

**Д.А. Богданец, В.И. Грищенко, К.Ф. Калмыкова, А.И. Рахманов, Д.С. Цымбалов**

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТОКСИЧНОСТИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ГОРЕЛКИ С КОМБИНИРОВАННЫМ  
ФОРМИРОВАНИЕМ ФАКЕЛА**

*Для расчета химического состава дымовых газов горелки на углеводородном топливе с комбинированным формированием факела предложен удобный и надежный алгоритм, основанный на методах математического программирования. Обеспечение устойчивости вычислительного процесса достигается использованием метода констант равновесия в целях снизить размерность системы определяющих уравнений при надлежащем выборе номенклатуры реагентов и базисных веществ. В модели рассматриваются двадцать два реагента, значительная доля которых токсичны, а базисными веществами выбраны  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$ . Вычисление констант равновесия осуществляется на основании оригинальной аппроксимации температурной зависимости теплоемкости всех компонентов. Предложенная аппроксимация, в отличие от стандартных полиномиальных, не только дает физически обоснованные пределы в области низких и высоких температур, но и содержит вдвое меньше подгоночных параметров. Отработана методика расчета этих параметров по известным табличным значениям. Предварительное тестирование модели выполнялось для отдельных химических блоков (номенклатурных подмножеств) путем сравнения результатов расчета с данными, получаемыми при помощи химического калькулятора JANAF. Расчеты токсичности дымовых газов опытного горелочного устройства с формированием факела посредством электрической дуги и подачи перегретого пара выполнены в диапазоне рабочих параметров, расширенном по сравнению с предполагаемым эксплуатационным. Результат обобщен методами математического программирования с учетом взвешенной токсичности дымовых газов. Выполнена оценка погрешности формульного представления токсичности. Предложен интерполяционный алгоритм, позволяющий уточнить взвешенную токсичность дымовых газов во всем диапазоне сценарного моделирования. Результаты компьютерного моделирования сопоставлялись с данными технических испытаний опытной горелки: установлено их согласие в пределах множителя 2, что соответствует методической и приборной погрешности измерений. Полученные в вычислительном эксперименте результаты позволяют оптимизировать конструкцию и рабочие параметры инновационных горелочных устройств с комбинированным механизмом формирования факела. Расчетами показано и экспериментально подтверждено, что подача перегретого пара в зону горения гомогенизирует факел, выравнивает скорость окисления водорода и углерода в составе нефтяного топлива, чем сокращает выбросы продуктов неполного сгорания и оксидов азота. Разработка предлагается для использования в проектировании, технических испытаниях и доводке перспективных горелочных устройств на нефтяном, спиртовом и биотопливе.*

*Жидкотопливное горелочное устройство; токсичность; комбинированная интенсификация; химические реакции; математическая модель.*

**D.A. Bogdanets, V.I. Grishchenko, K.F. Kalmykova, A.I. Rakhmanov, D.S. Tsymbalov**

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF TOXICITY OF FLUE GASES  
OF A BURNER WITH COMBINED FLAME FORMATION**

*A convenient and reliable algorithm based on mathematical programming methods is proposed for calculating the chemical composition of flue gases from a hydrocarbon-fueled burner with combined flame formation. The stability of the computational process is ensured by using the equilibrium constant method in order to reduce the dimensionality of the system of governing equations with an appropriate choice of the nomenclature of reagents and base substances. The model considers twenty-two reagents, a significant proportion of which are toxic, and  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  and  $\text{N}_2$  are selected as base substances. The equilibrium constants are calculated based on an original approximation of the temperature dependence of the heat capacity of all components. The proposed approximation, unlike standard polynomial ones, not only provides physically justified limits in the region of low and high temperatures, but also contains twice as few fitting parameters. A technique for calculating these parameters using known tabular values has been developed. Preliminary testing of the model was performed for individual chemical blocks (nomenclature subsets) by comparing the calculation results with the data obtained using the JANAF chemical calculator. Calculations of toxicity of flue gases of the experimental burner device with formation of a torch by means of an electric arc and supply of superheated steam are performed in the*

range of operating parameters extended in comparison with the expected operational one. The result is generalized by methods of mathematical programming taking into account the weighted toxicity of flue gases. An estimate of the error of the formula representation of toxicity is performed. An interpolation algorithm is proposed that allows specifying the weighted toxicity of flue gases in the entire range of scenario modeling. The results of computer modeling were compared with the data of technical tests of the experimental burner: their agreement was established within the multiplier of 2, which corresponds to the methodological and instrumental measurement error. The results obtained in the computational experiment allow optimizing the design and operating parameters of innovative burner devices with a combined mechanism of torch formation. Calculations have shown and experimentally confirmed that the supply of superheated steam to the combustion zone homogenizes the flame, equalizes the rate of oxidation of hydrogen and carbon in the oil fuel, thereby reducing emissions of incomplete combustion products and nitrogen oxides. The development is proposed for use in the design, technical testing and fine-tuning of promising burner devices on oil, alcohol and biofuel.

*Liquid fuel burner, toxicity, combined intensification, chemical reactions, mathematical model.*

**Введение.** Развитие теплоэнергетики опирается на непрерывное конструктивно-функциональное совершенствование горелочных устройств (ГУ) малой и средней мощности (1-10 МВт), использующих различные углеводородные ( $C_nH_m$ ), а также альтернативные (спиртовые и био-) топлива [1]. Отечественные потребители таких ГУ оказались в сложной ситуации по двум причинам: во-первых, экономические санкции существенно ограничили ввоз импортных горелок, а во-вторых, обострился спрос на применение в теплоэнергетике тяжелых углеводородов (мазатов и гудронов), доля которых в нефтяных запасах страны существенна. Таким образом, перед отечественными разработчиками ГУ остро стоит задача создания масштабируемой конструкции с высокими показателями экономичности и экологической чистоты [2].

Информационное моделирование высокотехнологичных изделий, в т.ч. энергетического назначения не только результативный, но часто единственный способ найти приемлемое решение. Компьютерные эксперименты с моделями позволяют снижать техногенные риски и экологические издержки, что позволяет отнести компьютерную имитацию взаимодействия технических систем с рабочими и окружающими средами к приоритетным методикам прикладных исследований [3]. Соответственно ужесточаются требования к предметным математическим моделям (ММ), касающиеся фундаментальности, детальности и эффективности. Их комплекс зафиксирован в государственных стандартах на цифровые двойники (ЦД) изделий и процессов. Поэтому цель данного исследования – адекватное описание токсичности дымовых газов (ДГ) при различных режимах работы ГУ с комбинированной интенсификацией сжигания жидких углеводородов, спиртов и биотоплива представляется актуальной для теплоэнергетики. Схема ГУ и особенности рабочего процесса, выбранные для отработки ММ показаны на рис. 1.

