

Анализ энергетических и эмиссионных характеристик двигателя НССІ при генерации химически активных компонентов.

А.Н. Коробов^{1,2}, Н.С. Титова², А.М. Старик²

¹Московский физико-технический институт (государственный университет),

²Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова

В настоящее время в различных автомобильных фирмах ведутся исследования по созданию двигателя внутреннего сгорания с компрессионным воспламенением, в англоязычной литературе – Homogeneous Charge Compression Ignition (НССІ) engine. Это связано с рядом преимуществ такого двигателя по сравнению с традиционными двигателями внутреннего сгорания (ДВС) со свечой зажигания или дизельными двигателями, главным из которых является возможность сжигания бедных топливных смесей, что позволяет значительно снизить концентрацию вредных веществ в продуктах сгорания, таких как: NO, сажа и несгоревшие углеводороды.

В НССІ двигателе смесь самовоспламеняется вследствие сжатия. В камеру сгорания такого двигателя подается гомогенная перемешанная топливо–воздушная смесь. Основной проблемой при работе НССІ двигателя является узкий диапазон рабочих параметров и неустойчивость горения, особенно при низких нагрузках. Для решения этой проблемы предлагаются различные подходы: подбор специального топлива, использование добавок, стратификация (неравномерное распределение) горючего в цилиндре, дополнительная инжекция топлива, рециркуляция выхлопных газов и др. [1].

Целью данной работы является численное исследование влияния добавления химически активных компонентов на характеристики работы НССІ двигателя при использовании в качестве топлива синтез газа CO-H₂. В этой работе изучается влияние добавки озона O₃ и электронно-возбужденных молекул кислорода O₂(a¹Δ_g) с точки зрения расширения пределов устойчивой работы двигателя, увеличения производимой двигателем работы и изменения эмиссии вредных веществ, таких как окись азота NO и монооксид углерода CO.

Рассматривается рабочий процесс в цилиндре двигателя внутреннего сгорания НССІ. На *Рисунке 1* представлена схема двигателя, где D –диаметр цилиндра, L_c – длина шатуна, L_A – длина кривошипа, β – угол поворота коленчатого вала, отсчитываемый от верхней мертвой точки (ВМТ) в направлении вращения коленчатого вала. Основные параметры двигателя приведены в *Таблице 1*.

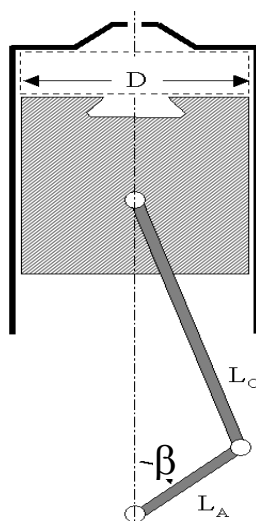


Рисунок 1- Схема HCCI двигателя.

Таблица 1- Параметры двигателя и условия эксплуатации.

Скорость вращения, об/мин	1000
Объем камеры, см ³	1575.87
Клиренс цилиндра, см ³	103.3
Степень сжатия	16.5
Угол закрытия клапана впускного канала, град	-142
Угол открытия клапана выхлопного канала, град	257

Все расчеты в работе выполнены в приближении однозонной модели без учета потерь тепла через стенки цилиндра, реализованной в пакете прикладных программ CHEMKIN [2]. Для полного описания горения решается система уравнений, включающая:

$$\text{Кинетические уравнения} \quad \rho \frac{dY_k}{dt} = \dot{\omega}_k W_k$$

$$\text{Уравнение энергии} \quad \rho C_v \frac{dT}{dt} = - \sum_k \dot{\omega}_k W_k u_k - \frac{P}{V} \frac{dV}{dt}$$

$$\text{Уравнение состояния} \quad PV = MRT \left(\sum_k \frac{Y_k}{W_k} \right)$$

Где ρ , M , P , V , T – плотность, масса, давление, объем и температура газа соответственно, Y_k , $\dot{\omega}_k$, W_k – массовая доля, молярная скорость образования и молекулярный вес k -го компонента смеси, C_v – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, R – универсальная газовая постоянная.

