

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ МЕТАНА С ОБРАЗОВАНИЕМ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В НСЦИ ДВИГАТЕЛЕ

А.П. Сеначин<sup>1</sup>, А.А. Коржавин<sup>1,2</sup>

*Приведена математическая модель газового поршневого НСЦИ двигателя (гомогенного заряда с воспламенением от сжатия), работающего на метане или природном газе, с детальным кинетическим механизмом из 273 реакций с 35 частицами. Модель позволяет на основе численного моделирования оптимизировать рабочий процесс и образование вредных веществ в НСЦИ двигателе.*

*Ключевые слова: численное моделирование, поршневой двигатель, НСЦИ двигатель, гомогенный заряд, воспламенение от сжатия, детальный кинетический механизм, образование вредных веществ.*

В последние годы интерес исследователей привлекает новая технология организации рабочего процесса поршневого двигателя – НСЦИ-процесс (технология гомогенного заряда с воспламенением от сжатия) [1-4]. В настоящее время зарубежные авторы моделируют рабочий процесс НСЦИ двигателя на основе детальной кинетики химических реакций [5-7]. Однако, неэмпирические детальные кинетические механизмы (ДКМ) окисления углеводородов содержат тысячи элементарных реакций и сотни частиц, что препятствует применению подобных ДКМ при моделировании горения в ДВС. Кроме того, в настоящее время эти ДКМ или отсутствуют или практически недоступны (полностью не опубликованы).

Для численного моделирования горения метана в двигателе НСЦИ-процесса необходимо иметь достаточно простой и надежный ДКМ. В работе специалистов Института химической физики РАН В.Я. Басевича, В.И. Веденева и В.С. Арутюнова «Моделирование задержек самовоспламенения метано-воздушных смесей в двигателе внутреннего сгорания» [8] впервые в России предложен компактный ДКМ из 128 обратимых реакций с 29 частицами, который по данным ряда авторов является достаточно точным механизмом горения легких углеводородов [9]. Этот механизм в качестве одного из продуктов реакции включает монооксид углерода  $CO$ , что является весьма важным для экологической характеристики процесса горения. Для оценки выхода оксида азота  $NO$  при горении метана следует к этому механизму добавить соответствующий ДКМ, который предстоит выбрать.

В работе В.А. Звонова и М.П. Гиринови-

ча «Анализ механизмов образования оксидов азота при горении углеводородных топлив в камере сгорания ДВС» [10] рассмотрены три возможных механизма:

- образования «термических» оксидов азота по механизму Я.Б. Зельдовича, П.Я. Садовникова и Д.А. Франк-Каменецкого [11];

- образования «быстрых» оксидов азота через углеводородный радикал  $CH$  по механизму Фенимора [12];

- эмиссия «быстрых» оксидов азота по механизму Мальте с сотрудниками через образование закиси азота  $N_2O$  [13] (вклад этого механизма пренебрежимо мал [9]).

В монографии [9], на основе работ [10-12], приведен механизм образования оксидов азота из 17 реакций с 14 частицами ДКМ-17/14, который, на наш взгляд, является наиболее подходящим для совместного использования с механизмом горения метана, поскольку он включает образование оксидов азота по механизмам Зельдовича (Таблица 1, реакции 257-262) и Фенимора (Таблица 1, реакции 263-273).

Таким образом, на основе механизма ДКМ-256/29 [8, 9] и механизма ДКМ-17/14 [9-12] можно составить совместный механизм горения метана (с образованием вредных веществ), состоящий из 273 реакций с 35 частицами, а именно ДКМ-273/35 (Таблица 1). Принятый механизм ДКМ-273/35 используется в нижеприведенной математической модели горения метана и природного газа в НСЦИ двигателе, причем в модели в составе атмосферного воздуха учитываются аргон  $Ar$  (как инертный компонент), а также азот  $N_2$ , пары воды  $H_2O$  и диоксид углерода  $CO_2$  (как реагирующие компоненты).

**Математическая модель**

Математическая модель близка к модели в работе [14].

