателях с искровым зажиганием и в дизелях НССИ режим горения не имеет возможности непосредственного управления моментом самовоспламенения [3]. В двигателе с принудительным воспламенением моментом начала сгорания топливовоздушной смеси управляют посредством изменения угла опережения зажигания, а в дизеле — за счет изменения угла опережения впрыскивания топлива в цилиндр.

Известно, что НССИ-режим чувствителен к изменению начальных условий. Без точного управления температурой, давлением и составом рабочей смеси возможны пропуски воспламенения, высокие давления сгорания, приводящие к динамическим перегрузкам кривошипно-шатунного механизма двигателя и к значительному росту концентрации NO_x в отработавших газах. В связи с этим для обеспечения нормальной работы НССИ-двигателя в широком диапазоне изменения режимов необходимо осуществлять фазировку горения смеси. Даже при незначительной вариации нагрузки момент начала самовоспламенения изменяется в широких пределах — от слишком раннего до слишком позднего. Поэтому требуется малоинерционное управление моментом начала самовоспламенения топливовоздушной смеси, которое может быть осуществлено посредством изменения исходной температуры смеси T_{in} и оперативным регулированием степени сжатия ϵ при различных значениях коэффициента избытка воздуха α .

Рабочими условиями необходимо управлять так, чтобы начало горения происходило при оптимальном угле поворота коленчатого вала (ПКВ). При возрастании нагрузки угол опережения самовоспламенения увеличивается и его необходимо «сдвинуть» ближе к ВМТ, так как при раннем угле сгорание смеси происходит при недопустимо высоких пиковых значениях давления и высокой температуре, что может ограничивать максимальную мощность двигателя. Таким образом, важно в первую очередь управлять фазой начала самовоспламенения, а не длительностью процесса горения в целом.

При одних и тех же начальных условиях в цилиндрах многоцилиндрового НССИ-двигателя наблюдаются вариации основных характеристик процесса горения. В работе [4] показано, что небольшие изменения температуры в системе охлаждения или смазки, неоднородности во впускном коллекторе, разница степени сжатия по цилиндрам и т.д. могут вызывать значительные отклонения

в процессе горения смеси. Поэтому в целях преодоления неравномерности горения по цилиндрам НССИ-двигателя необходима система управления, учитывающая эти изменения для каждого из цилиндров в отдельности.

Для создания эффективной системы управления НССИ-режимом двигателя необходимо изучить суть происходящих в камере сгорания процессов.

Исследователи НССИ-режима часто используют химико-кинетический (ХК) механизм окисления природного газа (ПГ) *GRI-Mech 3*, учитывающий кинетику горения, с участием 53 компонентов и 325 реакций. Этот механизм включает основные реакции горения метана, этана, пропана, включая реакции образования NO и других компонентов. Механизм позволяет моделировать горение ПГ в диапазоне изменения температуры 1000—2500 К, коэффициента избытка воздуха 0,2—10 и давления от 1 кПа до 1 МПа. *GRI-Mech 3* можно использовать также в исследованиях, связанных с догоранием природного газа при низких температурах. К его недостаткам можно отнести отсутствие механизма образования сажи и учета селективного некаталитического восстановления NO [7]. Несмотря на учет в механизме *GRI-Mech* метанола и ацетилен, расчет горения чистого метанола с его помощью не может быть осуществлен [6].

Ниже приведены результаты параметрического расчета сгорания пропана на базе ХК механизма *GRI-Mech 3* [7] в одноцилиндровой установке от момента закрытия впускного клапана до момента открытия выпускного при задании вариаций начальной температуры гомогенной смеси, степени сжатия и коэффициента избытка воздуха. С этой целью была разработана нульмерная однозонная модель, учитывающая химическую кинетику горения.

При расчете допускается, что все компоненты обладают свойствами идеального газа и пространственное распределение давления и температуры гомогенной смеси в текущий момент времени по объему цилиндра однородно; не учитываются: неоднородность распределения смеси по объему, тепловые потери в стенки цилиндра, степень турбулизации заряда и объем смеси, находящейся в тепловых зазорах над уплотнительными поршневыми кольцами.