Важно подчеркнуть, что практические расчеты химического состава ДГ представляют собой сложную научную задачу. Проблемность обусловлена следующими обстоятельствами: горючая смесь и продукты сгорания многокомпонентны и многофазны, окисление топлива и образование промежуточных и побочных токсичных компонентов – нелинейный и пространственно распределенный процесс, знания термохимических и особенно кинетических параметров системы ограничены, краевые условия определены приближенно, а некоторые сопутствующие факторы невозможно учесть. Даже в предположении совершенного сжигания, т.е. образования ДГ с равновесным составом, не удается исключить все сопутствующие проблемы [4]. Главными трудностями выступают: 1) необходимость обеспечить достоверность и согласованность исходных термохимических данных; 2) обеспечение достаточной универсальности реализующих алгоритмов, по крайней мере, в рамках практически интересной номенклатуры веществ и диапазона рабочих параметров; 3) количественная оценка надежности результата, в т.ч. его непрерывная зависимость от номенклатурно-числовых параметров ММ и исходных данных.

Для расчета равновесного состава используются два формально равноценных метода. Отечественные исследователи предпочитают непосредственно минимизировать термохимический потенциал (ТХП) Гиббса – Гельмгольца [5–7], а для западных физико-

химических школ традиционен метод констант равновесия, интегрирующий уравнения виртуальных реакций, материального баланса и состояния вещества [8–10]. Главным недостатком прямой минимизации ТХП является высокая размерность и одновременно плохая обусловленность матриц, возникающих в процессе линеаризации уравнений экстремума. Например, для химической модели, включающей  $N$  химических элементов и  $M$  веществ, система уравнений равновесия в алгоритме прямой минимизации ТХП имеет размерность  $N + M$ . Ее численное решение требует значительно усложнять алгоритм, насыщая его тонкостями матричной алгебры [11–13]. Метод констант равновесия реализовать проще, поскольку размерность системы в этом случае совпадает с числом элементов  $N$ . Опыт авторов по применению стандартных пакетов вычислительной математики [14, 15] в расчетах состава продуктов сгорания реактивных и моторных топлив показывает, что итерационный вычислительный процесс непосредственной минимизации ТХП становится неустойчивым, когда число учитываемых веществ превышает 10-13. Поэтому в данной работе для расчета состава ДГ отработываемого ГУ предлагается использовать метод констант равновесия и пакеты [14, 15].

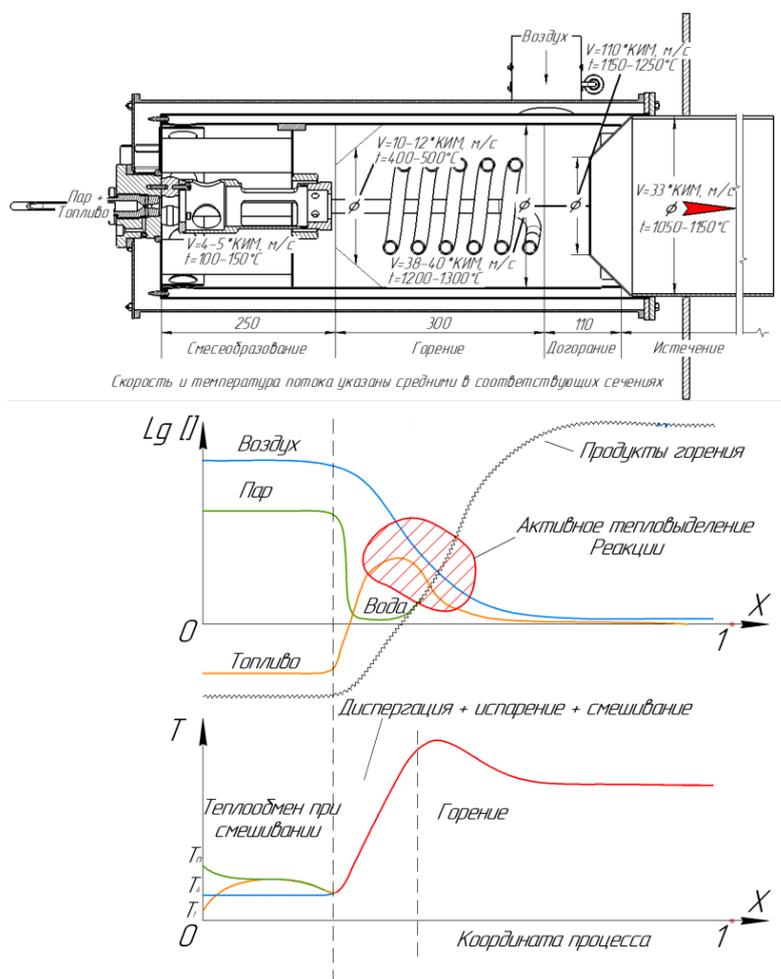


Рис. 1. Конструкция и схема рабочего процесса ГУ

**Структура математической модели и исходные данные.** Ключевую роль в подобных расчетах играет выбор номенклатуры учитываемых веществ и т.н. химического базиса – минимального набора линейно независимых компонентов из множества рас-

смаатриваемых. Определение номенклатуры компонентов опирается на известные экспериментальные и расчетные данные, теоретические и экспертные оценки. В частности, горение моторных и ракетных топлив удовлетворительно описывается схемой превращений [16]. Отметим, что процессы в ГУ практически необратимы. Это означает, что при качественной организации рабочего процесса ДГ не содержат высокомолекулярных углеводородов.

Опыт решения задач горения и предварительные оценки показывают, что ограничившись реакциями в горячей области факела, целесообразно ограничиться следующими веществами из схемы реагирования [16]: 1) углеводородами С, СН, СН<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>; 2) атомной Н и молекулярной Н<sub>2</sub> формами водорода; 3) кислородными О<sub>2</sub> и О веществами; 4) основными оксидами водорода ОН, НО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О, Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>; 5) оксидами углерода СО, СО<sub>2</sub>; 6) азотом с оксидами N<sub>2</sub>, N, NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, а также 7) особо токсичными соединениями С<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, HCN и 7) С<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, служащим источником сажи и онкогенного бенз(а)пирена. Предлагаемая модель объединяет двадцать два С-Н-Н-О-содержащих вещества; химическим базисом согласно [10] служат СО, Н<sub>2</sub>, О<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>.