В начале расчета необходимо задаться действительным коэффициентом избытка воздуха  $\alpha_a$  (с учетом коэффициентов остаточных газов  $\gamma_g$  и наполнения цилиндра  $\eta_V$ ) в момент закрытия впускного клапана (угол ПКВ  $\varphi_a$ ) и определить молярный состав исходной смеси по 6 компонентам (индекс  $j$ ) -  $O_2$  (1),  $N_2$  (2),  $H_2O$  (3),  $Ar$  (4),  $CO_2$  (5),  $CH_4$  (6), то есть найти число молей заряда  $v_{aj}$  (где  $j=1..6$ ), с учетом уравнения состояния и объема смеси в начале процесса сжатия

$$p_a V_a = RT_a \sum v_{aj} = v_a RT_a,$$

$$\frac{V_a}{V_c} = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left( 1 - \cos \varphi_a + \frac{1}{\lambda} - \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \sin^2 \varphi_a} \right)$$

где  $V_c = 2r_0 (\pi D^2 / 4) / (\varepsilon - 1)$  - объем камеры сгорания;  $\varepsilon$  - геометрическая степень сжатия;  $\lambda = r_0 / l$  - отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;  $D$  - диаметр поршня.

Контроль числа атомов кислорода  $O$ , водорода  $H$ , углерода  $C$ , азота  $N$  и аргона  $Ar$  будем проводить на каждом шаге расчета, причем исходное количество этих атомов в топливно-воздушном заряде в единицах числа Авогадро равно:

- для кислорода

$$\sum O = 2v_{a1} + v_{a3} + 2v_{a5};$$

- для водорода

$$\sum H = 2v_{a3} + 4v_{a6};$$

- для углерода

$$\sum C = v_{a5} + v_{a6};$$

- для азота

$$\sum N = 2v_{a2};$$

- для аргона

$$\sum Ar = v_{a4}.$$

**Математическая модель** рабочего цикла НССИ двигателя содержит блок химических уравнений и систему уравнений объемного горения смеси (при изменении температуры  $T$ , объема  $V$  и давления  $p$ ).

**Блок химических уравнений** материального баланса ДКМ-273/35 включает:

- уравнения скоростей химических реакций (Таблица 1)

$$w_i = k_{0i} T^{n_i} \prod_{ij} A_{ij} \cdot \exp(-E_i / RT),$$

- уравнения концентраций компонентов смеси (36 частиц с учетом аргона  $Ar$ ) [15]

$$\begin{aligned} \dot{A}_j &= \frac{W_j}{2\pi n_0} + A_j \left( \frac{\dot{p}}{p} - \frac{\dot{T}}{T} - \frac{RT}{p} \sum_i \frac{\chi_i w_i}{2\pi n_0} \right) = \\ &= \frac{W_j}{2\pi n_0} - A_j \frac{\dot{V}}{V}, \end{aligned} \quad (274)-(309)$$

(где  $\dot{V} = dV/d\varphi$  - производная по углу ПКВ),

- уравнения скоростей образования частиц (молекул и радикалов)

$$W_j = \sum_i \xi_{ij} w_i, \quad (310)-(345)$$

где  $k_{0i}, E_i$  - предэкспонент константы скорости и энергия активации  $i$ -ой реакции;  $A_{ij}, \xi_{ij}$  - концентрация и стехиометрический коэффициент  $j$ -ой частицы, вступающей в  $i$ -ю реакцию (с соответствующим знаком);  $\chi_i$  - коэффициент молекулярного превращения  $i$ -й реакции;  $n_0$  - частота ПКВ. Очевидно, что в уравнениях (274-309) сумма  $\sum_i \chi_i w_i$ , с

учетом (310-345), равна

$$\sum_i \chi_i w_i = \sum_j W_j = \sum_j \sum_i \xi_{ij} w_i.$$

**Блок термодинамики и контроля** включает уравнения:

- кинематики рабочего объема для одного цилиндра двигателя

$$\dot{V} = V_c \frac{\varepsilon - 1}{2} \sin \varphi \left( 1 + \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1/\lambda^2 - \sin^2 \varphi}} \right), \quad (346)$$

