

Malykhin Anatoliy Yurievich – Southern Federal University; e-mail: anatoliy.malykhin@gmail.com; 10 Milchakova street, of. 103, Rostov-on-Don, 344090 Russia; phone: +79185987349; the department of information and measurement technologies; postgraduate student.

Skrylev Alexandr Vladimirovich – e-mail: ua6008swl@gmail.com; phone: +79604551144; the department of information and measurement technologies; postgraduate student.

Swirskaya Svetlana Nikolaevna – e-mail: swirskaya_49@mail.ru; phone: +79043420889; the department of general and inorganic chemistry; cand. of chem. sc.; associate professor.

Kretova Ekaterina Ivanovna – e-mail: kittenkate13@mail.ru; phone: +79889452011; the department of general and inorganic chemistry; student.

Medvedeva Ekaterina Sergeevna – e-mail: swirskaya_49@mail.ru; phone: +79044488399; the department of general and inorganic chemistry; cand. of chem. sc.; junior researcher.

Panich Anatoliy Evgenievich – Scientific and Technical Design Bureau “Piezopribor” Southern Federal University; e-mail: piezo@sfedu.ru; phone: +79185552873; dr. of eng. sc.; professor; member of Russian engineering academy; chief of the state micro- and nanotechnologies.

УДК 539.217.5:546.28

Т.В. Семенистая, В.В. Петров, А.А. Ладыгина

**ЭНЕРГОЭФЕКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ ГАЗА НА ОСНОВЕ
НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩЕГО
ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА**

Получены пленки металлсодержащего полиакрилонитрила (ПАН) в разных температурно-временных режимах термообработки с разными модифицирующими добавками (Ag, Co, Cu) методом пиролиза под действием некогерентного ИК-излучения при неглубоком вакууме по разработанной технологии. Показано, что пленки ИК-пиролизованного ПАН обладают газочувствительными свойствами и применяются в качестве чувствительного слоя энергоэффективных датчиков газов резистивного типа. Установлено, что использование разных температурно-временных режимов при формировании материала пленок металлсодержащего ПАН дает возможность управлять свойствами полученных материалов в широком диапазоне за счет изменения их структуры и состава, что открывает перспективу создания мультисенсорного устройства с чувствительным слоем на основе органического полимерного полупроводника. Выявлено, что одним из основных достоинств датчиков на основе пленок электропроводящих полисопряженных полимеров является возможность их функционирования при комнатной температуре по сравнению с неорганическими полупроводниками, а также возможность определения малых (на уровне ppm) концентраций анализируемых газов. Определены газочувствительные характеристики полученных образцов нанокompозитных пленок. Разработаны энергоэффективные датчики Cl₂, CO, NO₂, NH₃ и представлены их газочувствительные характеристики.

ИК-пиролизованный ПАН; ИК-отжиг; электропроводящие органические полимеры; нанокompозитные материалы; датчик; Cl₂; CO; NO₂; NH₃.

T.V. Semenistaya, V.V. Petrov, A.A. Ladigina

**POWER-EFFICIENT GAS SENSORS BASED ON NANOCOMPOSITE
MATERIALS METAL-CONTAINING POLYACRYLONITRIL**

The metal-containing (Ag, Co, Cu) polyacrylonitril (PAN) films have been fabricated using IR-pyrolysis under low vacuum conditions in different temperature and time modes according to the designed process. It is shown that gas-sensing IR-pyrolyzed PAN films can be applied as a sensitive layer of power-effective gas sensors of resistive type. It is established that different tem-

perature and time modes for forming the material of metal-containing PAN films give the chance to operate its properties due to its ability to change the polymer structure that find application in the spheres of creation of multisensor device with a sensitive layer based on organic polymeric semiconductor. It is revealed that the use of organic polyconjugated semiconductor polymers in gas sensors has such advantages as its low working temperatures (close to room temperature) in comparison with inorganic semiconductors and the ability to define small (at the ppm-level) concentration of analyzed gases. Gas-sensing characteristics of the nanocomposite films samples have been defined. Power-efficient sensor to Cl₂, CO, NO₂, NH₃ have been worked out and its gas-sensing characteristics have been presented.

IR-pyrolized PAN; IR-pyrolize; electroconductive organic polymers; nanocomposite materials; sensor; Cl₂; CO; NO₂; NH₃.

Органические полимерные материалы обладают рядом важных для электроники свойств. Они имеют малый удельный вес, легко обрабатываются и химически инертны. Большинство полимеров являются изоляторами, поэтому их широко используют в качестве диэлектриков и изоляционных материалов. В последние годы возрос интерес к электропроводящим полимерам, которые являются новым перспективным материалом для создания функциональных элементов электроники [1–3].

