

## Синтез и параметризация моделей газочувствительных датчиков

О.Г. Бондарь <sup>1</sup>, Е.О. Брежнева <sup>1</sup>✉, О.Г. Добросердов <sup>1</sup>,  
К.Г. Андреев <sup>1</sup>, Н.В. Поляков <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

### Резюме

**Цель работы:** поиск и анализ существующих моделей газочувствительных датчиков. Разработка математических моделей газочувствительных датчиков различных типов (полупроводниковых, термокаталитических, оптических, электрохимических) для последующего их использования в процессе обучения искусственных нейронных сетей (ИНС). Исследование основных физико-химических закономерностей, лежащих в основе принципов работы датчиков, учет влияния факторов окружающей среды и перекрестной чувствительности на выходной сигнал датчиков. Сопоставление результатов моделирования с реальными характеристиками выпускаемых промышленностью датчиков. Рассматривается концепция создания математических моделей, проводится их параметризация, исследование и оценка адекватности.

**Методы.** При создании математических моделей использовались численные методы, методы компьютерного моделирования, теория электрических цепей, теория хемосорбции и гетерогенного катализа, уравнения Фрейндлиха и Ленгмюра, закон Бугера-Ламберта-Бера, основы электрохимии. Для оценки адекватности моделей рассчитывалось среднеквадратическое отклонение (СКО) и относительная погрешность.

**Результаты.** Описана концепция создания математических моделей датчиков на основе физико-химических закономерностей, позволяющих автоматизировать процесс генерации данных для обучения искусственных нейронных сетей, применяемых в многокомпонентных газоанализаторах с целью совместной обработки информации. Получены и модернизированы модели полупроводникового, термокаталитического, оптического и электрохимических датчиков, учитывающие влияние дополнительных факторов на сигнал датчиков. Проведена параметризация и оценка адекватности и экстраполяционных свойств моделей по графическим зависимостям, представленным в технической документации датчиков. Определены погрешности (относительная и среднеквадратическая) расхождения реальных данных и результатов моделирования газочувствительных датчиков по основным параметрам. Среднеквадратическая погрешность воспроизведения основных характеристик датчиков не превысила 0,5%.

**Заключение.** Синтезированы многопараметрические математические модели газочувствительных датчиков, учитывающие влияние основного газа и внешних факторов (давление, температуру, влажность, перекрестную чувствительность) на выходной сигнал и позволяющие генерировать обучающие данные для датчиков различных типов.

**Ключевые слова:** газочувствительные датчики; влажность; давление; температура; факторы; математические модели; газочувствительные датчики; концентрация газа; погрешности измерения.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Синтез и параметризация моделей газочувствительных датчиков / О.Г. Бондарь, Е.О. Брежнева, О. Г. Добросердов, К.Г. Андреев, Н.В. Поляков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 138-161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-138-161>.

Поступила в редакцию 22.12.2020

Подписана в печать 14.01.2021

Опубликована 31.03.2021

## Synthesis and Parameterization of Gas Sensor Models

Oleg G. Bondar<sup>1</sup>, Ekaterina O. Brezhneva<sup>1</sup> ✉, Oleg G. Dobroserdov<sup>1</sup>,  
Kirill G. Andreev<sup>1</sup>, Nikolay V. Polyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: [bregnevaeo@mail.ru](mailto:bregnevaeo@mail.ru)

### Abstract

**Purpose of research:** search and analysis of existing models of gas-sensitive sensors. Development of mathematical models of gas-sensitive sensors of various types (semiconductor, thermocatalytic, optical, electrochemical) for their subsequent use in the training of artificial neural networks (INS). Investigation of main physicochemical patterns underlying the principles of sensor operation, consideration of the influence of environmental factors and cross-sensitivity on the sensor output signal. Comparison of simulation results with actual characteristics produced by the sensor industry. The concept of creating mathematical models is described. Their parameterization, research and assessment of adequacy are carried out.

**Methods.** Numerical methods, computer modeling methods, electrical circuit theory, the theory of chemisorption and heterogeneous catalysis, the Freundlich and Langmuir equations, the Buger-Lambert-Beer law, the foundations of electrochemistry were used in creating mathematical models. Standard deviation (MSE) and relative error were calculated to assess the adequacy of the models.

**Results.** The concept of creating mathematical models of sensors based on physicochemical patterns is described. This concept allows the process of data generation for training artificial neural networks used in multi-component gas analyzers for the purpose of joint information processing to be automated. Models of semiconductor, thermocatalytic, optical and electrochemical sensors were obtained and upgraded, considering the influence of additional factors on the sensor signal. Parameterization and assessment of adequacy and extrapolation properties of models by graphical dependencies presented in technical documentation of sensors were carried out. Errors (relative and RMS) of discrepancy of real data and results of simulation of gas-sensitive sensors by basic parameters are determined. The standard error of reproduction of the main characteristics of the sensors did not exceed 0.5%.

**Conclusion.** Multivariable mathematical models of gas-sensitive sensors are synthesized, considering the influence of main gas and external factors (pressure, temperature, humidity, cross-sensitivity) on the output signal and allowing to generate training data for sensors of various types.

**Keywords:** gas-sensitive sensors; humidity; pressure; temperature; factors; mathematical models; gas-sensitive sensors; gas concentration; measurement errors.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Bondar O. G., Brezhneva E. O., Dobroserdov O. G., Andreev K. G., Polyakov N. V. Synthesis and Parameterization of Gas Sensor Models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 138-161 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-138-161>.

Received 22.12.2020

Accepted 14.01.2021

Published 31.03.2021

## Введение

Проектирование газоанализаторов, реализация методов обработки информации в них, оптимизация параметров требует проведения большого числа экспериментальных работ по получению и исследованию характеристик датчиков, входящих в их состав. Реализация методов обработки информации на основе ИНС требует решения вопроса генерации обучающих данных, содержащих значения входных параметров и соответствующих им выходных сигналов датчиков [1, 2, 3]. Данной проблематике посвящены работы профессора А.В. Шапошника, профессора А. В. Калача, профессора И. А. Борисова, профессора В. В. Сысоев, профессора Н. В. Замятина, И.А. Брокарева, Д.М. Шпрехера [4, 5, 6, 7]. Нейронные сети используются в основном только для подавления перекрестной чувствительности, а обучение проводится на данных, полученных экспериментальным путем, что значительно повышает стоимость и трудоемкость работ.

Значительно снизить трудоемкость и стоимость экспериментальных работ можно, используя математические модели газочувствительных датчиков. Промышленностью выпускаются следующие типы газочувствительных датчиков: термokatалитические, полупроводниковые, оптические и электрохимические. Автоматизация процесса производства газоанализаторов на основе ИНС требует наличия базы данных, со-

держающей типовые математические модели основных выпускаемых промышленностью газочувствительных датчиков.

Существующие модели газочувствительных датчиков в основном представлены линейными или нелинейными функциями преобразования и не учитывают перекрестной чувствительности датчиков к мешающим газам, а так же влияния колебаний параметров окружающей среды. Для полупроводниковых и термokatалитических датчиков наиболее часто используют классические модели Фрейндлиха, Ленгмюра и Бугера-Ламберта-Бера, позволяющие описать зависимость выходного сигнала датчика от концентрации основного газа [8]. Аналитический обзор существующих моделей газоочистительных датчиков показал, что работы в данном направлении ведутся в основном с целью оптимизации конструктивных особенностей датчиков и их режимов работы. Данной проблематике посвящены труды Бельшьева Т.В., Гусельникова М.Э., Анисимова О.В., Малышева В.В., Кашина В.Е., Подтелкина О.А., Волчка В.С. [9, 10, 11, 12, 13]. Учитывая вышесказанное, было принято решение о модернизации классических моделей датчиков, с целью учета влияния дополнительных факторов, таких, как давление, влажность, температура и перекрестная чувствительность.

Разработанные математические модели должны учитывать влияние основных факторов на сигнал датчиков, быть

апробированы на конкретных газочувствительных датчиках, обладать экстраполяционными свойствами.

### Материалы и методы

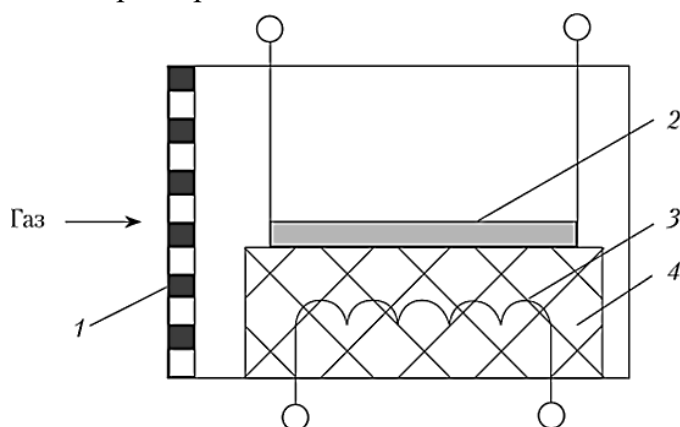
Математические модели, входящие в состав разрабатываемой базы, должны обладать следующими свойствами:

- быть унифицированными, т.е. обеспечивать возможность параметризации с приемлемой точностью по данным датчиков одного типа для различных производителей;
- учитывать влияние основных факторов на сигнал датчика;
- обладать экстраполяционными свойствами.