Основу ММ составляют закон сохранения вещества для трех элементов и закон Дальтона для газовых смесей:

$$\sum_{m=1}^M \left(\frac{P_H}{P}\right)_m = \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_H}{P}\right)_m^{\text{init}}, \quad \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_N}{P}\right)_m = \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_N}{P}\right)_m^{\text{init}},$$

$$\sum_{m=1}^M \left(\frac{P_O}{P}\right)_m = \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_O}{P}\right)_m^{\text{init}}, \quad \sum_{m=1}^M P_m = P, \quad (1)$$

где  $\left(\frac{P_i}{P}\right)_m$  – доля атомов  $i$ -го сорта ( $i = \text{H, N, O}$ ) в  $m$ -м веществе;  $P_m$  – парциальное давление  $m$ -го вещества;  $P$  – общее давление; индекс init соответствует начальным условиям.

Парциальное давление небазисных 18-ти веществ рассчитывается на основе констант равновесия виртуальных химических реакций [8, 10]:

$$K_{\text{равн}} = \exp(-\Delta G/RT), \quad (2)$$

где  $\Delta G = G_P - G_R$  – изменение термодинамического потенциала; индексы P и R обозначают продукты и исходные вещества;  $T$  – температура;  $R$  – газовая постоянная.

ТХП вещества  $G_m$  представляет собой комбинацию энтальпийного  $H_m$  и энтропийного  $S_m$  слагаемых:

$$G_m = H_m - T \cdot S_m. \quad (3)$$

Также при расчете химического равновесия крайне важна температурная зависимость  $G_m(T)$ . Она обусловлена существенным влиянием температуры на теплоемкость газов  $C_{Pm}(T)$  и соответствующими термодинамическими соотношениями:

$$H_m(T) = H_m(298.15) + \int_{298.15}^T C_{Pm}(T) dT, \quad (4)$$

и

$$S_m(T) = S_m(298) + \int_{298.15}^T C_{Pm}(T) / T dT. \quad (5)$$

Традиционно функцию  $C_{Pm}(T)$  приближают многочленами [17], однако такой подход не только не убедителен с физической точки зрения, но и не рационален в части объема вычислений. Фактически теплоемкость веществ в газовой фазе напрямую связана с числом активных степеней свободы (поступательных, вращательных и колебательных). Если поступательные и вращательные степени свободы (их в совокупности три для одноатомных газов, пять для двухатомных и многоатомных линейных молекул и шесть для трех- и многоатомных газов) всегда накапливают тепловую энергию, то колебательные степени свободы (число таковых растет со сложностью молекулы) задействуются лишь при высокой температуре. Поэтому здесь предлагается аппроксимация  $C_{Pm}(T)$  вида:

$$C_P(A, B, C, C_0, T) = C_0 + A \cdot \left[ 1 - e^{-\left(\frac{T}{B}\right)^C} \right], \quad (6)$$

$$H(A, B, C, C_0, T) = H_0 + \int_{298.15}^T C_p(A, B, C, C_0, T) dT, \quad (7)$$

$$S(A, B, C, C_0, T) = S_0 + \int_{298.15}^T \frac{C_p(A, B, C, C_0, T)}{T} dT. \quad (8)$$

В этих формулах  $C_0$ ,  $H_0$  и  $S_0$  – соответственно теплоемкость, энтальпия и энтропия компонента при стандартной температуре 298,15 К;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – подгоночные коэффициенты. Таким образом, модель (6)-(8) не только верна в предельных случаях  $T \rightarrow 0$  и  $T \rightarrow \infty$ , но также содержит всего три, а не семь как полиномиальная модель [17], эмпирических коэффициентов. Для их нахождения достаточен минимальный объем табличных данных.

Коэффициент  $A$  отвечает приращению теплоемкости в интервале температур от нуля до бесконечности, т.е.:

$$A = \lim_{T \rightarrow \infty} C_p(A, B, C, C_0, T) - \lim_{T \rightarrow 0} C_p(A, B, C, C_0, T), \quad (9)$$

Величина  $B$  соответствует температуре возбуждения внутренних (колебательных) степеней свободы, а значение  $C$  отвечает ширине температурного диапазона, в котором теплоемкость  $C_p$  изменяется существенно.

Чтобы вычислить  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – параметры модели (6)-(8), необходимо решить следующую задачу математического программирования:

$$\begin{cases} \sum_i [C_p(A, B, C, C_0, T) - \{C_0 + A \cdot [1 - e^{-(\frac{T}{B})^C}]\}]^2 \rightarrow \min \\ \sum_i [S(A, B, C, C_0, T) - \{S_0 + \int_{298.15}^T \frac{C_p(A, B, C, C_0, T)}{T} dT\}]^2 \rightarrow \min \end{cases}, \quad (10)$$

где  $i$  – число табулированных значений термодинамических функций в таблицах JANAF [18], использованных для получения приближенных выражений (6)-(8).

Результаты решения (10) для учтенных в модели веществ приведены в табл. 1. Поскольку одноатомные газы не имеют колебательных степеней свободы, их теплоемкость при рабочей температуре ГУ будем считать постоянной, т.е.  $A = 0$ . Также величина  $C_0 = \lim_{T \rightarrow 0} C_p(A, B, C, C_0, T)$  выбрана совпадающей с теоретическим значением согласно молекулярной теории газов ( $5/2 R$  – для одноатомных,  $7/2 R$  – для линейных многоатомных и  $4 R$  – для нелинейных многоатомных молекул).

Таблица 1

Расчетные значения эмпирических коэффициентов модели (6)-(8)

Вещество	Коэффициент		
	$A$	$B$	$C$
CO	0,942	1217	2,21
O <sub>2</sub>	1,313	1342	1,47
H <sub>2</sub>	1,022	2037	2,643
N <sub>2</sub>	0,938	1320	2,123
CO <sub>2</sub>	3,401	811,953	1,503
O	0	10000	2
H	0	10000	2
N	0	10000	2
NO	0,987	1097	1,857
N <sub>2</sub> O	3,312	731,007	1,439
NO <sub>2</sub>	2,846	742,784	1,634
OH	0,998	1899	2,124
HO <sub>2</sub>	2,696	1011	1,587

Окончание табл. 1

H <sub>2</sub> O	2,743	1575	1,971
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4,326	631,075	1,38
CH	1,46	1546	2,666
CH <sub>2</sub>	3,186	1190	2,174
CH <sub>4</sub>	8,005	1123	1,838
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	6,633	983,73	1,108
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	10,951	956,5	1,526
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	6,387	546,09	0,862
HCN	3,341	1052	1,437

Вычислив в квадратурах интегралы в уравнениях (7)–(8) реализуем более продуктивное вычисление констант равновесия:

$$H(A, B, C, H_0, C_0, T) = H_0 + (C_0 + A)(T - 298,15) + \frac{AB}{C} \left[ \Gamma\left(\frac{1}{C}, \left(\frac{T}{B}\right)^C\right) - \Gamma\left(\frac{1}{C}, \left(\frac{298,15}{B}\right)^C\right) \right], \quad (11)$$