В последнее время возрастает интерес к изучению свойств нанокompозитных полимерных материалов, состоящих из органических макромолекул, электропроводящие свойства которых достигаются за счет изменения их химической структуры и строения. Общим свойством структуры проводящих полимеров является полисопряжение π-связей основной цепи макромолекулы, что обеспечивает проводимость [4]. Органические полимеры с системой сопряженных двойных связей вдоль цепи макромолекул характеризуются не только повышенной электрической проводимостью, но и высокой газочувствительностью [2].

Датчики газов на основе органических полупроводниковых полимеров имеют такие преимущества, как: возможность определения малых (на уровне ppm) концентраций анализируемых газов и управления свойствами органических полупроводников в широком диапазоне за счет изменения их структуры и состава; высокая чувствительность; селективность к газам; быстрое воздействие; низкие рабочие температуры (близкие к комнатной), при этом они просты в изготовлении, а значит, экономически эффективны.

В данной работе использованы нанокompозитные пленки металлсодержащего ИК-пиролизованного полиакрилонитрила (ПАН) в качестве чувствительного слоя датчиков Cl₂, CO, NO₂, NH₃, полученные методом пиролиза под действием некогерентного ИК-облучения в неглубоком вакууме [5]. Существует множество методов получения композитных органических электропроводящих полимерных наноматериалов [2]. Одним из эффективных методов получения таких материалов является метод карбонизации полимерных углеводородов (так называемый метод получения пирополимеров), поскольку дает хорошие результаты, позволяет получать материалы с заданными свойствами и не требует сложных технологий и высокотехнологичного оборудования.

Газочувствительный материал формировали в виде нанокompозитных пленок, полученных из плёнкообразующих растворов ПАН и модифицирующей добавки солей переходных металлов (Cu, Ag, Co) в диметилформамиде (ДМФА), которые после охлаждения образуют гель, что решает проблему равномерного распределения наночастиц модифицирующей добавки в плёнкообразующей матрице и сохранения их размеров в нанометровом диапазоне. С целью повышения

селективности и адсорбционной активности сенсора проводят модифицирование полупроводниковых материалов переходными металлами. Считается, что атомы металлов, располагаясь между цепями макромолекул и сеток, способствуют передаче электронов между ними.

Полученные пленкообразующие растворы наносили на диэлектрические подложки из поликора методом центрифугирования. Часть образцов сушили в термощкафу на воздухе при температуре 160 °С в течение 30 минут. С целью разработки технологии получения газочувствительного материала на основе ПАН для изготовления газочувствительных элементов осуществлен выбор метода формирования материала, его состава и проведено математическое моделирование процесса формирования полимерной структуры ПАН с применением квантово-химических расчетов и метода Монте-Карло [5]. В результате математического эксперимента установлено, что оптимальным режимом сушки пленок ПАН является температура 160 °С, при которой наблюдается формирование полимерной цепи с максимальным количеством звеньев мономера ПАН, что является необходимым для формирования продолжительных участков полисопряжения полимерной матрицы при термолизе с целью получения электропроводящего материала.

ИК-отжиг образцов пленок Ag-, Cu- и Co-содержащего ПАН проводили при разной продолжительности и температуре на каждом этапе при невысоком вакууме ($5-10 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.). Оптимальные технологические параметры формирования материала пленки, которые обеспечивают получение образцов с наилучшими газочувствительными характеристиками, были подобраны экспериментальным путем. Концентрацию модифицирующей добавки в пленкообразующем растворе варьировали от 0,25 до 3,0 масс. %. Температура излучения на первом этапе ИК-отжига соответствовала 250–350 °С в течение 5–20 мин, а температура излучения на втором этапе ИК-отжига – 350–500 °С в течение 2–10 мин.

Датчики газа на основе Ag-, Co- и Cu-содержащего ПАН состоят из подложки с нанесенным чувствительным слоем, поверх которых формируются контакты и выводы. Подложка монтируется в корпус. Крышка корпуса имеет отверстия для прохода газа.

Технология изготовления таких датчиков состоит из следующих этапов:

- ◆ приготовление пленкообразующего раствора для получения пленок металлсодержащего ПАН;
- ◆ подготовка подложек для нанесения пленкообразующего раствора;
- ◆ нанесение пленкообразующего раствора на подложку;
- ◆ сушка пленок металлсодержащего ПАН;
- ◆ термообработка пленок методом пиролиза под действием некогерентного ИК-облучения в неглубоком вакууме;
- ◆ формирование контактных площадок и выводов на поверхности образцов сенсорных элементов на основе металлсодержащего ИК-пиролизованного ПАН;
- ◆ монтаж сенсорных элементов в корпус;
- ◆ разводка выводов;
- ◆ монтаж крышки корпуса.