- состояния смеси (идеального газа)

$$\frac{p}{RT} = \sum_j \frac{v_j}{V} = \sum_j A_j, \quad (347)$$

- динамики давления в цилиндре двигателя (энергии всей системы)

$$\begin{aligned} p \left( 1 - \frac{R}{\langle C_p \rangle} \right) &= - \frac{p}{V} \dot{V} + RT \sum_j \dot{A}_j + \\ &+ \frac{R}{\langle C_p \rangle} \left( \frac{\dot{Q}_W}{V} - \frac{1}{2\pi n_0} \sum_i h_i w_i \right), \end{aligned} \quad (348)$$

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ МЕТАНА С  
ОБРАЗОВАНИЕМ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В НСЦИ ДВИГАТЕЛЕ

- теплообмена со стенками (цилиндра, крышки и поршнем)

$$2\pi n_0 \cdot \dot{Q}_W = \sum_{k=1}^3 \alpha_k F_k (T_k - T) = \quad (349)$$

$$= \frac{4\alpha_1}{D} (V - V_c)(T_1 - T) + \alpha_{23} (F_2 + F_3)(T_{23} - T).$$

- контрольного отношения текущего числа атомов всех компонентов (частиц) к начальному количеству атомов (в процентах)

$$K = \frac{100V \sum_j A_j n_j}{\sum O + \sum H + \sum C + \sum N + \sum Ar} \quad (350)$$

Здесь  $\langle C_p \rangle$  - средняя молярная теплоемкость при постоянном давлении;  $h_i$  - теплота (энтальпия)  $i$ -ой реакции;  $\alpha_1, \alpha_{23}$  - коэффициенты теплоотдачи;  $T_1, T_{23}$  - температуры стенок;  $F_2, F_3$  - площади теплообмена с крышкой и поршнем;  $n_j$  - число атомов в  $j$ -ой частице.

**Численное интегрирование** системы уравнений (1)-(350) проводится по собственной программе, с привлечением специальных методов интегрирования систем жестких уравнений. При этом начало интенсивных химических превращений – объемное самовоспламенение смеси контролируется с помощью специальной безразмерной функции процесса - дифференциального критерия самовоспламенения [16]

$$FUN(\varphi) = \frac{\dot{T}}{T} \bigg/ \frac{\dot{p}}{p} = \frac{\dot{\ln T}}{\dot{\ln p}} = \text{const}, \quad (351)$$

где значение константы равно 1-10.

Таблица 1 – Сокращенный ДКМ-273/35 окисления метана (реакции 1-256) и образования оксида азота (реакции 257-273)

| №  | Обратимые реакции (N+1 для обратной) |
|----|--------------------------------------|
| 1  | $OH + H_2 \leftrightarrow H + H_2O$  |
| 3  | $OH + O \leftrightarrow H + O_2$     |
| 5  | $OH + H \leftrightarrow O + H_2$     |
| 7  | $OH + OH \leftrightarrow O + H_2O$   |
| 9  | $H + H + M \leftrightarrow H_2 + M$  |
| 11 | $O + O + M \leftrightarrow O_2 + M$  |
| 13 | $OH + H \leftrightarrow H_2O$        |
| 15 | $O + H + M \leftrightarrow OH + M$   |