Основные параметры нульмерной однозонной математической модели для одноцилиндровой установки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики одноцилиндровой установки

Диаметр цилиндра	8,25 см	Открытие выпускного клапана	10° до ВМТ
Объем цилиндра	0,612 л	Закрытие впускного клапана	38° до НМТ
Ход поршня	11,4 см	Частота вращения	1800 мин ⁻¹

Степень сжатия изменялась в пределах от 16,0 до 19,8; давление на впуске принято постоянным — 107 кПа; начальная температура менялась в диапазоне 425—463 К; коэффициент избытка воздуха задавался равным 5,0; 3,85; 3,0.

Результаты совместного решения уравнений первого закона термодинамики и химической кинетики [2] представлены на рис. 1. Как видно, зависимости момента начала самовоспламенения (Alf_F) от начальной температуры смеси T_{in} и степени сжатия ε для разных коэффициентов избытка воздуха α нелинейны.

Для сравнения приводятся две поверхности для $\alpha_3 = 3$ (верхняя поверхность) и для $\alpha_1 = 5$ (нижняя). С уменьшением α воспламенение происходит позже из-за растущих затрат энергии на разогрев большего числа молекул топлива. Причем поверхность для $\alpha_3 = 3$ идет круче чем для $\alpha_1 = 5$ с уменьшением T_{in} и ϵ .

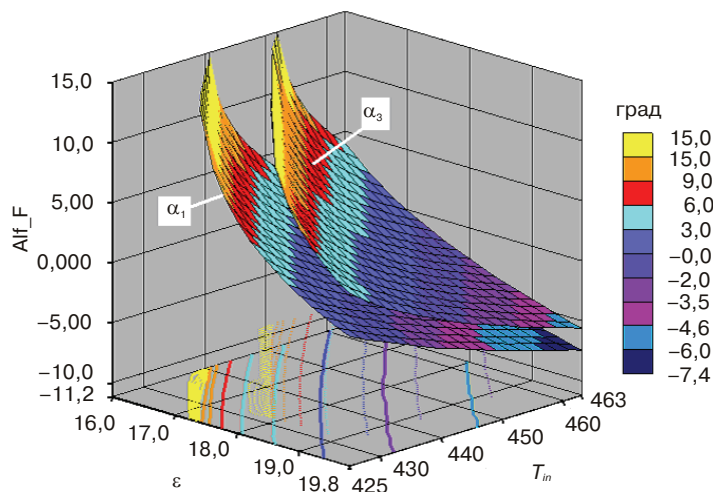


Рис. 1. Расчетные зависимости угла начала самовоспламенения (Alf_F) в НССИ-двигателе от исходной температуры смеси (T_{in} , К), степени сжатия (ϵ) при фиксированных коэффициентах избытка воздуха ($\alpha_1 = 5$; $\alpha_3 = 3$)

Из рис. 1 следует, что повышение начальной температуры гомогенной смеси от 425 до 463 К для различных степеней сжатия после закрытия впускного клапана, приводит к уменьшению угла начала самовоспламенения, причем на темп снижения угла Alf_F оказывают существенное влияние и температура и степень сжатия. При этом наблюдается наиболее высокая чувствительность угла начала самовоспламенения к температуре. Этот результат и следовало ожидать, так как согласно закона Аррениуса скорость химических реакций растет экспоненциально с ростом температуры.

На рис. 2 представлены три поверхности, отражающие зависимость индикаторной мощности от исходной температуры смеси T_{in} и степени сжатия ϵ при трех значениях коэффициента избытка воздуха α . При увеличении начальной температуры гомогенной смеси от 425 до 463 К и фиксированной степени сжатия, равной 19,8 наблюдается понижение индикаторной мощности вследствие снижения плотности рабочего тела. При той же ϵ (нижняя поверхность для $\alpha_1 = 5$) мощность N_i с ростом начальной температуры гомогенной смеси также уменьшается. Таким образом, максимальная индикаторная мощность в цилиндре НССИ-двигателя развивается при наименьшей T_{in} и наибольшей ϵ . Это объясняется наибольшей большей плотностью рабочего заряда в данных условиях.