Проводимость сенсорных элементов находится под влиянием различных факторов: температуры, освещения, влажности, присутствия различных газов. Учитывая это, проведены исследования по определению основных газочувствительных характеристик полученных датчиков газа [6].

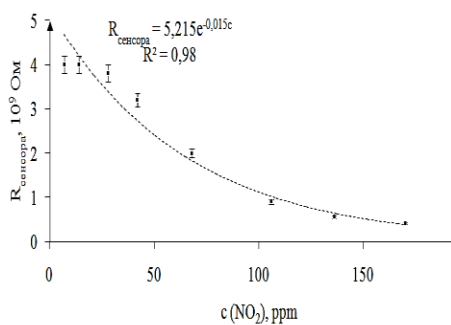
При проведении лабораторных испытаний учитывают рабочий диапазон датчиков, их рабочие температуры, устойчивость к изменению атмосферных факторов (влажность), проверяют долговременную стабильность и воспроизводимость их характеристик и выходного сигнала. Измерения проводили при различных концентрациях анализируемого газа.

При проведении лабораторных испытаний экспериментальных образцов датчиков газов на основе металлосодержащего ИК-пиролизованного ПАН оценивали следующие характеристики:

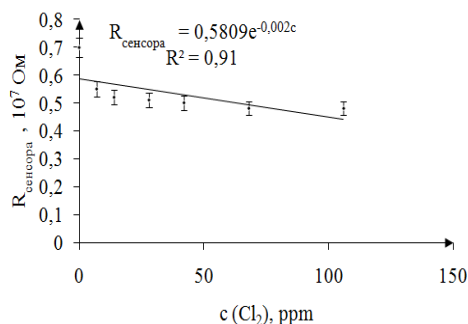
- ◆ определение времени отклика датчика;
- ◆ определение времени восстановления датчика;
- ◆ определение зависимости сопротивления чувствительного слоя датчика от концентрации газа;
- ◆ проверка воспроизводимости характеристик датчика газа;
- ◆ проверка стабильности датчика.

Для калибровки датчиков их подвергали воздействию анализируемых газов (NO_2 , Cl_2 , CO , NH_3) четырех объемных долей в ПГС, равномерно распределенных во всем диапазоне измерений датчика, начиная с наименьшей и заканчивая наибольшей из выбранных объемных долей. Данное испытание проводили три раза подряд при рабочей температуре $22\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1).

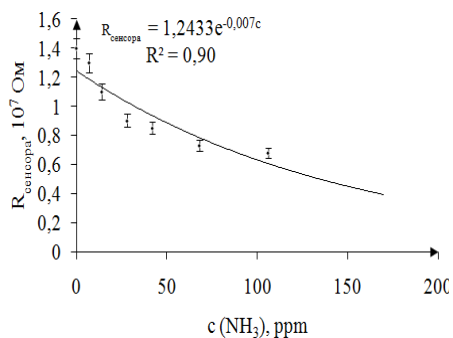
Из рис. 1 видно, что зависимость сопротивления датчиков на основе пленок Со-, Си- и Ag-содержащего ПАН от концентрации детектируемых газов для NO_2 , Cl_2 и NH_3 описывается экспоненциальной зависимостью с величиной коэффициента корреляции не хуже 0,9. Для CO наблюдается линейная зависимость с величиной корреляции 0,94.