В расчетах использовался детальный кинетический механизм окисления синтез газа CO-H₂, разработанный в [3]. Этот механизм включает реакции с участием как молекул озона O₃, так и электронно-возбужденных молекул кислорода O₂(a¹Δ_g), O₂(b¹Σ_g⁺). Для описания образования оксидов азота этот механизм был дополнен блоком реакций, описывающих образование N-содержащих компонентов [4]. Полный кинетический механизм включает 25 компонентов:

- H, H₂, O, O₂, O₃, OH, H₂O, HO₂, H₂O₂, O₂(a¹Δ_g), O₂(b¹Σ_g⁺);
- CO, CO₂, HCO, CH₂O;
- N, N₂, NO, NO₂, N₂O, CN, HCN, CNO, CCN, C₂N₂.

Необходимые для вычислений термодинамические данные индивидуальных компонентов были взяты из [5].

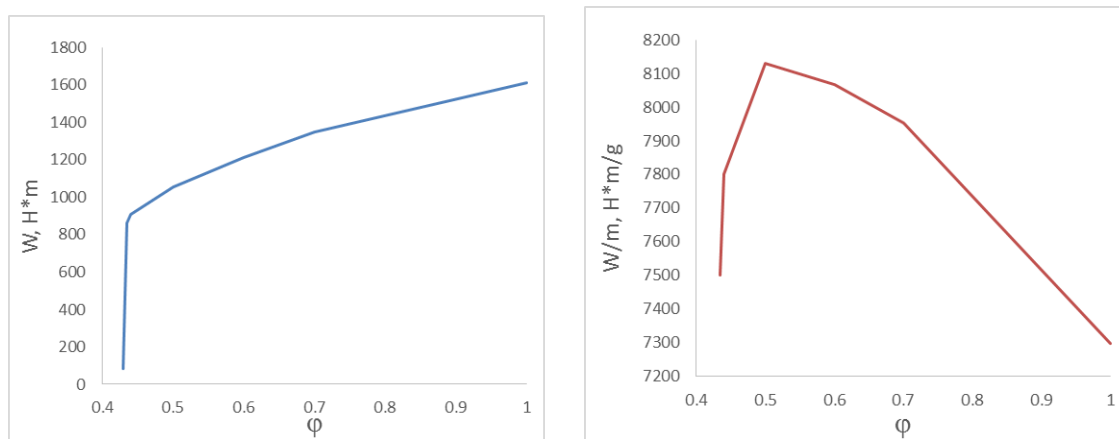
В качестве топлива используется синтез газ с составом CO/H₂=1/1. Для управления процессом горения и воспламенения, в этой смеси создавались активные частицы: озон O₃ и синглетный кислород O₂(a¹Δ_g). Такие молекулы могут быть созданы либо в электрическом разряде, либо лазерным излучением. Рассмотрим смеси, в которых 0.1%, 0.5% или 1% кислорода преобразуется в O₂(a¹Δ_g). Энергия, требуемая на возбуждение молекулы O₂ в состояние a¹Δ_g существенно меньше, чем энергия, необходимая для ее диссоциации и образования O₃. Поэтому при одинаковой затраченной энергии, концентрация молекул O₂(a¹Δ_g) в смеси будет больше, чем молекул озона.

В НССИ сгорание топлива реализуется в результате самовоспламенения горючей смеси. Самовоспламенение определяется составом горючей смеси и параметрами газа, такими как начальная температура газа T₀, давление P₀ и коэффициент избытка топлива φ. Момент воспламенения часто определяют по максимуму градиента температуры. Угол, при котором градиент температуры достигает максимума, назовем углом воспламенения (β*). Для нормальной работы двигателя необходимо, чтобы воспламенение горючей смеси происходило после прохождения поршнем верхней мертвой точки (ВМТ), то есть при β*>0.

В первой части работы анализируются энергетические и эмиссионные характеристики двигателя при использовании в качестве топлива синтез-газ CO/H₂=1/1. Начальная температура топливо-воздушной смеси (T₀=386.3 К) определялась так, чтобы при коэффициенте избытка топлива равном 0.5 (φ=0.5) угол воспламенения был равен 10° (β*=10°). При данном составе топлива и начальной температуре во всем рабочем диапазоне были получены основные энергетические и эмиссионные характеристики, такие как работа двигателя за цикл, удельная работа (работа единицы массы топлива) и концентрации NO и CO по завершению цикла. Эти характеристики представлены на *Рисунке 2*.