Подобного рода действия в случае с энтропией выполнить не получится, по причине невозможности выразить интеграл через доступные специальные функции. В предшествующем случае сведение к неполной Гамма-функции осуществлялось интегрированием выражения типа  $\int e^{-t^n} dt$ , а образование в знаменателе дополнительной переменной  $t$  приводит к невозможности получить результат. Из-за своеобразности подынтегрального выражения применение для интегрирования разложения в ряд Тейлора не допускается. В связи с этим выполним следующие действия: подынтегральное выражение  $e^{-t^n}$  представим как  $e^{-(t^n + \ln(t))}$ . Поскольку в нашем случае  $t = \frac{T}{B}$  заключено в пределах  $\frac{1}{3} \dots 3$ , а величина  $n$  от 1 до 2.5, заменим подынтегральное выражение  $e^{-t^n} \cdot \frac{1}{t}$  на приближенное  $(\alpha + \beta t)e^{-\gamma t}$ , которое легко интегрируется по частям. В результате получаем приближенное к уравнению (8) значение:

$$S(A, B, C, S_0, C_0, T) \approx S_0 + (C_0 + A) \ln\left(\frac{T}{298,15}\right) - AB \int_{\frac{298,15}{B}}^{\frac{T}{B}} (\alpha + \beta t)e^{-\gamma t} dt = \\ = S_0 + (C_0 + A) \ln\left(\frac{T}{298,15}\right) + \frac{A}{\gamma^2} \left[ (\alpha\gamma B + \beta\gamma T + \beta B)e^{-\frac{\gamma T}{B}} - (\alpha\gamma B + 298,15\beta\gamma + \beta B)e^{-\frac{298,15\gamma}{B}} \right]. \quad (12)$$

Сравнивая друг результаты расчетов по формуле (12) и данные полученные при численном интегрировании исходной зависимости (8) определяется погрешность данного приближения. Выявлено, что в диапазоне актуальных значений  $n$  погрешность (12) не выходит за пределы 25%.

Путем решения системы нелинейных уравнений рассчитываются значения подгонных параметров  $\alpha - \gamma$ :

$$\begin{cases} \left(\alpha + \frac{1}{3}\beta\right)e^{-\frac{\gamma}{3}} = 3e^{-\left(\frac{1}{3}\right)^n} \\ (\alpha + \beta)e^{-\gamma} = e^{-1} \\ \left(\alpha + 3\beta\right)e^{-3\gamma} = \frac{1}{3}e^{-(3)^n} \end{cases} \quad (13)$$

Решение в явном виде, выполненное в пакете Maple, в силу своей громоздкости в тексте статьи не приводится. Сюда выведена только оценка погрешности аппроксимации и приближенного интегрирования (12) на рис. 2, а также числовые значения параметров  $\alpha - \gamma$  в зависимости от  $n$  с оценкой надежности соответствующего результата на рис. 3.

```

> sys:={ (alpha+beta/3)*exp(-g/3)=exp(-(1/3)^n)*3, (alpha+beta)*exp(-g)=exp(-1)*1, (alpha+beta/3)*exp(-g/3)=exp(-(3)^n)/3}; n:=2:
> fsolve(sys, {alpha, beta, g});
> alpha:=7.070740987: beta:=-2.327522967: g:=2.556715812:
> plot([exp(-t^2)/t, (alpha+beta*t)*exp(-g*t), (exp(-t^2)/t-(alpha+beta*t)*exp(-g*t))*10], t
      =0..3, thickness=[15, 5, 5], color=[yellow, blue, green]);
    
```

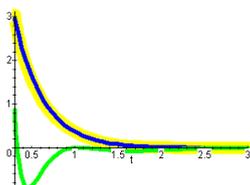


Рис. 2. Алгоритм расчета коэффициентов  $\alpha$  –  $\gamma$  и их погрешность: желтая линия – исходная функция; синяя – аппроксимация; зеленая – увеличенная в 10 раз погрешность

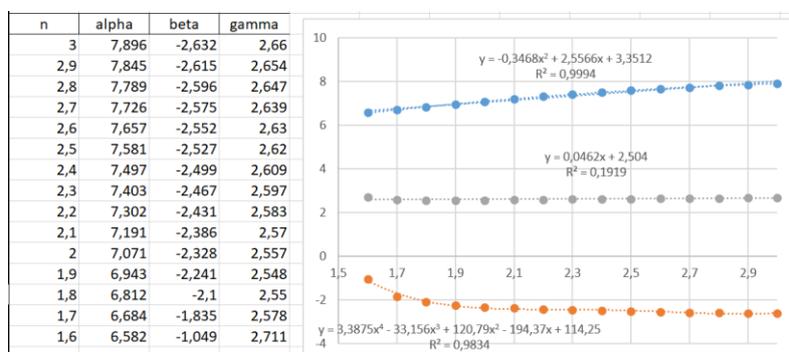


Рис. 3. Коэффициенты аппроксимации (12)

**Тестирование модели, условия и результаты компьютерного эксперимента.** В компьютерном эксперименте состав пламени и ДГ описывался совокупностью веществ  $\text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_2 - \text{C}_2\text{H}_4 - \text{H} - \text{H}_2 - \text{O} - \text{O}_2 - \text{CO} - \text{CO}_2 - \text{OH} - \text{HO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{N} - \text{N}_2 - \text{NO} - \text{N}_2\text{O} - \text{NO}_2 - \text{C}_2\text{N}_2 - \text{HCN}$  в диапазоне температур 900 – 1500 К при давлении 1 бар; коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  варьировался в интервале 0.7–1.3, а соотношение массовой подачи пара и топлива  $\beta$  – в пределах 0–0.3. Предварительно выполнялась проверка ММ и исходных данных путем сопоставления результатов компьютерной имитации отдельных химических подсистем в контрольных точках (температура, давление, элементный состав реагентов) с online-версией программного комплекса JANAF [19, 20]. Результаты верификации свидетельствуют, что содержание основных компонентов системы (веществ, мольная доля которых  $10^{-6}$  и более) удастся рассчитать с приемлемой погрешностью. В то же время малые составляющие системы оказываются значительно зашумленными. Компьютерный эксперимент по переносу алгоритма в пакет Maple [14] с целью существенно удлинить мантиссу рабочих чисел показал, что обусловленная конечностью мантиссы неустойчивость гасится уже в режиме двойной точности (пятнадцать значащих цифр), после чего сходимость процесса удастся обеспечить исключительно качеством начального приближения.