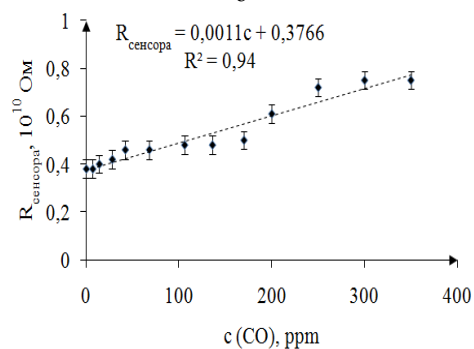
а



б



в



г

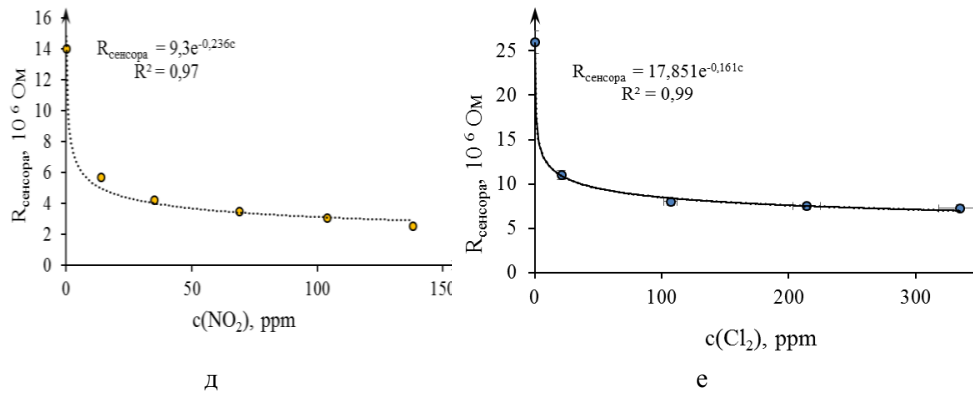
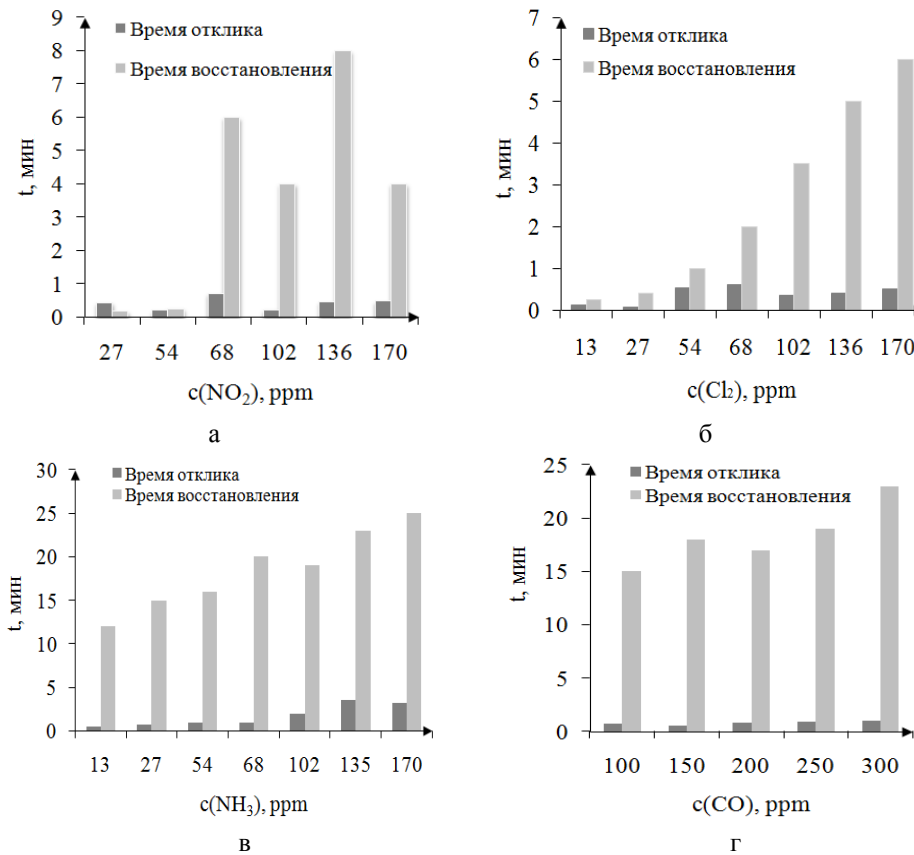


Рис. 1. Зависимость сопротивления сенсорных элементов ($R_{\text{сенсоров}}$) при температуре 22 °С от концентрации детектируемого газа: а – NO_2 ; б – Cl_2 ; в – NH_3 ; г – CO ; д – NO_2 ; е – Cl_2

Для определения времени отклика и времени восстановления датчики помещали в камеру для испытаний калибровочного стенда. На вход в течение одной минуты подавали чистый воздух, затем в течение одной мин – ПГС пяти различных концентраций. Измеряли время отклика и время восстановления датчиков (рис. 2).



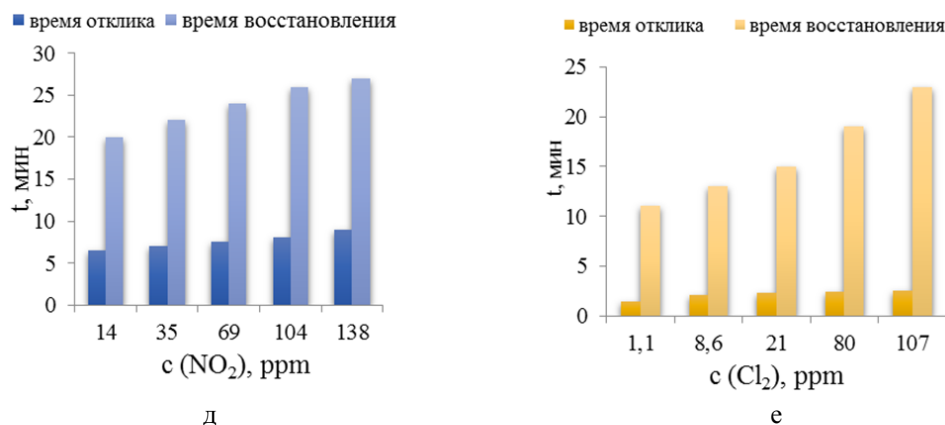


Рис. 2. Зависимость времени отклика и времени восстановления датчиков при рабочей температуре 22 °С от концентрации детектируемого газа: а – NO₂; б – Cl₂; в – NH₃; г – CO; д – NO₂; е – Cl₂

Установлено, что время восстановления сенсорного элемента с повышением концентрации детектируемого газа увеличивается.