а)

б)



в)

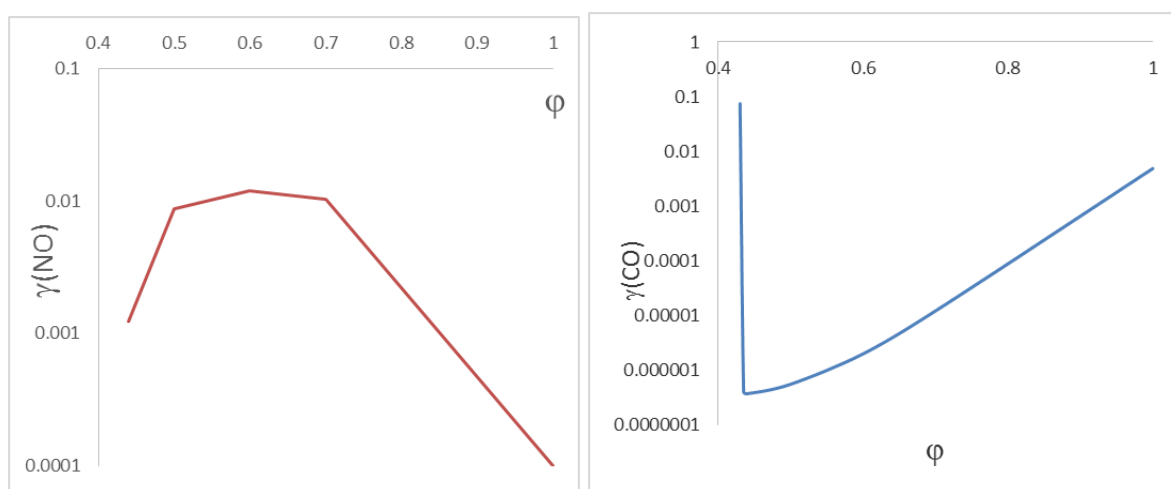


Рисунок 2 – характеристики НСЦИ двигателя, работающего на CO-H_2 при $T_0=386.3\text{K}$: а) W – работа двигателя за цикл. б) W/m - удельная работа. в) концентрации NO и CO .

Следующим этапом являлось исследование работы двигателя при использовании того же топлива, но с добавлением активных частиц $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ и O_3 во количестве 0.1, 0.5, и 1% при начальной температуре, определенной для случая чистого синтез-газа ($T_0=386.3\text{ K}$). Результаты расчетов показали, что добавление активных частиц ускоряет процесс горения (см. *Рисунок 3*). Это приводит к более раннему воспламенению и к увеличению температуры и давления в цилиндре, в следствии чего повышается и производимая двигателем работа при $\beta^*>0$, как показано на *рисунке 4*. Дальнейшее падение работы связано с преждевременным воспламенением до ВМТ. Более важным результатом является то, что присутствие небольшого количества активных частиц (0.1%) позволяет расширить рабочий диапазон по ϕ в область более бедных смесей, что показано на *рисунке 5*. А как известно обеднение топливо-воздушной смеси сопровождается уменьшением температур горения, что позволяет снизить концентрацию NO (см *Рисунок б*).