Опыт сценарной имитации различных режимов ГУ систематизировался в контексте результирующей токсичности, т.е. взвешенного учета сравнительной угарного газа, окислов азота и углеводов:

$$R_T = [\text{CO}] + 500 \cdot [\text{NO}_x] + 50 \cdot [\text{C}_n\text{H}_m], \quad (14)$$

где  $500 = \left(\frac{\text{ПДК}_{\text{CO}}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_x}}\right)$  и  $50 = \left(\frac{\text{ПДК}_{\text{CO}}}{\text{ПДК}_{\text{C}_n\text{H}_m}}\right)$  – веса, отвечающие степени токсичности  $\text{NO}_x$  и  $\text{C}_n\text{H}_m$  по отношению к CO. Результаты такого расчета для  $\beta = 0$  приведены на рис. 4.

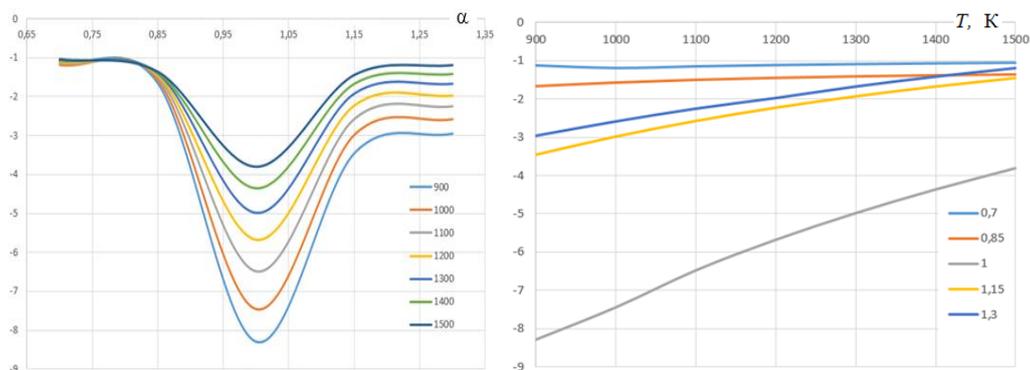


Рис. 4. Зависимость токсичности ДГ от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  (слева) и температуры  $T$  (справа) при  $\beta = 0$ : на оси ординат приведен  $\lg R_T$  согласно (14)

Поскольку каждое сочетание параметров  $T$  и  $\alpha$  требует трудоёмкого расчета, целесообразно результаты рис. 4 представить в виде аппроксимирующей формулы:

$$R_T(\alpha, T) = -\frac{1.26 \cdot 10^8}{T^{2.44} \cosh(21.5 \cdot \alpha - 21.3)} - 1.08 - \left(\frac{1.34 \cdot 10^7}{T^{2.44}}\right) \cdot \text{th}(21.5 \cdot \alpha - 21.3). \quad (15)$$

Структура (15) выбрана согласно форме сечений  $R_T(\alpha, T)$ , отображенных на рис. 2, а значения подгоночных коэффициентов рассчитаны путем решения оптимизационной задачи.

Погрешность аппроксимации (15) оценивалась по трем показателям: корреляции рассчитываемых данных с исходными, по среднеквадратичной и максимальной относительной погрешности. Корреляция модели (15) и исходных данных составляет 0,99, среднеквадратичная относительная погрешность 6 %, а максимальная относительная погрешность – 24 %. Распределение погрешности по полигону экспериментального изучения процесса показано на рис. 5. При переходе к естественным (не логарифмическим) переменным это означает, что средняя погрешность аппроксимации составляет 17%, а максимальная – 70 %. Поэтому для обобщения на три переменные  $R_T(\alpha, \beta, T)$  и параметрической оптимизации рабочего процесса ГУ аппроксимация (15) не представляется достаточно надежной.

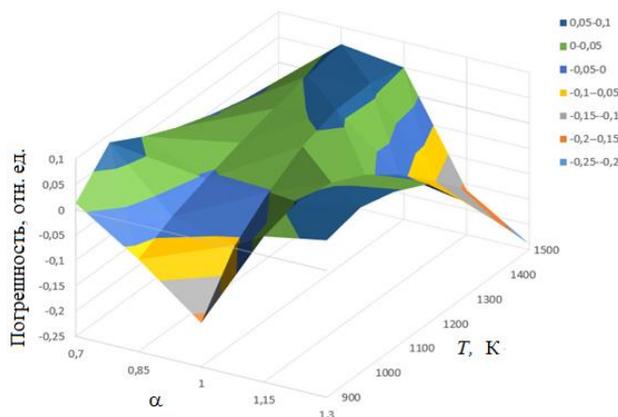


Рис. 5. Погрешность модели (15) применительно к данным расчета рис. 3 ( $\beta = 0$ )

Перспективным способом снижения токсичности ДГ разрабатываемого в ДГТУ ГУ представляется добавление к топливно-воздушной смеси перегретого пара в количестве от 0 до 30 % (по массе) относительно количества подаваемого топлива. Указанный диапазон ограничен экономическими и технологическими соображениями. В то же время не известно,

какое количество пара обеспечит максимальную экологическую чистоту устройства. Авторы выполнили сценарные расчеты с имитацией подачи пара в количестве  $\beta = 0, 10, 20$  и  $30$  массовых процентов. Полученные в результате зависимости  $R_T(\alpha, \beta, T)$  табулированы и позволяют определять токсичность ДГ при произвольном сочетании  $\alpha, \beta$  и  $T$ .

Техника интерполяции расчетных данных. Представим рассчитанные нами таблицы токсичности ДГ как трехмерное дискретное множество аргумента  $T \otimes \alpha \otimes \beta$ , где  $T = \{T_i\}$ ,  $i = 1, \dots, I$ ,  $I = 7$ ,  $\alpha = \{\alpha_j\}$ ,  $j = 1, \dots, J$ ,  $J = 5$ ,  $\beta = \{\beta_k\}$ ,  $k = 1, \dots, K$ ,  $K = 4$ , которому соответствует дискретное множество коэффициента токсичности ДГ  $\{\varepsilon_{ijk}\}$ :  $\varepsilon_{ijk} = \varepsilon(T_i, \alpha_j, \beta_k)$ . Таким образом, расчетная область разбивается на параллелепипеды с главной диагональю  $T_i \rightarrow T_{i+1}$ ,  $\alpha_j \rightarrow \alpha_{j+1}$ ,  $\beta_k \rightarrow \beta_{k+1}$ .

Если считать функцию  $\varepsilon_{ijk}$  непрерывной и дифференцируемой по всем аргументам (это подтверждено вычислениями), то для набора параметров  $(T, \alpha, \beta)^T$ , попадающих в ячейку трехмерной таблицы с номером  $(i, j, k)^T$  справедливо соотношение:

$$\begin{aligned} \varepsilon((T, \alpha, \beta)^T) &= \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^T) + \frac{\varepsilon((T_{i+1}, \alpha_j, \beta_k)^T) - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^T)}{T_{i+1} - T_i} \cdot (T - T_i) + \\ &+ \frac{\varepsilon((T_i, \alpha_{j+1}, \beta_k)^T) - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^T)}{\alpha_{j+1} - \alpha_j} \cdot (\alpha - \alpha_j) + \frac{\varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_{k+1})^T) - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^T)}{\beta_{k+1} - \beta_k} \cdot (\beta - \beta_k). \end{aligned} \quad (16)$$

Формулу (13) можно рассматривать как интерполяционный многочлен или же разложение функции  $\varepsilon_{ijk}((T, \alpha, \beta)^T)$  в ряд Тейлора. Ее применение к расчетным таблицам токсичности дает таблицы с частными производными  $\varepsilon_T((T_i, \alpha_j, \beta_k)^T) = \frac{\varepsilon((T_{i+1}, \alpha_j, \beta_k)^T) - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^T)}{T_{i+1} - T_i}$ ,  $\varepsilon_\alpha((T_i, \alpha_j, \beta_k)^T) = \frac{\varepsilon((T_i, \alpha_{j+1}, \beta_k)^T) - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^T)}{\alpha_{j+1} - \alpha_j}$ ,  $\varepsilon_\beta((T_i, \alpha_j, \beta_k)^T) = \frac{\varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_{k+1})^T) - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^T)}{\beta_{k+1} - \beta_k}$ , что упрощает вычисления: алгоритм расчета интегральной токсичности ДГ сводится к поиску ячейки с номером  $(i, j, k)^T$ , соответствующей набору  $(T, \alpha, \beta)^T$  и последующему применению формулы (16).

**Сопоставление результатов расчета с данными экспериментальных измерений.** Поскольку состав ДГ, управление рабочим процессом, стабилизация критичных параметров существенно зависят от установки назначения, исследование этих факторов требует проведения соответствующих испытаний. Однако данная программно-алгоритмическая разработка успешно использовалась при отработке опытных образцов ГУ. Поскольку доступные авторам газоанализаторы (АНКАТ-7664М и ПГА-М-31) позволяют определять состав газа, охлажденного до  $60^\circ\text{C}$  и более, экспресс-анализу подвергались ДГ, смешавшиеся с окружающим воздухом до приемлемого охлаждения. Если считать, что ДГ покидают ГУ с температурой  $1100-1200^\circ\text{C}$ , коэффициенты микропереноса массы, импульса и энергии совпадают, а токсичные компоненты  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{C}_n\text{H}_m$  не подверженными быстрой трансформации в атмосфере. В рамках принятых допущений при смешении ДГ с воздухом степень их охлаждения и разбавления (показаны на рис. 6) совпадают.

Практически выбирались три точки, удаленные от центра струи на срезе ГУ на  $\sim 2$  м по горизонтали и на  $\sim 3$  м по вертикали. Положение каждой выбиралось по показаниям помещенной в нее термодомы (температура  $60^\circ\text{C}$ ). При температуре воздуха  $24^\circ\text{C}$  и средней температуре ДГ на выходе ГУ  $1000^\circ\text{C}$  это соответствует степени разбавления в  $\sim 60$  раз. Таким образом, для оценки реального содержания вредных примесей в составе ДГ усредненное по трем точкам забора значение следует умножить на 60. Результаты приборного контроля состава ДГ приведены в табл. 2.

Как свидетельствуют результаты этих испытаний, увеличение подачи пара до 50% от подачи топлива несколько снижает токсичность и сажность дымовых газов. Однако ее разумное увеличение все же не позволяет сильно сократить подачу воздуха ниже уровня, диктуемого стехиометрией горения ДГ. При этом важно, что расчетная согласно предложенным моделям токсичность ДГ совпадает с измеренной в пределах множителя  $\sim 2$ . Расхождение объясняется как использованными допущениями, так и ограниченными возможностями технического эксперимента.

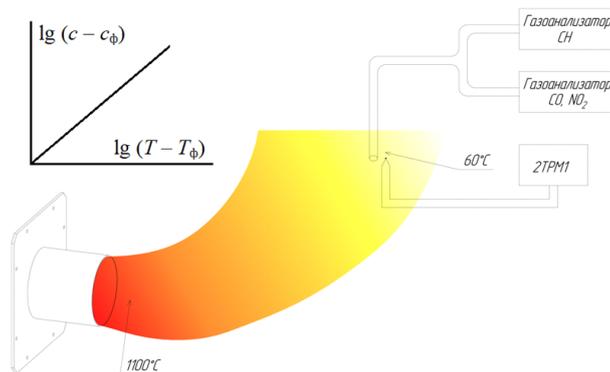


Рис. 6. Теоретическое обоснование (слева) и схема забора ДГ, разбавленных воздухом до  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 2

**Результаты анализа ДГ и сажности при испытаниях опытного образца ГУ.  
Расход топлива – 11-18 кг/час, расход пара 1-9 кг/час**

Параметр	[CO], %	[NO <sub>x</sub> ] = [NO <sub>2</sub> ], мг/м <sup>3</sup>	[C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> ] = [CH <sub>4</sub> ] + [C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ], %	Дымность (сажность)	
Способ измерения	Анализатор ДГ АНКАТ-7664М	Анализатор ДГ АНКАТ-7664М	Анализатор ДГ ПГА-М-31	Визуальный контроль прозрачности	
Расход топлива, кг/час	Согласно ГОСТ 27824-2000 < 0,05 %	Согласно ГОСТ 27824-2000 < 290 мг/м <sup>3</sup>	Не нормируется ГОСТ 27824-2000	Согласно ГОСТ 27824-2000 Сажное число < 2 по шкале Бахараха	
Расход пара, кг/час					
11	1	не обнаружен	180	не обнаружен	не фиксируется
11	3	не обнаружен	120	не обнаружен	не фиксируется
11	5	не обнаружен	90	не обнаружен	не фиксируется
18	2	0,12	не измерялись	0,3	заметна
18	6	0,12	не измерялись	0,2	заметна
18	9	0,09	не измерялись	0,15	незначительна

**Заключение.** Сконструирована математическая модель токсичности ДГ жидкотопливного ГУ с комбинированной интенсификацией рабочего процесса. Рассчитаны коэффициенты, позволяющие оценивать токсичность ДГ во всем диапазоне эксплуатационных параметров. Проведены сценарные вычислительные эксперименты, их результаты согласуются с данными экспериментальных измерений. Термохимические расчеты и испытания опытного образца ГУ показали, что добавление водяного пара и реактивной плазмы в топливно-воздушную смесь в целом интенсифицирует и одновременно гомогенизирует горение. Как следствие доля несгоревшего топлива (углеводороды) и продуктов неполного сгорания (угарный газ) снижается. Также пар и плазма флегматизируют образование сажи.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Ануфриев И.С. Экспериментальное исследование процессов при сжигании жидких углеводородов в горелочных устройствах с подачей перегретого водяного пара: дисс. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2019. – 254 с.
2. ГОСТ 27824-2000. Горелки промышленные на жидком топливе. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.