|    |   |
|----|---|
| 17 | $H + HO_2 \leftrightarrow H_2 + O_2$        |
| 19 | $H + O_2 \leftrightarrow HO_2$              |
| 21 | $H + HO_2 \leftrightarrow OH + OH$          |
| 23 | $O + HO_2 \leftrightarrow O_2 + OH$         |
| 25 | $OH + HO_2 \leftrightarrow O_2 + H_2O$      |
| 27 | $H + HO_2 \leftrightarrow H_2O + O$         |
| 29 | $OH + H_2O_2 \leftrightarrow HO_2 + H_2O$   |
| 31 | $H + H_2O_2 \leftrightarrow H_2O + OH$      |
| 33 | $OH + OH \leftrightarrow H_2O_2$            |
| 35 | $O + H_2O_2 \leftrightarrow O_2 + H_2O$     |
| 37 | $H + H_2O_2 \leftrightarrow H_2 + HO_2$     |
| 39 | $HO_2 + HO_2 \leftrightarrow H_2O_2 + O_2$  |
| 41 | $O + H_2O_2 \leftrightarrow HO_2 + OH$      |
| 43 | $CO + OH \leftrightarrow CO_2 + H$          |
| 45 | $CO + HO_2 \leftrightarrow CO_2 + OH$       |
| 47 | $CO + O \leftrightarrow CO_2$               |
| 49 | $CO + O_2 \leftrightarrow CO_2 + O$         |
| 51 | $H_2CO + OH \leftrightarrow HCO + H_2O$     |
| 53 | $H_2CO + H \leftrightarrow HCO + H_2$       |
| 55 | $H_2CO + O \leftrightarrow HCO + OH$        |
| 57 | $HO_2 + HCO \leftrightarrow H_2CO + O_2$    |
| 59 | $H + CO \leftrightarrow HCO$                |
| 61 | $H_2CO + HO_2 \leftrightarrow H_2O_2 + HCO$ |
| 63 | $HCO + O_2 \leftrightarrow HO_2 + CO$       |
| 65 | $O + HCO \leftrightarrow H + CO_2$          |
| 67 | $HCO + H \leftrightarrow H_2CO$             |
| 69 | $OH + HCO \leftrightarrow CO + H_2O$        |
| 71 | $H + HCO \leftrightarrow H_2 + CO$          |
| 73 | $O + HCO \leftrightarrow OH + CO$           |
| 75 | $OH + CH_4 \leftrightarrow CH_3 + H_2O$     |
| 77 | $H + CH_4 \leftrightarrow CH_3 + H_2$       |
| 79 | $O + CH_4 \leftrightarrow OH + CH_3$        |
| 81 | $HO_2 + CH_3 \leftrightarrow O_2 + CH_4$    |
| 83 | $H + CH_3 \leftrightarrow CH_4$             |
| 85 | $CH_3 + H_2O_2 \leftrightarrow HO_2 + CH_4$ |
| 87 | $CH_3 + H_2CO \leftrightarrow HCO + CH_4$   |
| 89 | $HCO + CH_3 \leftrightarrow CO + CH_4$      |
| 91 | $O + CH_3O \leftrightarrow CH_3 + O_2$      |