Для определения рабочей температуры датчиков проводили исследования влияния температуры нагрева сенсорного элемента на коэффициент газочувствительности, что представлено на рис. 3 для датчика Cl₂ и NO₂ на основе пленок Ag-содержащего ПАН в диапазоне температуры 20–50 °С.

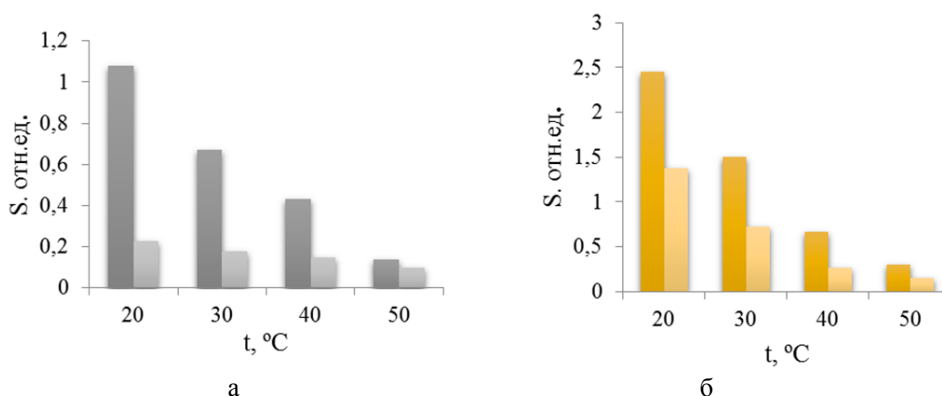


Рис. 3. Зависимость коэффициента газочувствительности датчиков от рабочей температуры: а – при $c(\text{NO}_2) = 69 \text{ ppm}$; б – при $c(\text{Cl}_2) = 11 \text{ ppm}$

Из гистограмм видно, что наилучшая рабочая температура датчиков составляет $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, т.е. при комнатной температуре.

Исследования влияния влажности воздуха на величину газочувствительности датчика показали, что в диапазоне реальных значений влажности воздуха от 43 до 85 % не происходит существенного изменения значений коэффициента газочувствительности (рис. 4).

Для проверки стабильности измеряемых величин датчиков от времени эксплуатации измеряли сопротивление сенсорных элементов в течение 200 дней. Датчик помещали в камеру для испытаний калибровочного стенда. Показания сопротивлений снимали в чистом воздухе. В результате проведенных испытаний для

датчиков на основе газочувствительных пленок металлсодержащего ИК-пиролизованного ПАН, сформированных в разных температурно-временных режимах ИК-отжига, установлено, что дрейф сопротивления за время эксплуатации составляет от 7,4 до 33 %. Коэффициент корреляции составляет $\bar{R}^2 = 0,71$. Пример зависимостей значений сопротивления сенсорных элементов с чувствительным слоем пленок Со-содержащего ПАН ($\omega(\text{Со})=0,5$ масс. %), сформированных при разных температурно-временных режимах ИК-отжига (1 – $T_1 = 250$ °С, $t_1=20$ мин, $T_2=450$ °С, $t_2 = 10$ мин, $\omega(\text{Со})=0,5$ масс. %; 2 – $T_1 = 300$ °С, $t_1 = 5$ мин, $T_2=450$ °С, $t_2 = 10$ мин, $\omega(\text{Со})=0,25$ масс. %; 3 – $T_1 = 300$ °С, $t_1 = 20$ мин, $T_2=450$ °С, $t_2 = 5$ мин), от времени эксплуатации датчика представлен на рис. 5.