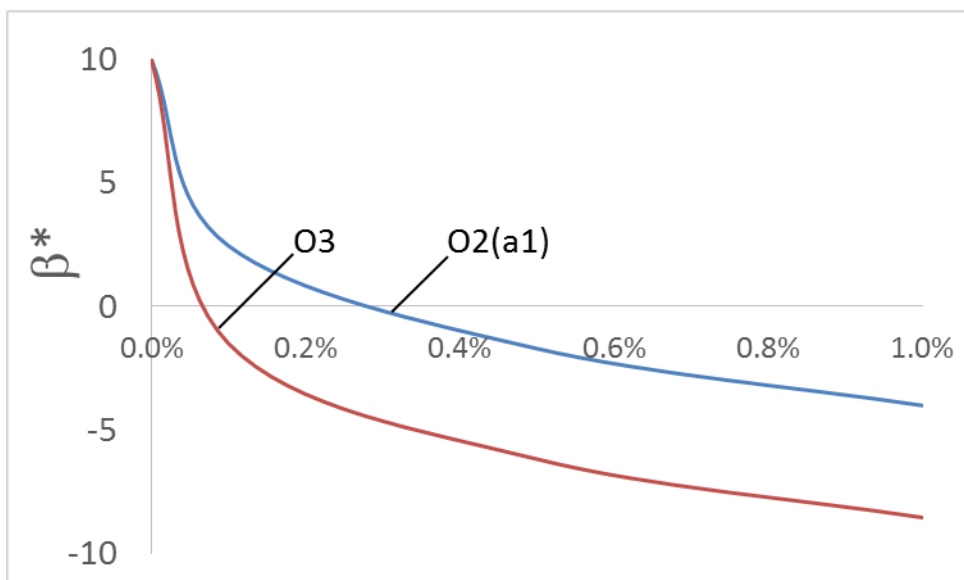


Рисунок 3 – зависимость угла воспламенения смеси при $\phi = 0.5$ от концентрации активных частиц (0.1, 0.5, 1% $O_2(a^1\Delta g)$ и O_3).

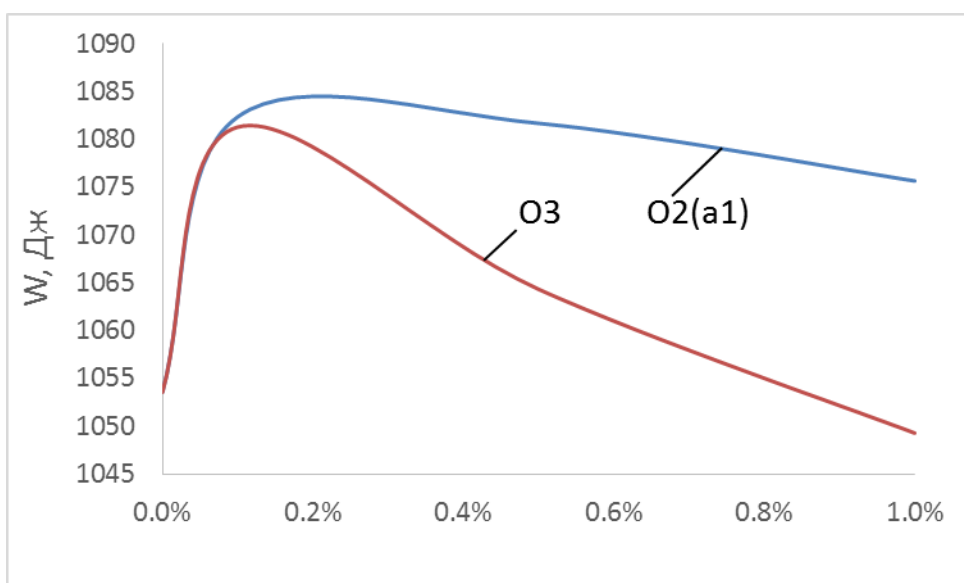


Рисунок 4 – работа, производимая двигателем при использовании топливо-воздушной смеси с $\phi = 0.5$ с использованием добавок (0.1, 0.5, 1% $O_2(a^1\Delta g)$ и O_3).