|     |  |
|-----|--|
| 93  | $OH + CH_3 \leftrightarrow CH_2 + H_2O$          |
| 95  | $O + CH_2 \leftrightarrow H + HCO$               |
| 97  | $CH_2 + H_2O \leftrightarrow H_2 + H_2CO$        |
| 99  | $CH_2 + O_2 \leftrightarrow OH + H + CO$         |
| 101 | $CH_2 + O_2 \leftrightarrow H + H + CO_2$        |
| 103 | $CH_3 + O_2 \leftrightarrow OH + H_2CO$          |
| 105 | $O + CH_3 \leftrightarrow H + H_2CO$             |
| 107 | $CH_3 + O_2 \leftrightarrow CH_3O_2$             |
| 109 | $OH + CH_3O \leftrightarrow CH_3O_2H$            |
| 111 | $CH_3O_2 \leftrightarrow OH + H_2CO$             |
| 113 | $HO_2 + CH_3 \leftrightarrow H_2O + H_2CO$       |
| 115 | $CH_3O_2H + CH_3 \leftrightarrow CH_3O_2 + CH_4$ |
| 117 | $OH + CH_2 \leftrightarrow H_2O + CH$            |
| 119 | $H + CH_2 \leftrightarrow H_2 + CH$              |
| 121 | $O + CH_2 \leftrightarrow OH + CH$               |
| 123 | $OH + CH \leftrightarrow H_2 + CO$               |
| 125 | $O + CH \leftrightarrow H + CO$                  |
| 127 | $OH + CH_3 \leftrightarrow CH_3OH$               |
| 129 | $HO_2 + CH_3O \leftrightarrow CH_3OH + O_2$      |
| 131 | $CH_3O + CH_4 \leftrightarrow CH_3OH + CH_3$     |
| 133 | $OH + CH_3OH \leftrightarrow H_2O + CH_3O$       |
| 135 | $H + CH_3OH \leftrightarrow H_2 + CH_3O$         |
| 137 | $O + CH_3OH \leftrightarrow OH + CH_3O$          |
| 139 | $CH_3O + O_2 \leftrightarrow HO_2 + H_2CO$       |
| 141 | $H + H_2CO \leftrightarrow CH_3O$                |
| 143 | $OH + CH_3O \leftrightarrow H_2O + H_2CO$        |
| 145 | $H + CH_3O \leftrightarrow H_2 + H_2CO$          |
| 147 | $O + CH_3O \leftrightarrow OH + H_2CO$           |
| 149 | $O_2 + C_2H_2 \leftrightarrow HCO + HCO$         |
| 151 | $C_2H + H + M \leftrightarrow C_2H_2 + M$        |
| 153 | $C_2H + H_2 \leftrightarrow C_2H_2 + H$          |
| 155 | $C_2H + O_2 \leftrightarrow CO + HCO$            |
| 157 | $OH + C_2H_2 \leftrightarrow CH_3 + CO$          |
| 159 | $O + C_2H_2 \leftrightarrow CH_2 + CO$           |
| 161 | $H + C_2H_2 \leftrightarrow C_2H_3$              |
| 163 | $H_2 + C_2H_2 + M \leftrightarrow C_2H_4 + M$    |
| 165 | $O_2 + C_2H_4 \leftrightarrow OH + C_2H_3CO$     |

|     |  |
|-----|--|
| 167 | $OH + C_2H_4 \leftrightarrow H_2O + C_2H_3$      |
| 169 | $H_2 + C_2H_3 \leftrightarrow H + C_2H_4$        |
| 171 | $O + C_2H_4 \leftrightarrow HCO + CH_3$          |
| 173 | $O_2 + C_2H_3 \leftrightarrow HO_2 + C_2H_2$     |
| 175 | $OH + C_2H_3 \leftrightarrow HCO + CH_3$         |
| 177 | $OH + CH_3 \leftrightarrow H_2O + C_2H_2$        |
| 179 | $H + C_2H_3 \leftrightarrow H_2 + C_2H_2$        |
| 181 | $O + C_2H_3 \leftrightarrow CH_3 + CO$           |
| 183 | $O + C_2H_3 \leftrightarrow OH + C_2H_2$         |
| 185 | $CH_4 + C_2H_3 \leftrightarrow CH_3 + C_2H_4$    |
| 187 | $CH_3 + CH_3 \leftrightarrow C_2H_4 + H_2$       |
| 189 | $C_2H_4 + H + H \leftrightarrow CH_3 + CH_3$     |
| 191 | $H_2CO + C_2H_3 \leftrightarrow HCO + C_2H_4$    |
| 193 | $HCO + CH_3 \leftrightarrow CH_3CHO$             |
| 195 | $HO_2 + CH_3CO \leftrightarrow CH_3CHO + O_2$    |
| 197 | $OH + CH_3CHO \leftrightarrow H_2O + CH_3CO$     |
| 199 | $H + CH_3CHO \leftrightarrow H_2 + CH_3CO$       |
| 201 | $O + CH_3CHO \leftrightarrow OH + CH_3CO$        |
| 203 | $H_2O_2 + CH_3CO \leftrightarrow HO_2 + CH_3CHO$ |
| 205 | $CH_3 + CO \leftrightarrow CH_3CO$               |
| 207 | $H + CH_3CO \leftrightarrow HCO + CH_3$          |
| 209 | $O + CH_3CO \leftrightarrow CO + CH_3O$          |
| 211 | $HO_2 + C_2H_5 \leftrightarrow O_2 + C_2H_6$     |
| 213 | $CH_3 + CH_3 \leftrightarrow C_2H_6$             |
| 215 | $OH + C_2H_6 \leftrightarrow H_2O + C_2H_5$      |
| 217 | $H + C_2H_6 \leftrightarrow H_2 + C_2H_5$        |
| 219 | $O + C_2H_6 \leftrightarrow OH + C_2H_5$         |
| 221 | $H_2O_2 + C_2H_5 \leftrightarrow HO_2 + C_2H_6$  |
| 223 | $H + C_2H_4 \leftrightarrow C_2H_5$              |
| 225 | $C_2H_5 + O_2 \leftrightarrow HO_2 + C_2H_4$     |
| 227 | $C_2H_5 + O_2 \leftrightarrow H_2CO + CH_3O$     |
| 229 | $OH + C_2H_5 \leftrightarrow CH_3 + CH_3O$       |
| 231 | $OH + C_2H_5 \leftrightarrow H_2O + C_2H_4$      |
| 233 | $H + C_2H_5 \leftrightarrow CH_3 + CH_3$         |
| 235 | $H + C_2H_5 \leftrightarrow CH_2 + CH_4$         |
| 237 | $H + C_2H_5 \leftrightarrow C_2H_6$              |