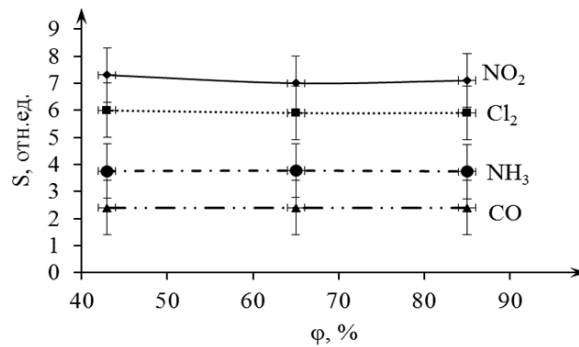


Рис. 4. Зависимость коэффициента газочувствительности датчиков от влажности воздуха

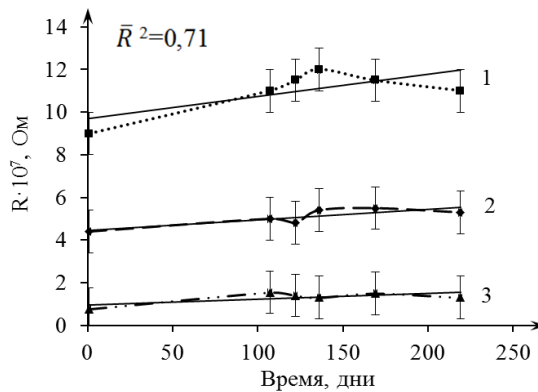


Рис. 5. Зависимость значений сопротивления сенсорных элементов от времени эксплуатации

С целью доказательства воспроизводимости параметров сенсорных элементов [7], сформированных в одинаковых технологических режимах, изготавливали по 10 образцов пленок металлсодержащего ИК-пиролизованного ПАН, после проведения измерений чувствительности на детектируемые газы оценивали разброс значений коэффициента газочувствительности. В качестве примера демонстрации воспроизводимости параметров приведены данные для пленок Со-содержащего ПАН (табл. 1).

Таблица 1

Воспроизводимость газочувствительности пленок Со-содержащего ПАН

ω (Со), масс. %	T_1 , °С – t_1 , мин	T_2 , °С – t_2 , мин	S, отн.ед., $c(\text{NO}_2) = 69 \text{ ppm}$	S, отн.ед., $c(\text{Cl}_2) = 69 \text{ ppm}$
0,25	250 – 5	350 – 2	$16 \pm 2,0$	$2,5 \pm 0,6$
<i>I</i>	250 – 20	350 – 2	$16,4 \pm 1,4$	$9,3 \pm 0,4$
0,75	300 – 15	350 – 10	$16,1 \pm 1,7$	$14,7 \pm 2,0$
<i>I</i>	300 – 20	350 – 10	$14,7 \pm 2,3$	$10,1 \pm 1,2$

Примечание: *I* – образцы, предварительно прошедшие сушку в термощкафу

Как видно из табл. 1, отклонение значений коэффициента газочувствительности из серии образцов в среднем составляет к диоксиду азота 11 %, к хлору – 13 %.

На рис. 6 представлены результаты оценки стабильности чувствительности датчиков NO_2 на основе Со-содержащего ПАН в течение 200 дней эксплуатации. Пленки Со-содержащего ИК-пиролизованного ПАН сформированы при следующих технологических режимах: 1 – ω (Со) = 0,25 масс. %, $T_1 = 350$ °С, $t_1 = 15$ мин, $T_2 = 350$ °С, $t_2 = 5$ мин; 2 – ω (Со) = 1 масс. %, $T_1 = 300$ °С, $t_1 = 20$ мин, $T_2 = 350$ °С, $t_2 = 5$ мин; 3 – ω (Со) = 0,75 масс. %, $T_1 = 300$ °С, $t_1 = 15$ мин, $T_2 = 350$ °С, $t_2 = 10$ мин; 4 – ω (Со) = 0,25 масс. %, $T_1 = 300$ °С, $t_1 = 5$ мин, $T_2 = 450$ °С, $t_2 = 10$ мин.

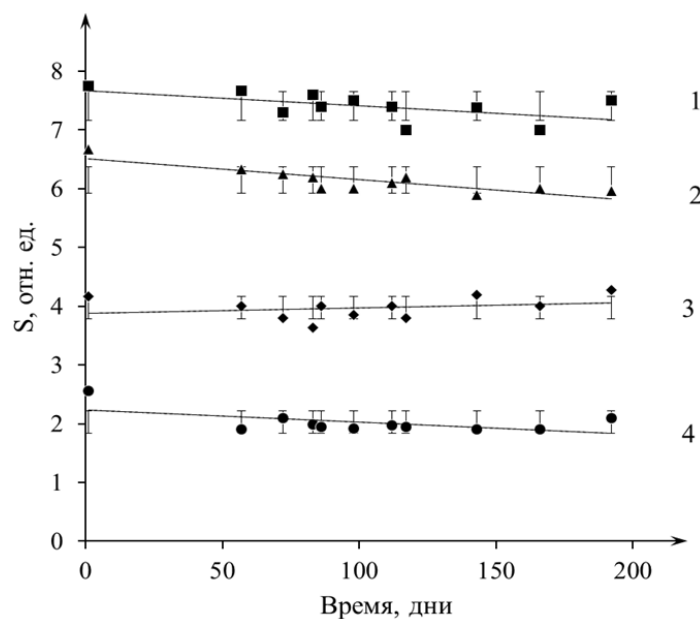


Рис. 6. Зависимость коэффициента газочувствительности датчиков к NO_2 от времени эксплуатации

Дрейф коэффициента газочувствительности за 200 дней для выбранных образцов равен: 1–6,6 %; 2–4,9 %, 3–8,7 %; 4–23 %.

Таким образом, получены датчики Cl_2 , CO , NO_2 , NH_3 с чувствительным слоем на основе нанокompозитных пленок металлосодержащего ИК-пиролизованного ПАН, характеристики которых представлены в табл. 2–5.

Таблица 2

**Газочувствительные характеристики датчика Cl₂
(на основе Ag-содержащего ПАН)**

Параметр	Исследуемый датчик Cl ₂	Датчик Cl ₂	
		на основе органических материалов	на основе неорганических материалов [8]
Предел обнаружения, ppm	0,07	Отсутствует	0,1
Динамический диапазон, ppm	0,07–21		0–20
Рабочая температура, °C	200–40		20–50
Время отклика t _{откл.} , мин	2		<1,5 мин
Время восстановления t _{восст.} , мин	6		–
Коэффициент газочувствительности S, отн. ед.	2,73 (21 ppm)		–
Габаритные размеры, мм ²	10×13		–

Таблица 3

**Газочувствительные характеристики датчика NO₂
(на основе Со-содержащего ПАН)**

Параметр	Исследуемый датчик NO ₂	Известные датчики NO ₂		
		[9]	[10]	[11]
Предел обнаружения, ppm	7	7	30–36	–
Динамический диапазон, ppm	7–170	7–138	36,5–255	–
Рабочая температура, °C	16–32	20–40	20–35	
Время отклика t _{откл.} , мин	1,67	6,30	4	
Время восстановления t _{восст.} , мин	7	26	20	
Коэффициент газочувствительности S, отн. ед.	13,00 (68 ppm)	0,82 (38 ppm)	0,37 (146 ppm)	4,6 (65 ppm)
Габаритные размеры, мм ²	8x8	10x13	10x13	–

Таблица 4

**Газочувствительные характеристики датчика CO
(на основе Со-содержащего ПАН)**

Параметр	Исследуемый датчик CO	Известные датчики CO		
		[12]	[13]	[14]
Предел обнаружения, ppm	15	0,2	–	–
Динамический диапазон, ppm	15–250	0–20	–	–
Рабочая температура, °C	16–32	– 10...+50	120 – 170	300
Время отклика t _{откл.} , мин	0,70	1–3	–	25–90
Время восстановления t _{восст.} , мин	12	–	–	–
Коэффициент газочувствительности S, отн. ед.	2,40 (250 ppm)	–	1,76 (670 ppm)	1,6 (1000 ppm)
Габаритные размеры, мм ²	8x8	8x14	–	

Таблица 5

**Газочувствительные характеристики датчика NH₃
(на основе Си-содержащего ПАН)**

Параметр	Исследуемый датчик NH ₃	Известные датчики NH ₃		
		[10]	[15]	[16, 17]
Предел обнаружения, ppm	7	–	–	–
Динамический диапазон, ppm	7–170	73–146	–	–
Рабочая температура, °C	16–32	22–35	100	200
Время отклика t _{откл.} , мин	1,5	–	120	16
Время восстановления t _{восст.} , мин	12	–	68	25
Коэффициент газочувствительности S, отн. ед.	5,00 (68 ppm)	0,11 (146 ppm)	19 (800 ppm)	6 (300 ppm)
Габаритные размеры, мм ²	8x8	–		

Установлено, что датчик хлора с чувствительным слоем на основе органических материалов разработан впервые. Достоинством разработанного датчика на основе Ag-содержащего ПАН является более высокий предел обнаружения и более низкие рабочие температуры по сравнению с характеристиками известного датчика.

Установлено, что датчик на основе Со-содержащего ПАН обладает более высоким коэффициентом газочувствительности к диоксиду азота (в 14 раз), меньшим временем отклика (примерно в 3 раза) и временем восстановления (в среднем в 3 раза) по сравнению с характеристиками известных датчиков.

Установлено, что датчик монооксида углерода на основе Со-содержащего ПАН обладает большим динамическим диапазоном и меньшим временем отклика (примерно в 2,5 раза) по сравнению с известными.

Установлено, что датчик на основе Си-содержащего ПАН обладает более высоким коэффициентом газочувствительности к аммиаку при меньшей концентрации по сравнению с известными.