При фиксированной температуре, например, равной 460 К, с уменьшением степени сжатия происходит снижение индикаторной мощности (см. рис. 2).

Для заданных T_{in} и ϵ при $\alpha_1 = 5$ (нижний график) нижняя граница диапазона устойчивой работы (линия b) определяется прямой проведенной по двум точкам

с координатами ($\varepsilon = 17,3$; $T_{in} = 425$ K) и (16; 440). При $\alpha_2 = 3,85$ (17,9; 425) и (16; 446). При $\alpha_3 = 3$ (18,45; 425) (16; 450). К видно из рис. 1, при уменьшении α диапазон устойчивой работы сужается. При этом за указанными границами происходят пропуски самовоспламенения ($N_i = 0$).

На плоскости XOY на рис. 2 показаны линии уровня, отображающие описанный выше характер изменения N_i от параметров T_{in} , ε при трех значениях α .

Для наглядности на рис. 3 представлено три поверхности зависимости максимальной температуры цикла (T_{max} , K) от исходной температуры смеси (T_{in} , K), степени сжатия (ε) при различных коэффициентах избытка воздуха α . Верхняя поверхность — для $\alpha_3 = 3$, средняя — для $\alpha_2 = 3,85$ и нижняя — для $\alpha_1 = 5$.

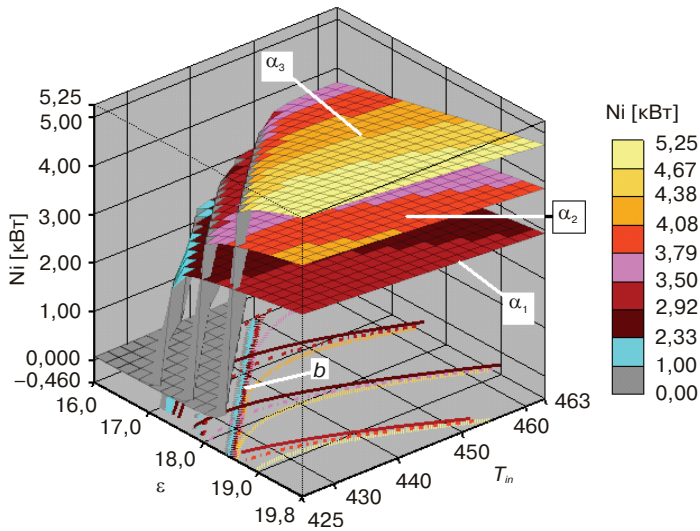


Рис. 2. Зависимости индикаторной мощности (N_i , кВт) от исходной температуры смеси (T_{in} , K), степени сжатия (ε) при фиксированных коэффициентах избытка воздуха ($\alpha_1 = 5$; $\alpha_2 = 3,85$; $\alpha_3 = 3$)

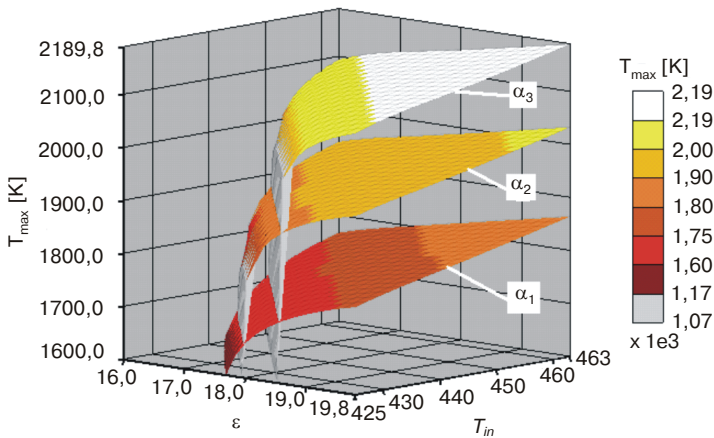


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры цикла (T_{max} , K) от исходной температуры смеси (T_{in} , K), степени сжатия (ε) при фиксированных коэффициентах избытка воздуха ($\alpha_1 = 5$; $\alpha_2 = 3,85$; $\alpha_3 = 3$)

Как следует из приведенных результатов расчета (рис. 3), увеличение T_{in} и ϵ приводит к росту максимальной температуры в цилиндре, причем максимумы температуры процесса горения для указанных трех вариантов по коэффициенту избытка воздуха α находятся в точке с максимальными показателями по T_{in} и ϵ .