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ МЕТАНА С  
ОБРАЗОВАНИЕМ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В HCCI ДВИГАТЕЛЕ

|   |   |
|---|---|
| 239                                     | $H + C_2H_5 \leftrightarrow H_2 + C_2H_4$       |
| 241                                     | $O + C_2H_5 \leftrightarrow CH_3 + H_2CO$       |
| 243                                     | $O + C_2H_5 \leftrightarrow OH + C_2H_4$        |
| 245                                     | $H_2 + C_2H \leftrightarrow H + C_2H_2$         |
| 247                                     | $HO_2 + C_2H_3 \leftrightarrow H_2O_2 + C_2H_2$ |
| 249                                     | $HO_2 + C_2H_2 \leftrightarrow C_2H_3O_2$       |
| 251                                     | $CH_3O_2 + CH_3 \leftrightarrow CH_3O + CH_3O$  |
| 253                                     | $CH_3O_2 + HO_2 \leftrightarrow CH_3O_2H + O_2$ |
| 255                                     | $CH_3 + HO_2 \leftrightarrow CH_3O + OH$        |
| <b>Образование NO (реакции 257-273)</b> |   |
| 257                                     | $N + NO \leftrightarrow N_2 + O$                |
| 259                                     | $N + O_2 \leftrightarrow NO + O$                |
| 261                                     | $N + OH \leftrightarrow NO + H$                 |
| 263                                     | $CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N$              |
| 265                                     | $HCN + H \leftrightarrow CN + H_2$              |
| 267                                     | $HCN + OH \leftrightarrow CN + H_2O$            |
| 269                                     | $CN + O_2 \leftrightarrow CO + NO$              |
| <b>№</b>                                | <b>Прямые реакции</b>                           |
| 271                                     | $CN + OH \rightarrow CO + NH$                   |
| 272                                     | $NH + OH \rightarrow NO + H_2$                  |
| 273                                     | $NH + NO \leftrightarrow N_2 + OH$              |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yokota, H. New Concept for Low Emission Diesel Combustion / H. Yokota, Y. Kudo, H. Nakajima, T. Kakegawa and T.A. Suzuki // SAE paper.- 1997.- 97-0891.
2. Камалтдинов, В.Г. Моделирование процесса сгорания в двигателях внутреннего сгорания с воспламенением гомогенного заряда от сжатия / В.Г. Камалтдинов, Е.В. Абелиович, А.С. Терехов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2007. – Вып. 10.- № 25(97).- С. 44–47.
3. Камалтдинов, В.Г. Управление рабочим процессом в HCCI двигателе / В.Г. Камалтдинов, С.С. Никифоров // Двигателестроение.- 2010.- № 3 (241).- С. 3–9.
4. Glewen, William J. Analysis of cyclic variability in spark-assisted HCCI combustion using a double Wiebe function / William J. Glewen, Robert M. Wagner, K. Dean Edwards, C. Stuart Daw // Proceeding of the Comb. Institute.- 2009.- Vol. 32.- P. 2885-2892.
5. Tsurushima, T. A new skeletal PRF kinetic model for HCCI combustion / T. Tsurushima // Proceeding of the Combustion Institute.- 2009.- Vol. 32.- P. 2835-2841.
6. Mehl, Margo. Experimental and kinetic modeling study of the effect of fuel composition in HCCI