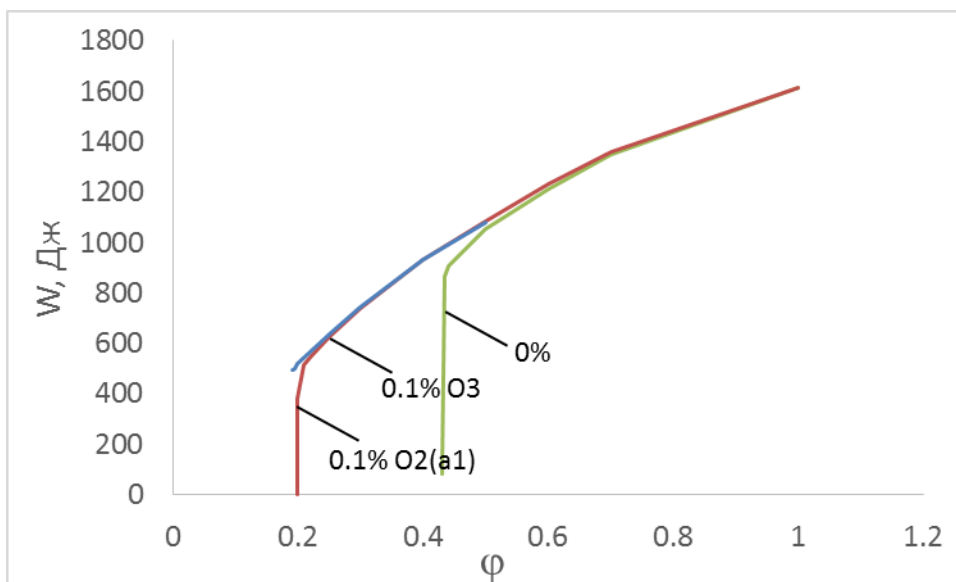


Рисунок 5 – влияние присутствия 0.1% активных частиц ($O_2(a^1)$ и O_3) в топливно-воздушной смеси (при $T_0=386.3$ К) на диапазон работы двигателя.

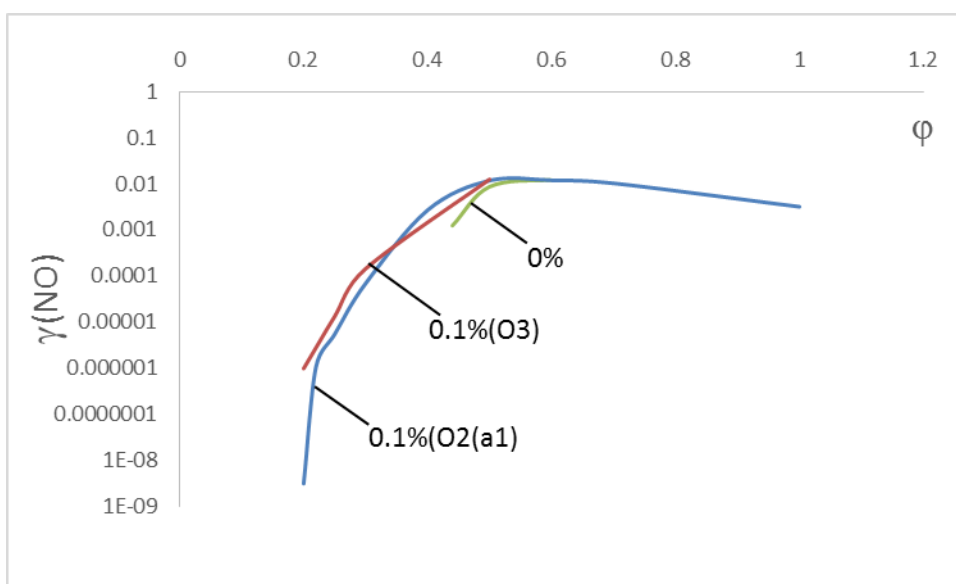


Рисунок 6 – концентрации NO для чистого синтез-газа (0%), с добавлением 0.1%(O_3), и с добавлением 0.1%($O_2(a1)$).

В результате исследования было получено, что добавлением в топливо $O_2(a^1\Delta_g)$ позволяет обеспечить работу НСЦИ двигателя на более бедных топливных смесях. Добавление 0.1%($O_2(a1)$) расширяет рабочий диапазон по ϕ с (0.43;1) до (0.2;1). Так же было показано, что обеднение смеси способствует уменьшению концентрации NO по завершению цикла.

Литература

1. Yao M., Zheng Z., Liu H. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 35 (2009) 398–437.
2. Kee R.J., Rupley F.M., Miller J.A. [et. al.]. CHEMKIN Release 4.0, Reaction Design, Inc., San Diego, CA. (2004)
3. Старик А.М., Титова Н.С., Шарипов А.С., Козлов В.Е. О механизме окисления синтез-газа. *ФГВ* 2010. Т.46. №5. С. 3-19.
4. Starik A.M., Kozlov V.E., Titova N.S. On the influence of singlet oxygen molecules on the speed of flame propagation in methane-air mixture. *Combustion and Flame* 2010 V.157. N.2. P.313-327.
5. Гурвич Л. В., Хачкурузов Г. А., Медведев В. А. [и др.]. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука, 1978.
6. Burcat A., Ruscic B. Third Millennium Ideal Gas and Condensed Phase Thermochemical Database for Combustion with updates from Active Thermochemical Tables, ANL-05/20 and TAE 960 Technion-IIT, Aerospace Engineering, and Argonne National Laboratory, Chemistry Division, September 2005.