Для обеспечения соответствия моделей предъявляемым требованиям необходимо при их разработке учитывать физико-химические закономерности, лежащие в основе принципа работы датчиков. Коэффициенты моделей должны находиться параметризацией по соответствующим характеристикам

датчиков, так как применение физических и химических констант не позволит автоматизировать процесс, в связи с зависимостью их значений от конструктивных и технологических особенностей датчиков не только для различных производителей, но и в одной партии. Рассмотрим основные концепции построения моделей по каждому из типов газочувствительных датчиков.

Для детектирования токсичных газов (монооксида углерода, аммиака, сероводорода) и некоторых горючих газов (водорода, метана) широко используются полупроводниковые датчики. На рис. 1 представлена конструкция типовых полупроводниковых датчиков. Выходным сигналом полупроводниковых датчиков является сопротивление, обратно пропорциональное проводимости, величина которой зависит от соотношения долей поверхности, занимаемых газами-акцепторами и газами-донорами электронов [11-17].



**Рис.1.** Полупроводниковый датчик газоанализатора: 1 – полимерная мембрана; 2 – полупроводник; 3 – нагревательная спираль; 4 – керамический корпус

**Fig. 1.** Gas analyzer semiconductor sensor: 1 – polymer membrane; 2 – semiconductor; 3 – heating coil; 4 – ceramic housing

В основе концептуальной модели полупроводникового датчика была взята теория хемосорбции на поверхности полупроводника.

Процесс адсорбции на поверхности полупроводника протекает согласно уравнению Фрейндлиха [8]:

$$\theta = K \cdot C^n,$$

где  $K$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от природы адсорбируемого газа;

$C$  – концентрация газа в воздухе.

При разработке модели опирались на следующие положения и допущения [14-26]:

- адсорбция молекул воды на поверхности полупроводника осуществляется на адсорбционные центры, занятые атомами кислорода, и сопровождается увеличением проводимости за счет высвобождения захваченных кислородом электронов:

$$G = K_1 N_a - K_2 \theta_{O_2} N_a + K_3 \theta_{H_2O} \theta_{O_2} N_a,$$

где  $N_a$  – общее число адсорбционных мест на поверхности полупроводника;

$K_i$  – коэффициент пропорциональности, устанавливающий связь между числом электронов и проводимостью;

$\theta_{O_2}$  – степень заполнения поверхности полупроводника атомами кислорода, которая представляет собой соотношение числа адсорбированных молекул газа к общему числу адсорбционных мест;

$\theta_{H_2O}$  – доля поверхности, занятая гидроксильными группами в результате адсорбции водяных паров;

- в результате совместной адсорбции кислорода и водяных паров поверхность полупроводника покрывается кислородно-гидроксильным слоем, а адсорбция газов восстановителей протекает на адсорбционные центры, занятые как гидроксильными группами  $N_{H_2O}$ , так и атомами кислорода, оставшимися после адсорбции водяных паров ( $N_{O_2} - N_{H_2O}$ ). Обе реакции приводят к увеличению проводимости полупроводника за счет увеличения числа свободных электронов:

$$G = K_1 T_a - K_2 \theta_{O_2} N_a + K_3 \theta_{H_2O} \theta_{O_2} N_a + K_4 \theta_{OG} (\theta_{O_2} - \theta_{H_2O} \theta_{O_2}) N_a + \dots + K_5 (1 - \theta_{OG}) \theta_{H_2O} \theta_{O_2} N_a,$$

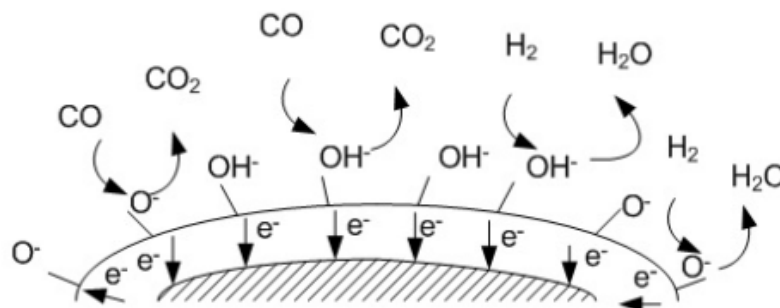
где  $\theta_{OG}$  – доля поверхности, занятая атомами основного газа восстановителя;

- на поверхности полупроводника имеется прилегающая к электродам неактивная часть материала;

- влияние температуры учитывалось с помощью уравнения Моррисона;

- адсорбция газов восстановителей происходит на различные адсорбционные центры (конкуренция отсутствует), ввиду относительно низких концентраций газов в сравнении с концентрацией кислорода.

На рис. 2 схематично представлены реакции, протекающие на поверхности полупроводникового датчика при наличии в воздухе двух газов восстановителей, водорода и монооксида углерода.



**Рис.2.** Реакции на поверхности полупроводникового датчика

**Fig. 2.** Reactions on the surface of a semiconductor sensor

Полупроводниковые датчики, ввиду специфики принципа действия, проявляют высокую чувствительность к перекрестным газам, колебаниям температуры и влажности воздуха. Все эти факторы учтены в полученной математической модели.

Термокаталитические датчики применяют для детектирования горючих газов. Выделяемое в результате каталитического горения тепло пропорционально выходному сигналу датчика [27]. В качестве измерительной схемы наиболее часто применяется мостовая.

В основе математической модели термокаталитического датчика взято уравнение теплового баланса [28]:

$$U_R I = \delta_T (T - T_C),$$

где  $U_R$  – падение напряжения;

$I$  – ток резистора;

$\delta_T$  – коэффициент теплоотдачи резистора;

$T$  – температура резистора;

$T_C$  – температура окружающей среды.

Разработка математической модели термокаталитического датчика осуществлялась на основании адсорбционной теории гетерогенного катализа и теории

электрических цепей. При расчете выходного напряжения датчика использовалась теория мостовых схем. Скорость каталитической реакции определялась по кинетическому выражению Ленгмюра-Хиншелвуда, для описания процессов адсорбции газов применялось адсорбционное уравнение Ленгмюра [8]:

$$\theta_z = \frac{\sqrt{b_z p_z}}{1 + \sqrt{b_z p_z}},$$

где  $\theta_z$  – доля поверхности, занятая газом;

$b_z$  – адсорбционный коэффициент;

$p_z$  – парциальное давление газа в воздухе.

При разработке модели опирались на следующие положения и допущения [26-29]:

– для определения константы скорости реакции использовалось модифицированное уравнение Аррениуса;

– при учете перекрестной чувствительности для мешающих газов, ввиду низких концентраций, пренебрегали зависимостью константы скорости от степени покрытия поверхности катализатором;

– конкуренцией основного и мешающего газов за адсорбционные центры, ввиду низких концентраций мешающих газов, пренебрегали;

– для описания зависимости сопротивления платиновой спирали от температуры использовалось уравнение Каллендара-Ван Дьюзена.

Разработанная модель позволяет учитывать влияние следующих факторов на сигнал датчика: перекрестных газов, колебания температуры, давления.

Оптические датчики используются для детектирования углекислого газа и некоторых горючих газов [33]. В основе принципа работы оптических датчиков лежит способность газов поглощать инфракрасное излучение, избирательность достигается выбором длины волны. В качестве модели была взята и модерни-

зирована уже существующая модель, базирующаяся на известном законе поглощения Бугера-Ламберта-Бера [30]:

$$I(C, \lambda) = I_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)LC},$$

где  $C$  – концентрация газа;

$\lambda$  – длина волны;

$L$  – длина пути поглощения;

$\alpha(\lambda)$  – спектральный коэффициент поглощения газа.

Модернизация модели заключалась в учете конструктивных особенностей датчиков (принцип работы датчика по схеме «один источник излучения – две длины волны») и влияния параметров окружающей среды, таких как температура и давление, через изменение свойств пробы (закон Менделеева – Клапейрона). На рис. 3 представлена конструкция оптического датчика, поясняющая принцип работы.

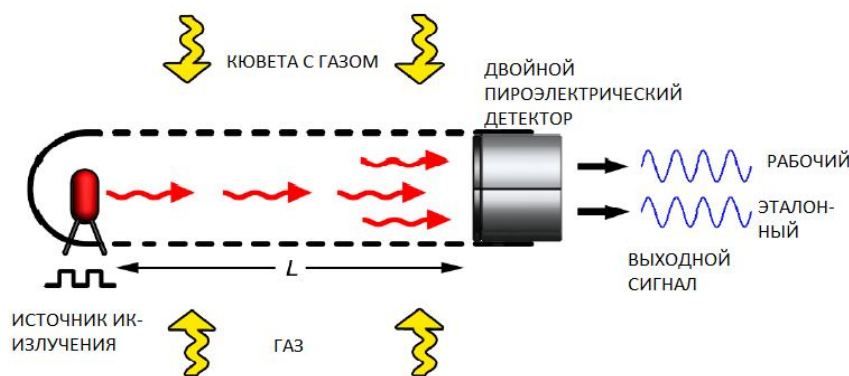


Рис.3. Инфракрасный оптический датчик

Fig. 3. Infrared optical sensor

Выходной сигнал датчика рассчитывается из соотношения двух интенсивностей излучений рабочего и эталонного. Рабочее излучение – излучение, полоса инфракрасных длин волн которого соответствует полосе поглощения детектируемого газа. Эталонное излучение – излучение с длинной вол-

ны, на которой абсорбция ИК-излучения газом не происходит.

Оптические датчики обладают высокой избирательностью, в связи с чем модель оптических датчиков учитывает только влияние колебаний температуры и давления окружающей среды.

Для описания функциональной зависимости выходного сигнала электрохимического (амперометрического) датчика от концентрации детектируемого газа использовалась уже существующая линейная математическая модель. Амперометрические датчики представляют собой гальваническую ячейку, в которой протекает электрохимическая реакция. Такие датчики наиболее часто используют для детектирования кислорода, ток, образующийся в результате реакции, прямо пропорционален его концентрации. Кислород поступает в ячейку через специальную мембрану (наиболее часто, политетрафторэтиле-

новую), поэтому в основу модели положен закон Фика:

$$J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x},$$

где  $J$  – плотность потока вещества;

$\partial C / \partial x$  – градиент концентрации.

Учитывая принцип работы датчика, основным мешающим фактором, оказывающим влияние на выходной сигнал, является давление. Датчики данного типа высоко избирательны, учитывая специфику электрохимических реакций.

В табл. 1 представлена база математических моделей на основные типы газочувствительных датчиков, в табл. 2 – обозначения символов.

**Таблица 1.** База математических моделей газочувствительных датчиков

**Table 1.** Base of mathematical models of gas-sensitive sensors

Тип датчика / Sensor type	Математическая модель датчика / Mathematical model of the sensor
Полупроводниковый / Semiconductor	$\frac{R_s}{R_0} = \frac{1}{(A_1 + A_2 (C_{H_2O} \frac{P}{P_0})^{n_1} + A_3 (C_{H_2O} \frac{P}{P_0})^{n_1} (C_{io} \frac{P}{P_0})^{n_2} + A_4 (C_{io} \frac{P}{P_0})^{n_2} + \dots + A_6 (C_{H_2O} \frac{P}{P_0})^{n_1} (C_{im} \frac{P}{P_0})^{n_3} + A_7 (C_{im} \frac{P}{P_0})^{n_4}) \times e^{A_8 (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} + A_5},$
Термокаталитический / Thermocatalytic	$\frac{\Delta U}{2\Delta U_{0,5LEL}} = \frac{\frac{\gamma}{2} \left( A_1 \left( \frac{\sqrt{A_2 C_{io} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{io} P}} \right)^{(A_3+1)} \exp \left[ \frac{A_4 \sqrt{A_2 C_{io} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{io} P}} \right] + A_5 C_{im} P \right) + \left( \frac{A_1 \left( \frac{\sqrt{A_2 C_{io} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{io} P}} \right)^{(A_3+1)} \exp \left[ \frac{A_4 \sqrt{A_2 C_{io} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{io} P}} \right] + A_5 C_{im} P}{A_1 \left( \frac{\sqrt{A_2 2P_0}}{1 + \sqrt{A_2 2P_0}} \right)^{(A_3+1)} \exp \left[ \frac{A_4 \sqrt{A_2 2P_0}}{1 + \sqrt{A_2 2P_0}} \right]} \right) \delta_{T_H} (1 + \gamma T_{CH})}{+ 2\delta_{T_H} \frac{P}{P_0} (1 + \gamma T_c)}$



Тип датчика / Sensor type	Математическая модель датчика / Mathematical model of the sensor
Оптический, инфракрасный / Optical, infrared	$S = A \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot (C_{io} \cdot \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T})^\beta})$
Электрохимический, амперометрический / Electrochemical, amperometric	$U_{\text{вых}} = A \cdot C_{io} \cdot \frac{P}{P_0}$

**Таблица 2.** Обозначения символов в математических моделях**Table 2.** Symbol designations in mathematical models

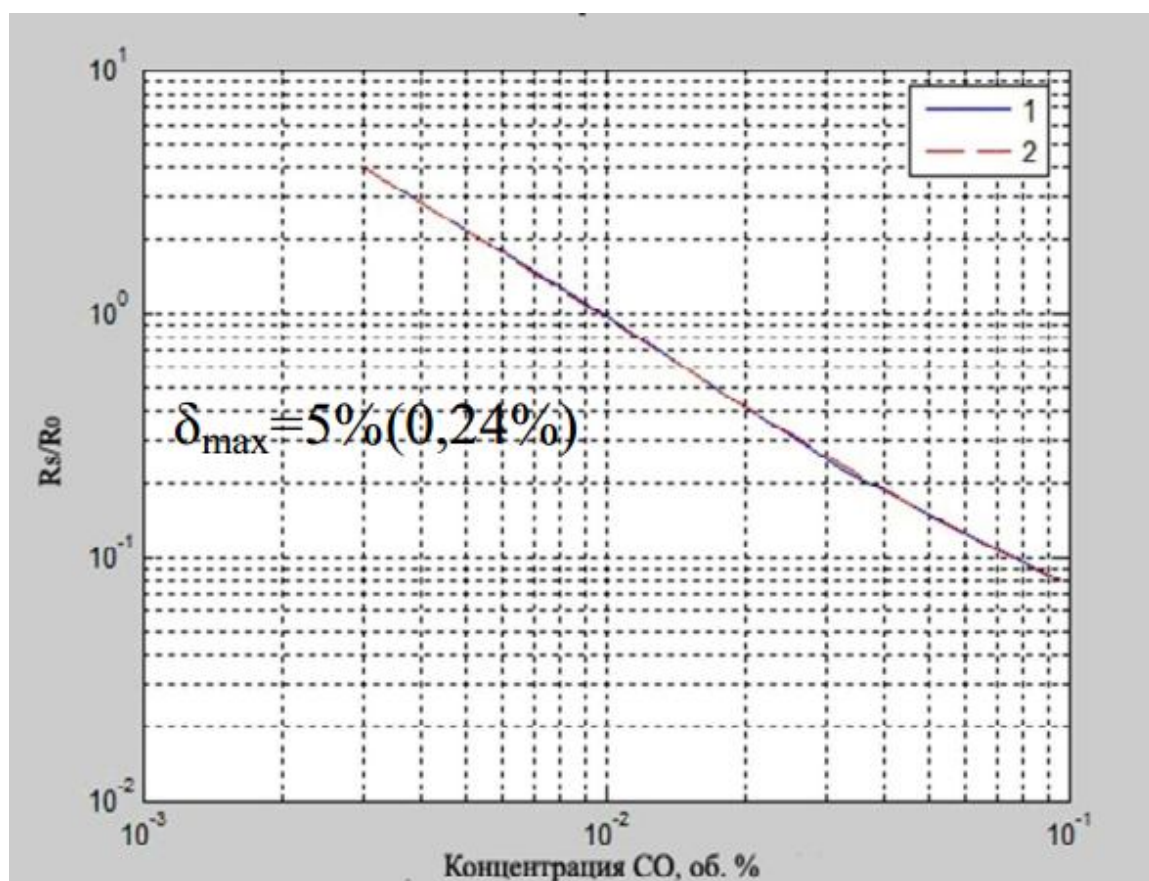
Общие обозначения / General designations	$C_{io}$	концентрация основного газа
	$C_{im}$	концентрация мешающего газа
	$C_{H_2O}$	концентрация водяных паров
	$P, P_0$	давление воздуха, давление при н.у.
	$RH, RH_0$	влажность воздуха, влажность при н.у.
	$T, T_0$	температура воздуха, температура при н.у.
	$A_i$	параметризуемые коэффициенты
Полупроводниковый / Semiconductor	$n$	параметризуемые коэффициенты
	$R_s, R_0$	сопротивление датчика, сопротивление датчика при фиксированной концентрации
Термокаталитический / Thermocatalytic	$\delta_{T_n}$	коэффициент теплоотдачи резистора при нормальных условиях
	$\gamma$	температурный коэффициент сопротивления
	$\Delta U, \Delta U_{0,5LEL}$	напряжение моста, выходное напряжение моста при концентрации газа 0,5 LEL
	$T_{CH}$	температура среды номинальная.
Оптический, инфракрасный / Optical, infrared	$\alpha, \beta$	параметризуемые коэффициенты
	$S$	сигнал датчика
Электрохимический, амперометрический / Electrochemical, amperometric	$U_{\text{вых}}$	выходное напряжение

## Результаты и их обсуждение

Апробация моделей проводилась на следующих датчиках: полупроводниковый датчик монооксида углерода *TG2442 (Figaro)*, термокаталитический датчик водорода *NP-AHS (Nemoto)*, оптический датчик *MSH-P-CO<sub>2</sub>/NC/TC (Dynamet)*, электрохимический датчик кислорода *I-01 (International Technology)*. На рис. 4-9 представлены результаты параметризации основной зависимости для всех трех типов датчиков, за исключением электрохимического дат-