engines / Margo Mehl, Tiziano Faravelli, Eliseo Ranzi, David Miller, Nicholas Cernansky // Proceeding of the Combustion Institute.- 2009.- Vol. 32.- P. 2843-2850.

7. Piperel, A. Impact of Ethylene and NO Addition on Fuel Oxidation Under Simulated HCCI conditions / A. Piperel, P. Dagant, and X. Montagne // Combustion Science and Technology.- 2010.- Vol. 182.- P. 422-435.

8. Басевич, В.Я. Моделирование задержек самовоспламенения метановоздушных смесей в двигателе внутреннего сгорания / В.Я. Басевич, В.И. Веденеев, В.С. Арутюнов // Физика горения и взрыва.- 1994.- Т. 30, № 21.- С. 7-14.

9. Чесноков, С.А. Химический турбулентный теплообмен в двигателях внутреннего сгорания / С.А. Чесноков, С.А. Потапов.- Тула: Изд-во Тульского гос. ун-та, 2009.- 300 с.

10. Звонов, В.А. Анализ механизмов образования оксидов азота при сгорании углеводородных топлив в камере сгорания ДВС / В.А. Звонов, М.П. Гиринович // Приводная техника.- 2004.- № 5.- С. 27-34.

11. Зельдович, Я.Б. Окисление азота при горении / Я.Б. Зельдович, П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий.- М.: Изд-во АН СССР, 1947.- 191 с.

12. Fenimore, S.P. Formation of nitric oxides from fuel nitrogen in ethylene flames / S.P. Fenimore // Combustion and Flame.- 1972.- Vol. 19.- No. 2.- P. 289-296.

13. Malte, J. Hydroxyl radical and atomic oxygen concentrations in high-intensity turbulent combustion / J. Malte, S.C. Schidt, D.T. Pratt // 16-th Symposium of Combustion.- Pittsburgh, Pennsylvania.- 1967.- P. 145-155.

14. Сеначин А.П., Сеначин П.К. Численное моделирование самовоспламенения смесей изоктана и н-гептана с воздухом перед фронтом пламени в поршневых двигателях с искровым зажиганием // Ползуновский вестник.- 2010.- № 1.- С. 3-12.

15. Варнац, Ю. Моделирование процессов горения с помощью детальной кинетики элементарных реакций / Ю. Варнац // Химическая физика.- 1994.- Т. 13.- № 2.- С. 3-16.

16. Сеначин, П.К. Самовоспламенение газа перед фронтом пламени в закрытом сосуде / П.К. Сеначин, В.С. Бабкин // Физика горения и взрыва.- 1982.-Т. 18.- № 1.- С. 3-8.

**Сеначин А.П.**, к.т.н., старший преподаватель каф. ТГВ, докторант каф. ДВС<sup>1</sup>,

e-mail: [andrey.senachin@myttk.ru](mailto:andrey.senachin@myttk.ru)

**Коржаевин А.А.**, д.т.н., доц., зав. лабораторией<sup>2</sup>, профессор каф. ДВС<sup>1</sup>, e-mail: [korzh@kinetics.nsc.ru](mailto:korzh@kinetics.nsc.ru)

<sup>1</sup>Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул

<sup>2</sup>Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск