

## 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 НСЦИ 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 НССИ 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)

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

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. Теребов // 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