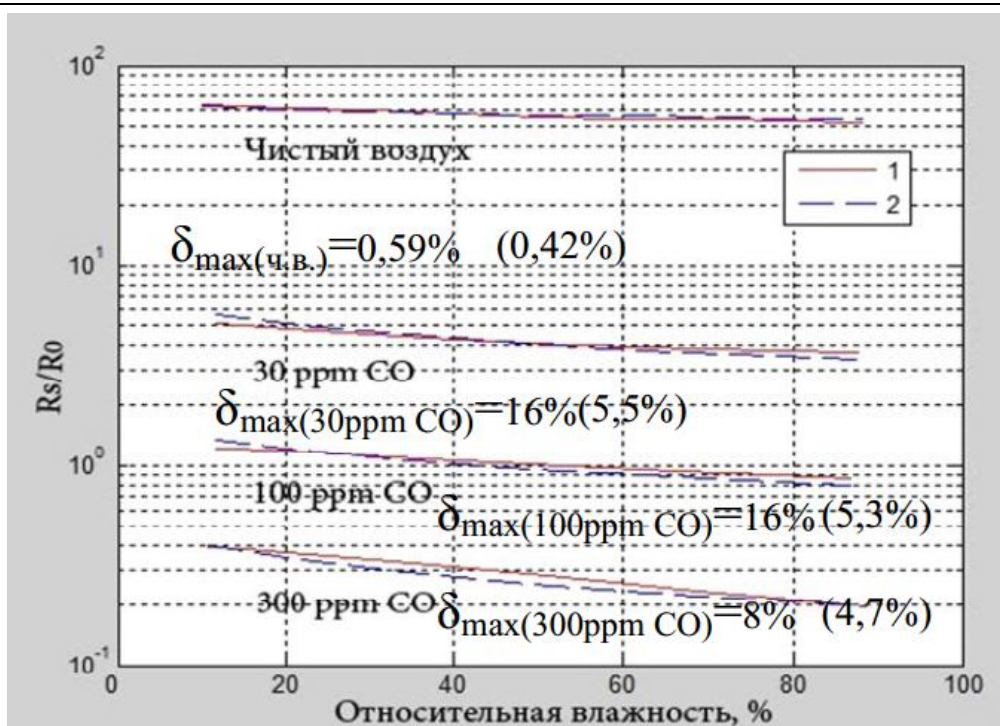
чика кислорода, имеющего линейную характеристику преобразования. Для достижения требуемого уровня точности модернизированная модель оптического датчика параметризовалась с разбиением характеристики на поддиапазоны.

Результаты параметризации и оценки экстраполяционных свойств математической модели полупроводникового датчика представлены в табл. 3. В табл. 4 сведены результаты исследований моделей датчиков трех типов: термокаталитического, оптического и электрохимического.



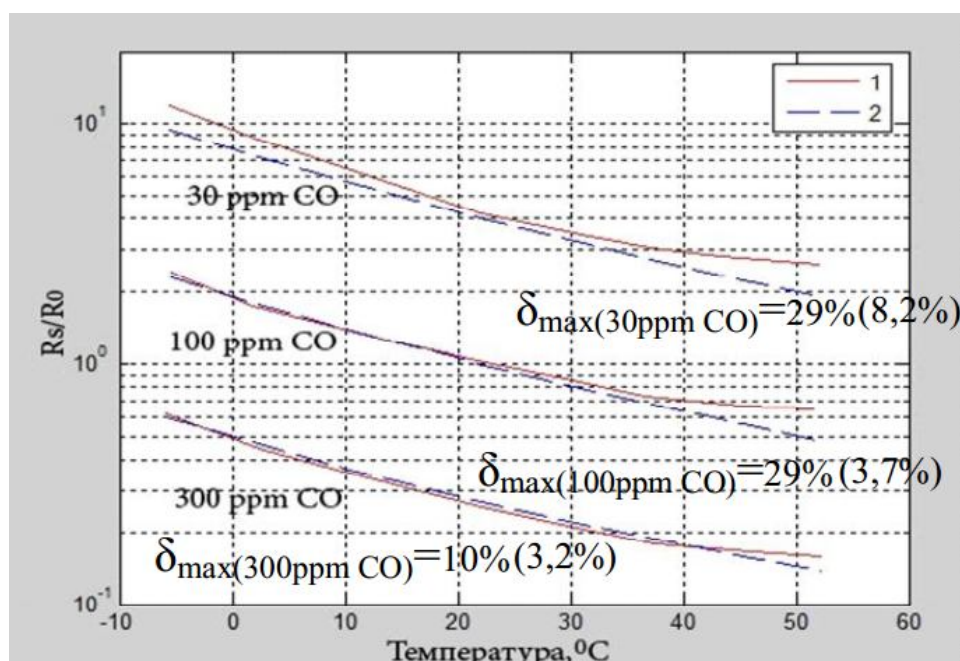
**Рис. 4.** Результат аппроксимации основной характеристики полупроводникового датчика CO: 1 – данные реального датчика; 2 – результат моделирования

**Fig. 4.** The result of the approximation of the main characteristic of the semiconductor sensor CO: 1 – the data of the real sensor; 2 – simulation result



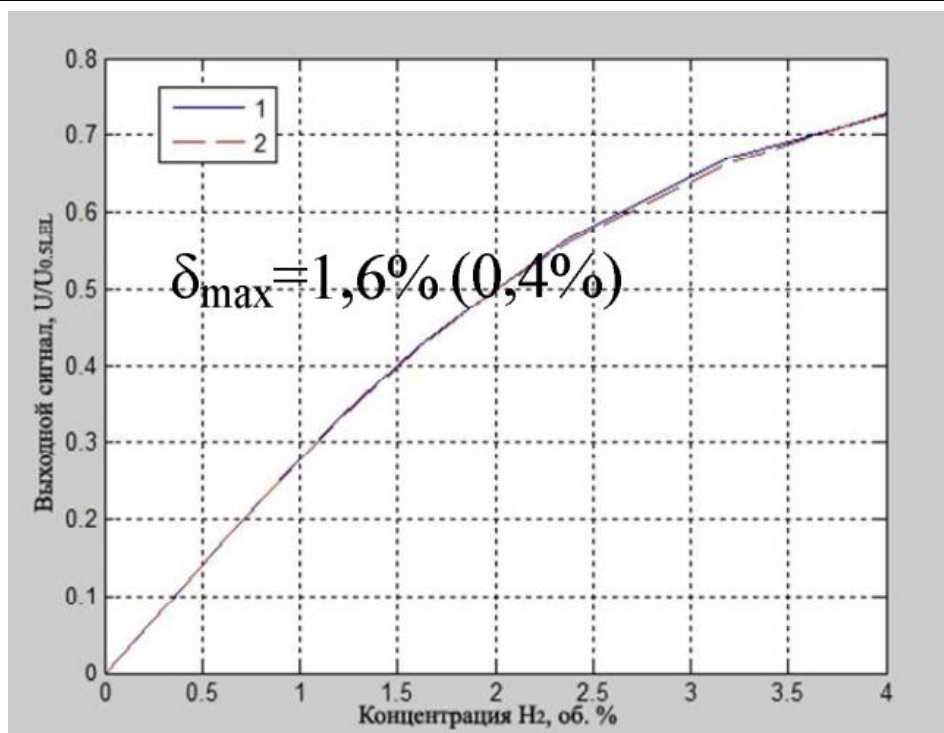
**Рис. 5.** Результаты аппроксимации влияния влажности на сигнал полупроводникового датчика CO: 1 – данные реального датчика; 2 – результат моделирования

**Fig. 5.** Results of the approximation of the influence of humidity on the signal of a semiconductor CO sensor: 1 – real sensor data; 2 – simulation result



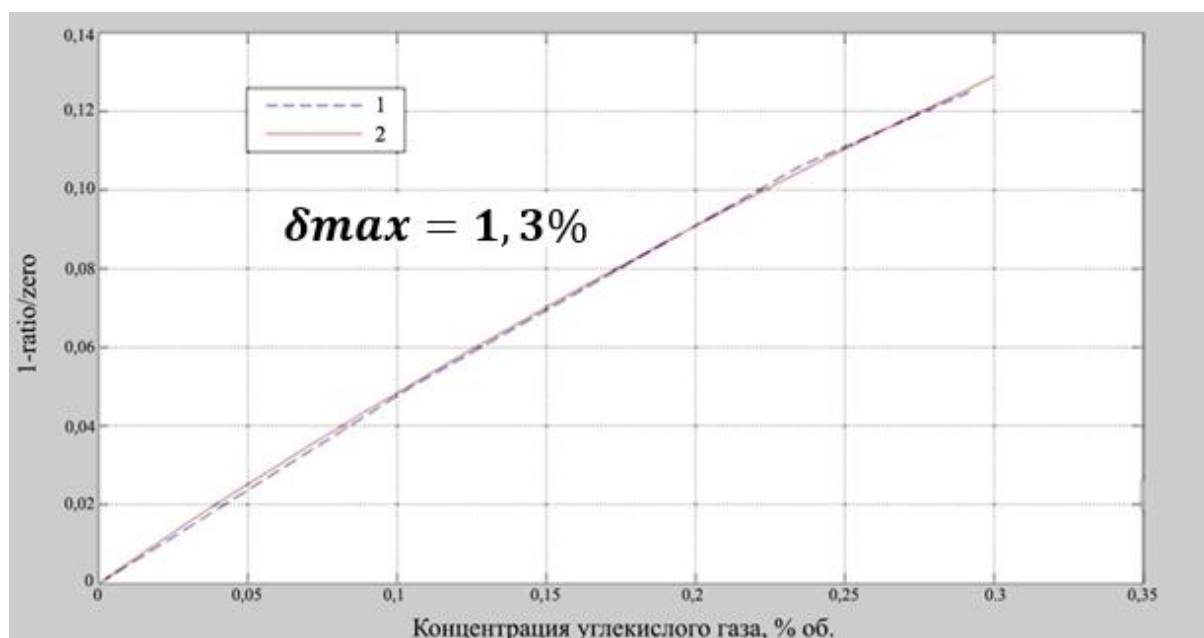
**Рис.6.** Результаты аппроксимации влияния температуры на сигнал полупроводникового датчика CO: 1 – данные реального датчика; 2 – результат моделирования

**Fig. 6.** The results of the approximation of the temperature effect on the signal of a semiconductor CO sensor: 1 – the data of a real sensor; 2 – simulation result



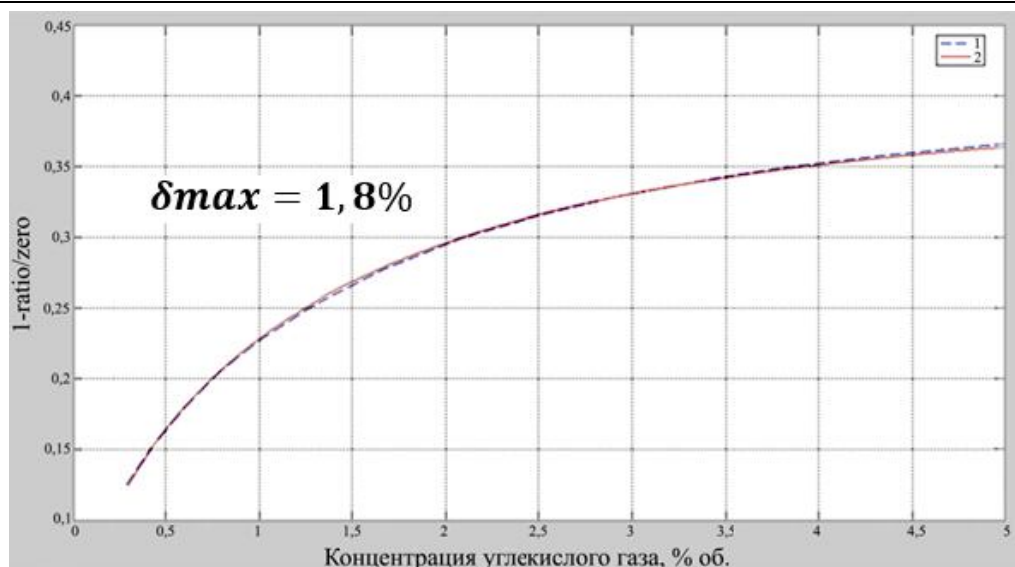
**Рис. 7.** Результаты аппроксимации основной характеристики термокаталитического датчика водорода: 1 – данные реального датчика; 2 – результат моделирования

**Fig. 7.** Results of approximation of the main characteristic of a thermocatalytic hydrogen sensor: 1 – real sensor data; 2 – simulation result



**Рис. 8.** Результаты аппроксимации основной характеристики оптического датчика  $CO_2$  в диапазоне от 0 до 0,3 об.%. 1 – результат моделирования; 2 – данные реального датчика

**Fig. 8.** Results of approximation of the main characteristic of the optical  $CO_2$  sensor in the range from 0 to 0.3 vol.%. 1 – simulation result; 2 – real sensor data



**Рис. 9.** Результаты аппроксимации основной характеристики оптического датчика  $\text{CO}_2$  в диапазоне от 0,3 до 5,0 об.%. **1** – результат моделирования; **2** – данные реального датчика

**Fig. 9.** Results of approximation of the main characteristic of the optical  $\text{CO}_2$  sensor in the range from 0.3 to 5.0 vol.%. **1** – simulation result; **2** – real sensor data

**Таблица 3.** Результаты исследования модели полупроводникового датчика

**Table 3.** Results of the study of the semiconductor sensor model

Тип датчика / Sensor type	Варьируемый фактор / Variable factor	Диапазон значе- ний параметра / Range of parameter values	Условия / Conditions	$\delta_{max}$ , %	СКО, % / MSE, %
Полупровод- никовый / Semiconductor	Концентрация $\text{CO}$	Параметризация	$RH = 50\%$ $C_{H_2} = 0$ об.%; $T = 293,15 \text{ K}$	5	0,24
		30 – 1000 ppm			
	Концентрация $\text{H}_2$	Параметризация	$RH = 50\%$ $C_{CO} = 0$ об.%; $T = 293,15 \text{ K}$	0,9	0,67
		300 – 1000 ppm			
	Влажность	Параметризация	$C_{CO} = 0,003$ об.%; $C_{H_2} = 0$ об.%; $T = 293,15 \text{ K}$	0,59	0,42
		10 – 90 %			
		Экстраполяция	$C_{CO} = 0,01$ об.%; $C_{H_2} = 0$ об.%; $T = 293,15 \text{ K}$	5	5,5
		10 – 70 %			
		70 – 90 %			
		Экстраполяция	$C_{CO} = 0,03$ об.%; $C_{H_2} = 0$ об.%; $T = 293,15 \text{ K}$	8	4,7
		10 – 90 %			
		55 – 75 %			

Окончание таблицы 3 / Table 3 (ending)

Тип датчика / Sensor type	Варьируемый фактор / Variable factor	Диапазон значений параметра / Range of parameter values	Условия / Conditions	$\delta_{max}$ , %	СКО, % / MSE, %
	Температура	Экстраполяция	$RH = 50\%$ ; $C_{CO} = 0,003$ об.%; $C_{H_2} = 0$ об.%	20	8,2
		-5 – +15 °C			
		+15 – +30 °C		10	
		+30 – +50 °C		29	
		Экстраполяция	$RH = 50\%$ ; $C_{CO} = 0,01$ об.%; $C_{H_2} = 0$ об.%	5	3,7
		-5 – +35 °C			
		+35 – +50 °C		29	
		Параметризация	$RH = 50\%$ ; $C_{CO} = 0,03$ об.%; $C_{H_2} = 0$ об.%	6	3,2
		-5 – +45 °C			
		+45 – +50 °C		10	

Таблица 4. Результаты исследования математических моделей датчиков

Table 4. Results of the study of mathematical models of sensors

Тип датчика / Sensor type	Варьируемый фактор / Variable factor	Диапазон значений параметра / Range of parameter values	Условия / Conditions	$\delta_{max}$ , %	СКО, % / MSE, %
Термокаталитический / Thermocatalytic	Концентрация $H_2$	Параметризация	$RH = 50\%$ $C_{CO} = 0$ об.%; $T = 293,15$ K	1,6	0,4
		0 – 4 об.%			
	Давление	Экстраполяция	$RH = 50\%$ $C_{H_2} = 0,24$ об.%; $T = 293,15$ K	9,0	2,9
		90 - 110 кПа			
	Температура	Экстраполяция	$RH = 50\%$ $C_{H_2} = 0,24$ об.%; $T = 293,15$ K	4,1	1,9
		+10 – +50 °C			

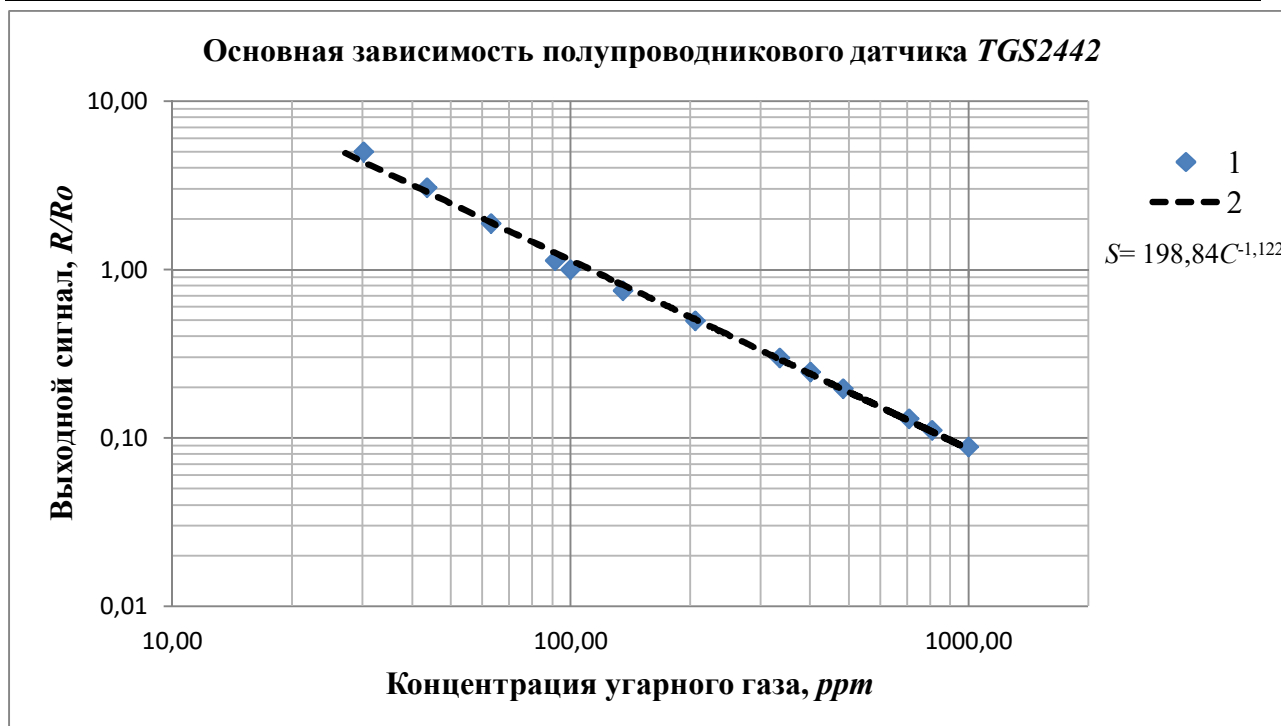


Тип датчика / Sensor type	Варьируе- мый фактор / Variable factor	Диапазон значе- ний параметра / Range of parameter values	Условия / Conditions	$\delta_{max}$ , %	СКО, % / MSE, %
Оптический / Optical, infrared	Концентра- ция $CO_2$	Параметризация	$RH = 50\%$ $T = 293,15 K$	1,3	0,05
		0 – 0,3 об. %			
		0,3 - 5 об. %		1,8	0,06
	Температура	Экстраполяция	$RH = 50\%$ $C_{CO_2} = 1,0$ об. %	5,1%	0,1
		+10 – +50 °C			
	Давление	Экстраполяция	$RH = 50\%$ $T = 295,23 K$ $C_{CO_2} = 1,0$ об. %	0,1	0,05
		101,325 - 81,360 кПа			
Электрохимический / Electrochemical, amperometric	Концентра- ция $O_2$	Параметризация	$RH = 50\%$ $T = 293,15 K$	0,5	0,01
		0 – 21 об. %			

Полученные значения погрешностей позволяют судить об эффективности предложенного подхода к разработке математических моделей, а также о наличии экстраполяционных свойств. Значения среднеквадратической погрешности расхождения основных функций преобразования датчиков, полученных в результате моделирования и представленных производителем, не превышает 0,5%. Максимальное значение СКО, характеризующие расхождение результатов моделирования и реальных данных по влиянию дополнительных факторов (перекрестная чувствительность, влажность, давление, температура), составляет 8,2% по учету влияния

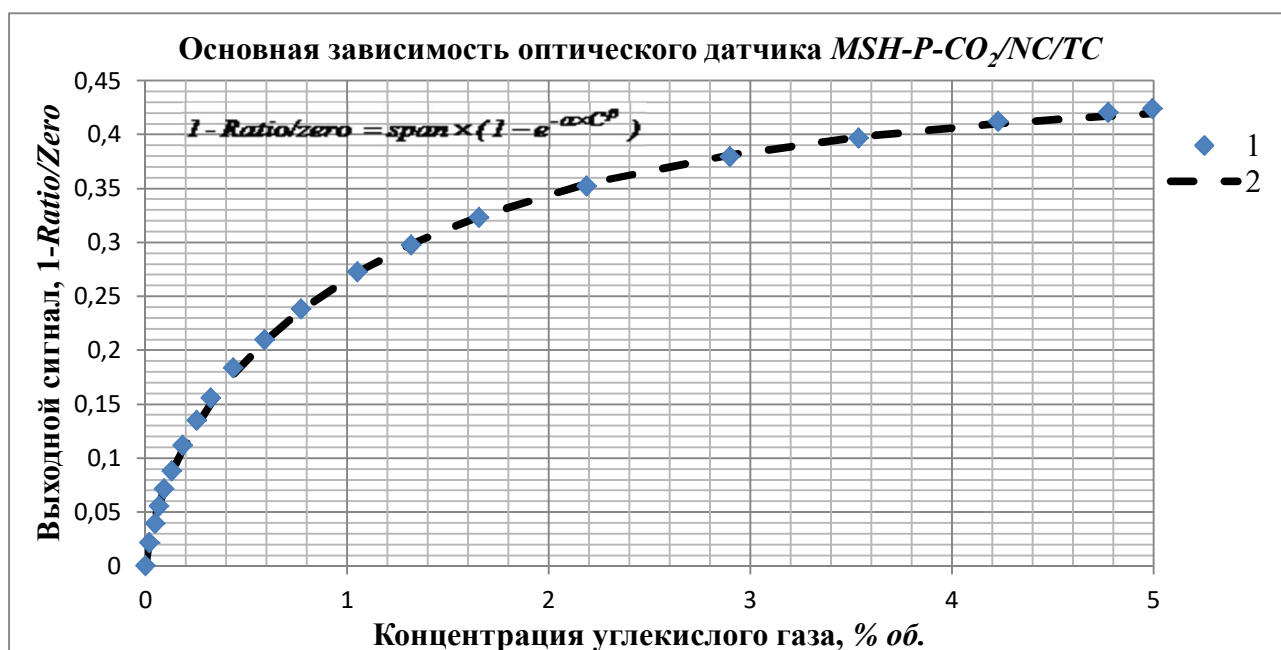
температуры на полупроводниковый датчик угарного газа. Для датчиков в табл. 3 погрешности не превышают 3 %.

На рис. 10-12 представлены исходные графики функций преобразования основных зависимостей, полученные по данным производителей, в табл. 5 сопоставлены погрешности воспроизведения основной характеристики датчиков, полученные в результате моделирования, с погрешностями самих датчиков. В табл. 6 – погрешности датчиков, вызванные колебаниями параметров среды до и после обработки сигнала с использованием разработанных математических моделей.



**Рис. 10.** График зависимости выходного сигнала датчика от концентрации угарного газа:  
 1 – данные производителя; 2 – уравнение регрессии по данным производителя;  
 S – сигнал датчика; C – концентрация газа

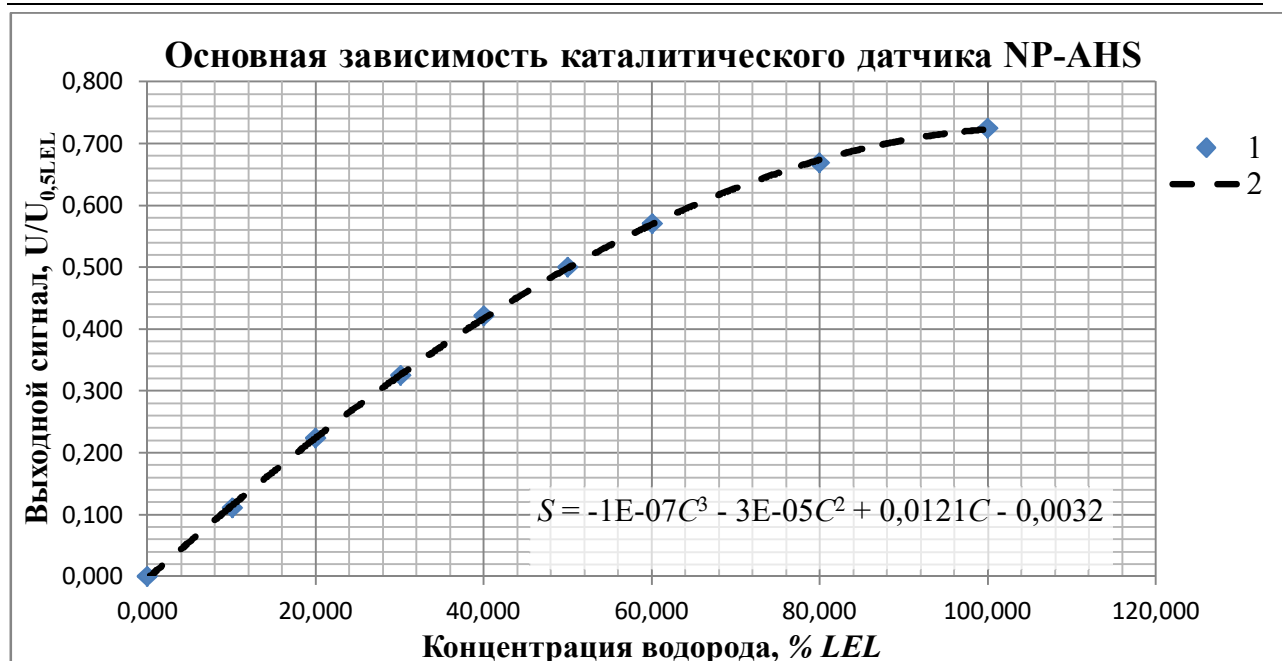
**Fig. 10.** Graph of the dependence of the sensor output signal on the carbon monoxide concentration:  
 1 – manufacturer's data; 2 – regression equation according to the manufacturer's data;  
 S – sensor signal; C – gas concentration



**Рис.11.** График зависимости выходного сигнала датчика от концентрации углекислого газа:  
 1 – данные производителя; 2 – уравнение регрессии по данным производителя