3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. – М.: Изд-во стандартов, 2021. – 11 с.
4. Физико-химическое моделирование на ЭВМ. – [https://studopedia.ru/5\\_119991\\_fiziko-himicheskoe-modelirovanie-na-evm.html](https://studopedia.ru/5_119991_fiziko-himicheskoe-modelirovanie-na-evm.html).
5. Алемасов В.Е., Тишин А.П., Дрегалин А.Ф. Общий математический метод расчета и исследования горения при высокой температуре // Физика горения и взрыва. – 1971. – Т. 7, № 1. – С. 77-84.
6. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
7. Belov G. On linear programming approach for the calculation of chemical equilibrium in complex thermodynamic systems // J. Math. Chem. – 2010. – Vol. 47, № 1. – Art. 446. – <https://doi.org/10.1007/s10910-009-9580-y>.
8. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 739 с.
9. Степанов Н.Ф., Ерлыкина М.Е., Филиппов Г.Г. Методы линейной алгебры в физической химии. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 360 с.
10. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение: Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ: пер. с англ. – М.: Физматлит, 2003. – 352 с.
11. Потанов А.В. Химическое равновесие многотемпературных систем // Теплофизика высоких температур. – 1966. – Т. 4, № 1. – С. 55-58.
12. Петрусёв А.С. Переобуславливание химических источников в уравнениях типа диффузия – конвекция – химическая кинетика // Математическое моделирование. – 2019. – Т. 31, № 5. – С. 56-68.
13. Сон К.Э. редуцирование полной системы уравнений химической кинетики для течений многокомпонентных высокотемпературных газов на основе метода частичного локального равновесия // Теплофизика высоких температур. – 2020. – Т. 58, № 1. – С. 81-90.
14. Говорухин В.Н., Цибулин В.Г. Компьютер в математическом исследовании: Maple, MATLAB, LaTeX: учебный курс. – СПб: "Питер", 2001. – 642 с.
15. Дьяконов В.П. Mathcad 8-12 для студентов. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 588 с.
16. Азимова Н.Н., Бараниченко В.В., Ладоса Е.Н. и др. Алгоритм выявления химизма и ведущие химические реакции в горелках, использующих углеводородные и спиртовые топлива // Навигатор в мире науки и образования. – 2023. – № 01 (58)!. Свид-во о рег-ции ОФЭРНИО 25103 от 28.02.2023 г.
17. Mascitti V.R. A simplified equilibrium hydrocarbon-air combustion gas model for use in air-breathing engine cycle computer programs / NASA TN D-4747. – 1968. – 47 p.
18. Stull D., Prophet H. JANAF Thermochemical Tables, second edition. – National Institute of Standards and Technology, 1971. – 1139 p.
19. Gordon S., McBride B.J. Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications: I. Analysis / NASA Reference Publication 1311. – 1994.
20. McBride B.J., Gordon S. Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications: II. Users Manual and Program Description / NASA Reference Publication 1311. – 1996.

#### REFERENCES

1. Anufriev I.S. Eksperimental'noe issledovanie protsessov pri szhiganii zhidkikh uglevodorodov v gorelochnykh ustroystvakh s podachej peregretoго vodyanogo para: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Experimental study of processes during combustion of liquid hydrocarbons in burner devices with the supply of superheated water vapor: dr. of eng. sc. diss.]. Novosibirsk, 2019, 254 p.
2. GOST 27824-2000. Gorelki promyshlennye na zhidkom toplive. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [GOST 27824-2000. Industrial burners on liquid fuel. General technical requirements]. Moscow: Izd-vo standartov, 2002, 12 p.
3. GOST R 57700.37-2021. Komp'yuternye modeli i modelirovanie. TSifrovye dvoyniki izdeliy [GOST R 57700.37-2021. Computer models and modeling. Digital twins of products]. Moscow: Izd-vo standartov, 2021, 11 p.
4. Fiziko-khimicheskoe modelirovanie na EVM [Physicochemical modeling on a computer]. Available at: [https://studopedia.ru/5\\_119991\\_fiziko-himicheskoe-modelirovanie-na-evm.html](https://studopedia.ru/5_119991_fiziko-himicheskoe-modelirovanie-na-evm.html).
5. Alemasov V.E., Tishin A.P., Dregalin A.F. Obshchiy matematicheskiy metod rascheta i issledovaniya goreniiya pri vysokoy temperature [General mathematical method for calculating and studying combustion at high temperatures], *Fizika goreniiya i vzryva* [Physics of Combustion and Explosion], 1971, Vol. 7, No. 1, pp. 77-84.
6. Belov G.V., Trusov B.G. Termodinamicheskoe modelirovanie khimicheskii reagiruyushchikh system [Thermodynamic modeling of chemically reacting systems]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2013.