На рис. 4 приведены три поверхности зависимостей выбросов оксидов азота NO_x для значений коэффициента избытка воздуха $\alpha_1 = 5$ (нижняя); $\alpha_2 = 3,85$ (средняя); $\alpha_3 = 3$ (верхняя). Приведенные выбросы NO_x зависят от максимальной температуры (рис. 3), что учитывается константами скорости химических реакций в механизме Зельдовича, включенного в модель *GRI-Mech 3.0*. Согласно рис. 3 топливовоздушная смесь при $\alpha_3 = 3$ обуславливает максимальные температуры процесса горения по сравнению с $\alpha_1 = 5$.

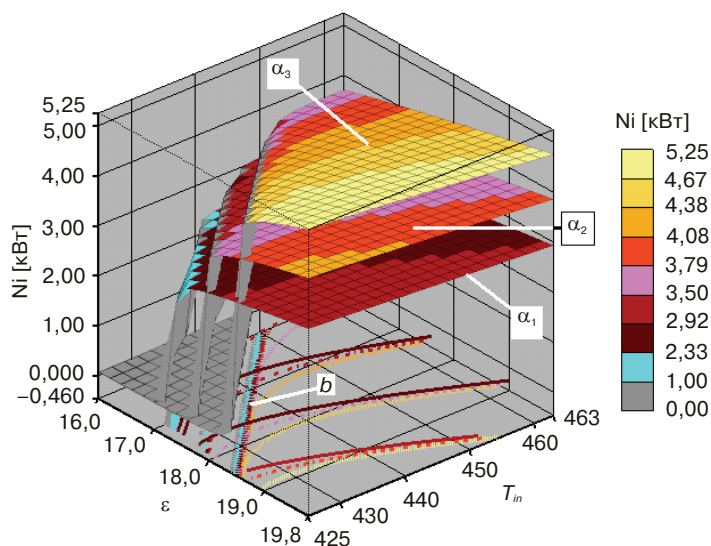


Рис. 4. Зависимость выбросов оксидов азота (NO_x , г/(кВт·ч)) от исходной температуры смеси (T_{in} , К), степени сжатия (ϵ) при фиксированных коэффициентах избытка воздуха ($\alpha_1 = 5$; $\alpha_2 = 3,85$; $\alpha_3 = 3$)

Из рис. 4 следует, что при $\alpha_3 = 3$ наблюдается резкий рост содержания компонентов NO_x в ОГ с увеличением T_{in} и ϵ . Содержание вредных компонентов в рамках диапазона ограниченного линией, проведенной по точкам ($\epsilon = 19,2$; $T_{in} = 463$ К) и ($19,8$; $457,7$) лежит в пределах 2 г/(кВт·ч). Это дает основание считать, что НСЦИ-двигатель преодолевает нормы по токсичным выбросам «Евро-5». Кроме того, высокий индикаторный КПД процесса НСЦИ (результаты расчета показали следующее: индикаторный КПД до 0,53 при $\alpha_1 = 5$; до 0,54 при $\alpha_2 = 3,85$ и до 0,55 при $\alpha_3 = 3$) объясняется меньшим временем протекания процесса тепловыделения в сравнении с дизелями и с двигателями с искровым зажиганием. Горение гомогенной смеси при $\alpha > 2$ не приводит к образованию сажи [1]. Как показали результаты расчета, удельный индикаторный расход топлива не превышает 150 г/(кВт·ч). Он понижается при увеличении T_{in} , ϵ и равен 138 г/(кВт·ч) для $\alpha_1 = 5$; 142 г/(кВт·ч) для $\alpha_2 = 3,85$ и 144 г/(кВт·ч) для $\alpha_3 = 3$.

Влияние на начало самовоспламенения T_{in} и ε в работе анализировалось не случайно, именно эти параметры выбраны в качестве основных для управления НССИ-процессом в экспериментальных конструкциях НССИ-двигателей.

Изменение температуры гомогенной смеси может достигаться, в частности, за счет подогрева воздушного заряда во впускном коллекторе. Для этого требуется установка электрического подогревателя или теплообменника с выхлопными газами. Подогрев заряда позволяет расширить рабочий диапазон НССИ-двигателя в область низких нагрузок (рис. 2). Однако при таком способе управления при относительно малых значениях α значительно возрастает концентрация NO_x (рис. 4). Тепловая инерционность системы подогрева воздуха на впуске является препятствием к ее практическому применению на транспортных средствах в условиях быстроменяющейся дорожной ситуации [4].

С повышением ε происходит раннее самовоспламенение топливовоздушной смеси, так как повышается температура и давление смеси. Более высокие ε предпочтительнее для НССИ-двигателя, в частности, из-за повышенного КПД и индикаторной мощности. НССИ-двигатель с меньшим ε больше подходит для поддержания устойчивой работы на малых нагрузках.

Благодаря незначительному времени отклика, управлять НССИ-процессом возможно в ДВС со встроенным в головку плунжером, позволяющим оперативно изменять действительную степень сжатия двигателя [8]. Такой механизм позволяет управлять рабочим процессом во время быстроменяющихся нагрузок, но существенно усложняет конструкцию двигателя. В работе [5] исследован искровой пятицилиндровый двигатель фирмы SAAB рабочим объемом 1,6 л с переменной степенью сжатия (9—21), переведенный в НССИ-режим с добавлением подогрева воздуха на входе за счет ОГ. Автор разработал и испытал математическую модель НССИ-двигателя, в которой учитывается влияние различных факторов на момент самовоспламенения. В результате был создан контроллер управляющий фазой начала горения в НССИ-двигателе за счет изменения ε и температуры воздуха на входе.

Разработанная однозонная нульмерная химико-кинетическая модель позволяет определять основные характеристики НССИ-процесса в двигателе, работающем в условиях разных начальных температур, степеней сжатия и нагрузок. Для расширения диапазона нагрузок, устойчивой и эффективной работы НССИ-двигателя необходима эффективная система управления, позволяющая реализовать оптимальные характеристики. Незначительные изменения нагрузки на НССИ-двигатель приводят к резкому изменению угла начала самовоспламенения и, следовательно, росту токсичных компонентов в ОГ. Расчетный эксперимент показал высокую эффективность, экономичность и экологичность НССИ-процесса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гусаков С.В., Махмоуд М. Э.-Г. Э.-Х. Опыт моделирования рабочего процесса ДВС с воспламенением гомогенного заряда от сжатия // РУДН, 2004 г. — 4 с.

- [2] Чесноков С.А. Химический турбулентный тепломассообмен в ДВС // ТулГУ, 2005 г.
- [3] Bengtsson J. Closed-Loop Control of HCCI Engine Dynamics // Lund, Swe, 04.
- [4] Flowers D.L. Combustion in HCCI Engines: Experiments and Detailed Chemical Kinetic Simulations // Thesis (Ph.D.), 2002 г.
- [5] Pfeiffer R. Combustion control of the Homogenous Charge Compression Ignition dynamics // Lund Institute of Technology, Sweden 2003 г.
- [6] Simmie J.M. Detailed chemical kinetic models for the combustion of hydrocarbon fuels // Department of Chemistry, National University of Ireland, 2003 г.
- [7] Smith G.P. et al. GRI-Mech 3.0 // http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/. 1999 г.
- [8] Soylu S. Examination of Combustion Characteristics of an HCCI Engine // Department of Automotive Education Sakarya University, Turkey, 1999 г.

ZERO-DIMENTIONAL CHEMICAL-KINETICS HCCI RESEARCH

S.V. Gusakov, I.V. Epifanov

Internal Combustion Engines' Department
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

Carried out the estimation of HCCI combustion process dependencies from inlet temperature, compression ratio and equivalence ratio using the natural gas chemical-kinetic mechanism *GRI-Mech 3*.