**Fig. 11.** Graph of the dependence of the sensor output signal on the carbon dioxide concentration:  
 1 – manufacturer's data; 2 – regression equation according to the manufacturer's data





**Рис.12.** График зависимости выходного сигнала датчика от концентрации водорода:

1 – данные производителя; 2 – уравнение регрессии по данным производителя;

S – сигнал датчика; C – концентрация газа

**Fig. 12.** Graph of the sensor output signal dependence on the hydrogen concentration:

1 – manufacturer's data; 2 – regression equation according to the manufacturer's data;

S – sensor signal; C – gas concentration

**Таблица 5.** Сопоставление погрешностей датчиков и моделей по воспроизведению основной характеристики

**Table 5.** Comparison of sensor errors and models for reproducing the main characteristic

Тип датчика / Sensor type	Погрешность датчика / Sensor error		Погрешность модели / Model error	
	СКО, %	Макс. отн., %	СКО, %	Макс. отн., %
Полупроводниковый	3,10	15,10	0,24	5
Термокаталитический	0,30	5,09	0,4	1,6
Оптический	0,10	13,40	0,06	1,8

**Таблица 6.** Сопоставление погрешностей до и после обработки данных, с использованием математических моделей по дополнительным факторам

**Table 6.** Comparison of errors before and after data processing, using mathematical models on additional factors

Влияющий фактор / Influencing factor	H <sub>2</sub> (0-4 об. %)		CO (0,003 - 0,1 об.%)		CO <sub>2</sub> (0 - 5 об. %)	
	До обработки / Before processing	После обработки / After processing	До обработки / Before processing	После обработки / After processing	До обработки / Before processing	После обработки / After processing
RH, %/10%	-	-	7,7	1,5	-	-
T, %/10 <sup>0</sup> C	1,2	0,15	20	3,3	3,2	0,85
P, %/5кПа	3	0,35	5,7	1,2	5	0,77

Наибольший интерес представляют полупроводниковые и термокаталитические датчики, обладающие высокой стабильностью характеристик и быстрым действием, длительным сроком службы и низкой стоимостью, в сравнении с электрохимическими и оптическими датчиками. Кроме того, для данных типов датчиков были разработаны новые модели, а не модернизированы существующие, в связи с отсутствием моделей, позволяющих учитывать влияние таких факторов, как температура, влажность, перекрестная чувствительность, давление. Именно поэтому, для полупроводниковых и термокаталитических датчиков проведены наиболее детальные исследования математических моделей.

## Выводы

Проведенные работы позволили сгенерировать математические модели основных типов газочувствительных датчиков, выпускаемых промышленностью. Разработанные математические модели лежат в основе функционирования

программного комплекса для автоматизации проектирования газоанализаторов на основе нейронных сетей, реализованного в среде имитационного моделирования.

Сгенерированные модели газочувствительных датчиков обладают следующими преимуществами:

- позволяют с требуемой точностью воспроизводить основные и дополнительные характеристики датчиков;
- обладают экстраполяционными свойствами, в отличие от эмпирических регрессионных уравнений;
- позволяют в автоматическом режиме генерировать выходной сигнал датчиков при подаче на вход различных комбинаций влияющих факторов, что необходимо для генерации обучающих данных;
- обеспечивают сжатие данных (один датчик – одна модель), взамен альтернативным вариантам хранения данных в виде совокупности регрессионных кривых по каждому влияющему фактору или в виде таблиц.

## Список литературы

1. Брокеров И.А. Искусственные нейронные сети для решения задачи анализа компонентного состава газовых смесей // Управление большими системами. Вып. 80. М.: ИПУ РАН, 2019. С.98-115.
2. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Чернышов Р.Е. Применение нейронных сетей в задаче количественного анализа состава воздушной среды // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 159-174. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-159-174>.

3. Томакова Р.А., Филист С.А., Яа З.До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 44-50.
4. Контроль качества продуктов с помощью искусственного обоняния / А.В. Шапошник, К.К. Полянский, Н.С. Демочко, А.Н. Пономарев // Молочная промышленность. 2005. № 8. С. 5354.
5. Pouter J. Smartphone ownership and internet usage continues to climb in emerging economies. Washington, DC, USA: Pew Research Center, 2016. 44 p.
6. Chansin G., Pugh D. Environmental gas sensors 2017-2027. Cambridge, UK: CISION, 2017. 166 p.
7. Варезжников А.С., Сысоев В.В. Обработка векторных сигналов газоаналитического мультисенсорного преобразователя // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сборник трудов V Международной юбилейной научной конференции. Саратов, 2017. С. 287-291.
8. Крылов О.В. Гетерогенный катализ. М.: Академкнига, 2004. 679 с.
9. Гаев А.В., Роговский А.Д., Ланцберг А.В. Классификация физических объектов при помощи сверточных нейронных сетей на примере задачи распознавания газов // Технологии инженерных и информационных систем. 2019. № 1. С. 95-104.
10. Borrego C., Costa A. M., Ginja J. [et al.]. Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise // Atmospheric Environment. 2016. Vol. 147. P. 246-263.
11. Исследование отклика тонкопленочного сенсора на основе оксида олова в импульсном режиме для различных газов / О.В. Анисимов, Н.К. Максимова, Е.Ю. Севастьянов, Е.В. Черников // Известия вузов. Физика. 2006. № 3. С. 186-187.
12. Чувствительность полупроводниковых газовых сенсоров к водороду и кислороду в инертной газовой среде / В. В. Малышев, А. В. Писляков, И. Ф. Крестников, В. А. Крутов, С. Н. Зайцев // ЖАХ. 2001. № 9. С. 976-983.
13. Guseva A.I., Malykhina G.F., Nevelskiy A.S. Neural Network Based Algorithm for the Measurements of Fire Factors Processing // Stud. Comput. Intell. 2019. Vol. 799. P. 160–166.
14. Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring / F. George., L. M. Cavanagh, A. Afonja, R. Binions // Sensors. 2010. P. 5469-5502
15. Pour M. M., Lashkov A., Radocea A. [et al.] Laterally extended atomically precise graphene nanoribbons with improved electrical conductivity for efficient gas sensing // Nature Communications. 2017. Vol. 8. P. 820.
16. Toward new gas-analytical multisensor chips based on titanium oxide nanotube array / F. Fedorov, M. Vasilkov, A. Lashkov [et al.] // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. P. 9732.

17. Использование нейросетевой модели обработки данных в системах обнаружения пожаров для определения места возгорания / А.И. Гусева, Г.Ф. Малыхина, В.Н. Круглеевский, С.Н. Турусов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2. № 2. С. 93–102.

18. B̂arsan N., Weimar U. Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO<sub>2</sub> sensors in the presence of humidity // J. Phys.: Condens. Matter 2003. 15. P. 813–839.

19. Malykhina G., Guseva A., Militsyn A. Spatial-temporal digital twin models as a direction for the development of cross-cutting digital technologies // Proceedings of the International Scientific-Practical Conference “Business Cooperation as a Resource of Sustainable Economic Development and Investment Attraction” (ISPCBC 2019). Paris, France: Atlantis Press, 2019. 729 p.

20. Влияние влажности на свойства сенсоров водорода на основе тонких пленок Pt/SnO<sub>2</sub>:Sb в режимах постоянного и импульсного нагрева / О.В. Анисимов, В.И. Гаман, Н.К. Максимова, Е.Ю. Севастьянов, Е.В. Черников, Н. В. Сергейченко // Материалы девятой конференции “Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы IIIV”. Томск, 2006. С. 504-507.

21. Macias M. M. Gas sensor measurements during the initial action period of duty-cycling for power saving // Sensors and Actuators B. 2017. Vol. 239. P. 1003-1009.

22. Environmental Influences on SMO Sensors’ Performance / G. Jian-Wei, Q. Chen, M. Lian, N. Liu // Sensors & Transducers Magazine (S&T e-Digest). 2005. Vol.54. Is. 4. P.310-319.

23. Malykhina G., Guseva A. Application the Evolutional Modeling to the Problem of Searching the Optimal Sensors Location of Fire-Fighting System // Convergent Cognitive Information Technologies; ed. by Sukhomlin V., Zubareva E. Cham: Springer International Publishing, 2020. С. 187–199.

24. Malyshev V. V., Pislyakov A. V. Investigation of gas-sensitivity of sensor structures to carbon monoxide in a wide range of temperature, concentration and humidity of gas medium // Sens. Actuators. 2007. B. 123. P. 71-81.

25. Effect of Environmental Temperature and Humidity on Different Metal Oxide Gas Sensors at Various Gas Concentration Levels / Abdunnasser Nabil Abdullah, Kamarulzaman Kamarudin, Syed Muhammad Mamduh, Abdul Hamid Adom, Zaffry Hadi Mohd Juffry// 2nd Joint Conference on Green Engineering Technology & Applied Computing 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. P. 1-8.

26. Ronald A. J. Furnace combustion sensor test results // The United States Consumer Product Safety Commission, Washington D.C. 20207 September. 2001. P. 1-36

27. Application of a catalytic combustion sensor (Pellistor) for the monitoring of the explosiveness of a hydrogen–air mixture in the upper explosive limit range / M. Krawczyk,

J. Namiesnik // Journal of Automated Methods & Management in Chemistry. 2003. Vol. 25, No. 5. P. 115–122

28. Дрейзин В.Э., Брежнева Е.О., Бондарь О. Г. Моделирование каталитического датчика водорода // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. Ч. 1. № 5(38). С. 69-76.

29. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2 ч. Ч.2. Массообменные процессы. М.: Химия, 1995. 368 с.

30. Подтелкина О.А. Моделирование оптического сенсора // Фундаментальные и прикладные исследования: от теории к практике: материалы II международной научно-практической конференции, приуроченной ко Дню российской науки. Казань, 2018. С. 180-188.

### References

1. Brokarev I.A. [Artificial neural networks for solving the problem of analyzing the component composition of gas mixtures]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Management of Large Systems]. Moscow, IPU RAN, 2019, is. 80. pp.98-115 (In Russ.).

2. Bondar O. G., Brezhnev E. O., Chernyshov R.E. Application of Neural Networks in the Problem of Quantitative Analysis of Air Composition. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 159-174 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-159-174>.

3. Tomakova R.A., Filist SA, Yaa Z.D. Tomakova R.A. Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikatsii biomeditsinskikh dannykh [Universal network models for classification problems of biomedical data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2 (43), pp. 44-50 (In Russ.).

4. Shaposhnik A.V., Polyansky K.K., Demochko N.S., Ponomarev A.N. Kontrol' kachestva produktov s pomoshch'yu iskusstvennogo obonyaniya [Quality control of products using artificial sense of smell]. *Molochnaya promyshlennost' = Dairy Industry*, 2005, no. 8, 5354 p. (In Russ.).

5. Pouter J. Smartphone ownership and internet usage continues to climb in emerging economies. Washington, DC, USA: Pew Research Center, 2016, 44 p.

6. Chansin G., Pugh D. Environmental gas sensors 2017-2027. Cambridge, UK: CISION, 2017, 166 p.

7. Varezchnikov A.S., Sysoev V.V. [Neural network processing of vector signals of a gas analytical multisensor transducer]. *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: sbornik trudov V Mezhdunarodnoi yubileinoi nauchnoi konferentsii* [Problems of management, processing and transmission of information. Collection of works of the V International anniversary scientific conference]. Saratov, 2017, pp. 287-291 (In Russ.).

8. Krylov O.V. *Geterogennyi kataliz* [Heterogeneous catalysis]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 679 p. (In Russ.).
9. Gaev A.V., Rogotovskiy A.D., Lantsberg A.V. Klassifikatsiya fizicheskikh ob"ektov pri pomoshchi svertochnykh neuronnykh setei na primere zadachi raspoznavaniya gazov [Classification of physical objects using convolutional neural networks on the example of the problem of gas recognition]. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem = Technologies of Engineering and Information Systems*, 2019, no. 1, pp. 95-104 (In Russ.).
10. Borrego C., Costa A. M., Ginja J. [et al.]. Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 147, pp. 246-263.
11. Anisimov O.V., Maksimova N.K., Sevastianov E.Yu., Chernikov E.V. Issledovanie otklika tonkoplenochnogo sensora na osnove oksida olova v impul'snom rezhime dlya razlichnykh gazov [Investigation of the response of a thin-film sensor based on tin oxide in a pulsed mode for various gases]. *Izvestiya vuzov. Fizika = Izvestiya Vuzov. Physics*, 2006, no. 3, pp. 186-187 (In Russ.).
12. Malyshev V. V., Pislyakov A. V., Krestnikov I. F., Krutov V. A., Zaitsev S.N. Chuvstvitel'nost' poluprovodnikovyykh gazovykh sensorov k vodorodu i kislorodu v inertnoi gazovoi srede [Sensitivity of semiconductor gas sensors to hydrogen and oxygen in an inert gas environment]. *ZhAkh*, 2001, no. 9, pp. 976-983 (In Russ.).
13. Guseva A.I., Malykhina G.F., Nevelskiy A.S. Neural Network Based Algorithm for the Measurements of Fire Factors Processing. *Stud. Comput. Intell*, 2019, vol. 799, pp. 160–166.
14. George F., Cavanagh L. M., Afonja A., Binions R. Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring. *Sensors*, 2010, pp. 5469-5502.
15. Pour M. M., Lashkov A., Radocea A. [et al.] Laterally extended atomically precise graphene nanoribbons with improved electrical conductivity for efficient gas sensing. *Nature Communications*, 2017, vol. 8, 820 p.
16. Fedorov F., Vasilkov M., Lashkov A. [et al.] Toward new gas-analytical multisensor chips based on titanium oxide nanotube array. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, 9732 p.
17. Guseva A.I., Malykhina G.F., Krugleevskiy V.N., Turusov S.N. Ispol'zovanie neirosetevoi modeli obrabotki dannykh v sistemakh obnaruzheniya pozharov dlya opredeleniya mesta vozgoraniya [The use of a neural network model of data processing in fire detection systems for determining the place of fire]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 93-102 (In Russ.).
18. B^arsan N., Weimar U. Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO<sub>2</sub> sensors in the presence of humidity. *J. Phys.: Condens. Matter* 15, 2003, pp. 813–839.
19. Malykhina G., Guseva A., Militsyn A. Spatial-temporal digital twin models as a direction for the development of cross-cutting digital technologies. *Proceedings of the Inter-*

*national Scientific-Practical Conference "Business Cooperation as a Resource of Sustainable Economic Development and Investment Attraction" (ISPCBC 2019)*. Paris, France: Atlantis Press, 2019. 729 p.

20. Anisimov O.V., Gaman V.I., Maksimova N.K., Sevast'yanov E.Yu., Chernikov E.V., Sergeichenko N.V. [Influence of humidity on the properties of hydrogen sensors based on Pt / SnO<sub>2</sub>: Sb thin films in constant and pulsed heating modes]. *Materialy devyatoi konferentsii "Arsenid galliya i poluprovodnikovye soedineniya gruppy IIIV"* [Proceedings of the Ninth Conference "Gallium Arsenide and Group IIIV Semiconductor Compounds"]. Tomsk, 2006, pp. 504-507 (In Russ.).

21. Macias M. M. Gas sensor measurements during the initial action period of duty-cycling for power saving. *Sensors and Actuators B*, 2017, vol. 239, pp. 1003-1009.

22. Jian-Wei G., Chen Q., Lian M., Liu N. Environmental Influences on SMO Sensors' Performance. *Sensors & Transducers Magazine (S&T e-Digest)*, 2005, vol.54, is. 4, pp.310-319.

23. Malykhina G., Guseva A. Application the Evolutional Modeling to the Problem of Searching the Optimal Sensors Location of Fire-Fighting System. *Convergent Cognitive Information Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 187–199.

24. Malyshev V. V., Pislyakov A. V. Investigation of gas-sensitivity of sensor structures to carbon monoxide in a wide range of temperature, concentration and humidity of gas medium. *Sens. Actuators*, 2007, B. 123, pp. 71-81.

25. Abdunnasser Nabil Abdullah, Kamarulzaman Kamarudin, Syed Muhammad Mamduh, Abdul Hamid Adom, Zaffry Hadi Mohd Juffry Effect of Environmental Temperature and Humidity on Different Metal Oxide Gas Sensors at Various Gas Concentration Levels. *2nd Joint Conference on Green Engineering Technology & Applied Computing 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, pp. 1-8.

26. Ronald A. J. Furnace combustion sensor test results. *The United States Consumer Product Safety Commission*. Washington D.C. 20207 September, 2001, pp. 1-36.

27. Krawczyk M., Namiesnik J. Application of a catalytic combustion sensor (Pellistor) for the monitoring of the explosiveness of a hydrogen–air mixture in the upper explosive limit range. *Journal of Automated Methods & Management in Chemistry*, 2003, vol. 25, no. 5, pp. 115–122.

28. Dreizin V. E., Brezhnev E.O., Bondar O. G. Modelirovanie kataliticheskogo datchika vodoroda [Modeling of a catalytic hydrogen sensor]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, pt. 1, no. 5 (38), pp. 69-76 (In Russ.).

29. Dytnersky Yu.I. *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* [Processes and devices of chemical technology]. Part 2. Mass-exchange processes. Moscow, 1995. 368 p. (In Russ.).

30. Podtelkina O.A. [Modeling an optical sensor]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: ot teorii k praktike. Materialy II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [In the collection: Fundamental and applied research: from theory to practice. Materials of the II International Scientific and Practical Conference]. Kazan, 2018, pp. 180-188 (In Russ.).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Бондарь Олег Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b.og@mail.ru

**Oleg G. Bondar**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: b.og@mail.ru

**Брежнева Екатерина Олеговна**, кандидат технических наук, доцент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

**Ekaterina O. Brezhneva**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

**Добросердов Олег Гурьевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, советник при ректорате, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: serfingk@yandex.ru

**Oleg G. Dobroserdov**, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Research Associate, Adviser to the Rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: serfingk@yandex.ru

**Андреев Кирилл Геннадьевич**, студент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: skyline.ozerk@gmail.com

**Kirill G. Andreev**, Student, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: skyline.ozerk@gmail.com

**Поляков Николай Владимирович**, студент кафедры Космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nikera2016@mail.ru

**Nikolay V. Polyakov**, Student, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nikera2016@mail.ru