7. *Belov G.* On linear programming approach for the calculation of chemical equilibrium in complex thermodynamic systems, *J. Math. Chem.*, 2010, Vol. 47, No. 1, Art. 446. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10910-009-9580-y>.
8. *Shchetnikov E.S.* Fizika goreniiya gazov [Physics of gas combustion]. Moscow: Nauka, 1965, 739 p.
9. *Stepanov N.F., Erlykina M.E., Filippov G.G.* Metody lineynoy algebry v fizicheskoy khimii [Methods of linear algebra in physical chemistry]. Moscow: Izd-vo MGU, 1976, 360 p.
10. *Varnatts Yu., Maas U., Dibbl R.* Gorenii: Fizicheskie i khimicheskie aspekty, modelirovanie, eksperimenty, obrazovanie zagryaznyayushchikh veshchestv [Combustion: physical and chemical aspects, modeling, experiments, formation of pollutants]: transl. from engl. Moscow: Fizmatlit, 2003, 352 p.
11. *Potapov A.V.* Khimicheskoe ravnovesie mnogotemperaturnykh sistem [Chemical equilibrium of multitemperature systems], *Teplofizika vysokikh temperature* [High Temperature Thermophysics], 1966, Vol. 4, No. 1, pp. 55-58.
12. *Petrusev A.S.* Pereobuslavlivanie khimicheskikh istochnikov v uravneniyakh tipa diffuziya – konvektsiya – khimicheskaya kinetika [Preconditioning of chemical sources in diffusion-convection-chemical kinetics equations], *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modeling], 2019, Vol. 31, No. 5, pp. 56-68.
13. *Son K.E.* redutsirovanie polnoy sistemy uravneniy khimicheskoy kinetiki dlya techeniy mnogokomponentnykh vysokotemperaturnykh gazov na osnove metoda chastichnogo lokal'nogo ravnovesiya [Reduction of the complete system of chemical kinetics equations for multicomponent high-temperature gas flows based on the partial local equilibrium method], *Teplofizika vysokikh temperature* [High Temperature Thermal Physics], 2020, Vol. 58, No. 1, pp. 81-90.
14. *Govorukhin V.N., Tsibulin V.G.* Komp'yuter v matematicheskom issledovanii: Maple, MATLAB, LaTeX: uchebnyy kurs [Computer in mathematical research: Maple, MATLAB, LaTeX: training course]. Saint Petersburg: "Piter", 2001, 642 p.
15. *D'yakonov V.P.* Mathcad 8-12 dlya studentov [Mathcad 8-12 for students]. Moscow: Solon-Press, 2005, 588 p.
16. *Azimova N.N., Baranichenko V.V., Ladoshina E.N. i dr.* Algoritm vyyavleniya khimizma i vedushchie khimicheskie reaktsii v gorel'kakh, ispol'zuyushchikh uglevodorodnye i spirtovye topliva [Algorithm for identifying chemistry and leading chemical reactions in burners using hydrocarbon and alcohol fuels], *Navigator v mire nauki i obrazovaniya* [Navigator in the world of science and education], 2023, No. 01 (58)'. Certificate of registration OFERNiO 25103 dated 02/28/2023.
17. *Mascitti V.R.* A simplified equilibrium hydrocarbon-air combustion gas model for use in air-breathing engine cycle computer programs, NASA TN D-4747, 1968, 47 p.
18. *Stull D., Prophet H.* JANAF Thermochemical Tables, second edition. National Institute of Standards and Technology, 1971, 1139 p.
19. *Gordon S., McBride B.J.* Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications: I. Analysis, NASA Reference Publication 1311, 1994.
20. *McBride B.J., Gordon S.* Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications: II. Users Manual and Program Description, NASA Reference Publication 1311, 1996.

**Богданец Диана Андреевна** – Донской государственный технический университет; e-mail: bogdanets.diana@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра прикладной математики; студент.

**Грищенко Вячеслав Игоревич** – Донской государственный технический университет; e-mail: vgritschenko@donstu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра гидравлики, гидропневмоавтоматики и тепловых процессов; к.т.н.; доцент.

**Калмыкова Ксения Федоровна** – Донской государственный технический университет; e-mail: kfkalmykova@donstu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра электротехники и электроники; аспирант.

**Рахманов Арслан Икрамович** – Донской государственный технический университет; e-mail: ikramovic55@gmail.com; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра проектирования и технического сервиса транспортно-технологических систем; студент.

**Цымбалов Денис Сергеевич** – Донской государственный технический университет; e-mail: dcymbalov@donstu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра электроники и электротехники; старший преподаватель.

**Bogdanets Diana Andreevna** – Don State Technical University; e-mail: bogdanets.diana@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Applied Mathematics; student.

**Grishchenko Vyacheslav Igorevich** – Don State Technical University; e-mail: vgritshenko@donstu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Hydraulics, Hydropneumatic Automation and Thermal Processes; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Kalmykova Ksenia Fedorovna** – Don State Technical University; e-mail: kfkalmykova@donstu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Electrical Engineering and Electronics; postgraduate.

**Rakhmanov Arslan Ikramovich** – Don State Technical University; e-mail: ikramovic55@gmail.com; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Design and Technical Service of Transport and Technological Systems; student.

**Tsymbalov Denis Sergeevich** – Don State Technical University; e-mail: dcymbalov@donstu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Electronics and Electrical Engineering; senior lecturer.

УДК 621.374.33

DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-201-211

**А.Ю. Звягин, К.А. Бойков**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ МЕТОДА АКТИВНОЙ РАДИОСЕНСОРНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

*Представлены результаты разработки и экспериментального исследования двух конструкций безэховых камер, предназначенных для активной радиосенсорной технической диагностики (АРТД). Цель работы заключалась в создании условий для получения достоверного сигнального радиопрофиля (СРП) исследуемого объекта с минимальными искажениями за счет эффективного подавления внешних электромагнитных наводок и отражений. В рамках исследования были реализованы две конфигурации экранированных объемов: первая – на основе многослойной фольгированной отражающей структуры, вторая – с использованием высококачественной ткани Фарадея. Проведено сравнительно оценочное тестирование эффективности экранирования при разных состояниях СВЧ элемента. Состояние СВЧ элемента менялось за счёт изменения схемы СВЧ смесителя, путем выпаивания ключевых элементов. Для верификации функциональных характеристик выполнены серии измерений с помощью зондирования поверхности исследуемого СВЧ-смесителя сверхкороткими импульсами (СКИ). Получаемый СРП регистрировался с помощью осциллографа и принимающей антенны. Для обработки результатов использовался корреляционный анализ Пирсона, который показал свою эффективность в количественной оценке различий СРП объекта в исправном и дефектном состояниях. Полученные экспериментальные данные позволили оценить качество и перспективы материалов по ключевым параметрам: степень подавления паразитных сигналов, устойчивость к внешним помехам в различных условиях эксплуатации, механическая долговечность при циклических нагрузках и экономическая целесообразность реализации с учетом себестоимости материалов и трудоемкости сборки. Результаты исследования демонстрируют практическую применимость обеих конструкций в задачах прецизионных радиоизмерений, при этом выбор конкретного материала определяется оптимальным компромиссом между стоимостью производства, эксплуатационными характеристиками в различных климатических условиях и требуемым уровнем экранирования для конкретного применения. Полученные данные могут быть успешно использованы при проектировании как стационарных лабораторных комплексов, так и мобильных систем АРТД в условиях ограниченных ресурсов, включая полевые измерения и промышленный мониторинг. Исследования показали перспективность обоих подходов для достижения максимальных характеристик экранирования в широком частотном диапазоне.*

*Безэховая камера; активная радиосенсорная диагностика; ткань Фарадея; фольгированные поглотители; радиопрофиль; коэффициент экранирования.*

**A.Y. Zvyagin, K.A. Boikov**

### **EXPERIMENTAL FACILITY BASED ON ANECHOIC CHAMBER FOR ACTIVE RADIOSENSORY TECHNICAL DIAGNOSTICS**

*The article presents the results of the development and experimental study of two designs of anechoic chambers designed for active radiosensory technical diagnostics (ARTD). The aim of the work was to create conditions for obtaining a reliable radio signal profile (SRP) of the object under study with minimal distortion due to the effective suppression of external electromagnetic interference and reflections. As part*