Разработанные датчики могут применяться в системах климат-контроля автомобилей различного назначения, системах жизнеобеспечения сложных технических объектов, экологическом мониторинге.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Semenistaya T.V., Petrov V.V., Lu P.* Nanocomposite of Ag-polyacrylonitrile as a selective chlorine sensor // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 804. – P. 135-140.
2. *Семенистая Т.В., Петров В.В., Бедная Т.А.* Энергоэффективные сенсоры газов на основе нанокompозитных органических полупроводников. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 120 с.
3. *Lange U., Roznyatovskaya N.V., Mirsky V.M.* Conducting polymers in chemical sensors and arrays // *Analytica Chimica Acta*. – 2008. – Vol. 614. – P. 1-26.
4. *Королев А.Н., Семенистая Т.В., Аль-Хадрами И.С., Логинова Т.П., Брунс М.* Нанокompозитные пленки медьсодержащего полиакрилонитрила: состав, структура, морфология поверхности // *Перспективные материалы*. – 2010. – № 5. – С. 52-56.
5. *Фалчари М.М., Семенистая Т.В., Плуготаренко Н.К., Лу П.* Разработка технологии получения газочувствительного материала на основе ПАН с применением квантово-химических расчетов и метода Монте-Карло // *Нано- и микросистемная техника*. – 2013. – № 8. – С. 34-40.

6. *Дорожкин Л.М., Розанов И.А.* Химические сенсоры в диагностике окружающей среды // Сенсор. – 2001. – № 2. – С. 2-9.
7. *Бодягин Н.В., Вихров С.П., Мурсалов С.М., Тарасов И.В.* К природе невоспроизводимости структуры и свойств твердотельных материалов // Микроэлектроника. – 2002. – Т. 31, № 4. – С. 307-313.
8. Средства измерений XXI века. Современные измерительные приборы от ведущих мировых производителей. [Электронный ресурс]. URL: [http://susceptibility.ru/content/sensor – khloro – cl2s – 20 – membrapor](http://susceptibility.ru/content/sensor-khloro-cl2s-20-membrapor) (дата обращения 25.09.2011.).
9. *Лу П., Горбатенко Ю.А., Семенистая Т.В., Воробьев Е.В., Королев А.Н.* Получение чувствительных элементов сенсоров газов на основе пленок полиакрилонитрила и серебро-содержащего полиакрилонитрила и определение их характеристик // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 9. – С. 5-12.
10. *Аль-Хадрами И.С., Королев А.Н., Семенистая Т.В., Назарова Т.Н., Петров В.В.* Исследование газочувствительных свойств медьсодержащего полиакрилонитрила // Известия вузов. Электроника. – 2008. – № 1. – С. 20-25.
11. *Макеева Е.А.* Гибридные материалы на основе диоксида олова для химических сенсоров: Дис. ... канд. хим. наук. – М., 2011.
12. *Вершинин Н.Н., Алейников Н.Н., Ефимов О.Н., Гусев А.Л.* Газовые сенсоры СО на основе наноматериалов и твердых электролитов // Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – № 8. – С. 10-16.
13. *Сарач О.Б.* Создание газовых сенсоров на основе тонких пленок диоксида олова: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2003.
14. *Liewhiran C., Tamackong N., Wisitsoraat A., Phanichphant S.* Highly selective environmental sensors based on flame-spray-made SnO₂ nanoparticles // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2012. – Vol. 165 (1). – P. 110-118.
15. *Rout C.S., Hegde M., Govindaraj A., Rao C.N.R.* Ammonia sensors based on metal oxide nanostructures // Nanotechnology. – 2007. – Vol. 18 (20). Article ID 205504.
16. *Thong L.V., Hoa N.D., Le D.T.T., Viet D.T., Tam P.D., Le A.-T., Hieu N.V.* On-chip fabrication of SnO₂ – nanowire gas sensor: The effect of growth time on sensor performance // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2010. – Vol. 146 (1). – P. 361 – 367.
17. *Thong L.V., L.T.N., Hieu N.V.* Comparative study of gas sensor performance of SnO₂ nanowires and their hierarchical nanostructures // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2010. – Vol. 150 (1). – P. 115-119.

Статью рекомендовал к опубликованию д.х.н., профессор Т.Б. Бойцова.

Семенистая Татьяна Валерьевна – Южный федеральный университет; e-mail: semenistaya@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: 89185804422; кафедра химии и экологии; к.х.н.; доцент.

Петров Виктор Владимирович – e-mail: vvpetrov@sfedu.ru; тел.: 88634371635; проректор по инженерному образованию ЮФУ; д.т.н.

Ладыгина Анастасия Александровна – кафедра химии и экологии; студентка.

Semenistaya Tatiana Valerievna – Southern Federal University; e-mail: semenistaya@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371635; the department of chemistry and ecology; cand. of chem. sc.; associate professor.

Petrov Victor Vladimirovich – e-mail: vvpetrov@sfedu.ru; phone: +78634371635; Vice-Rector for Engineering Education SFU; dr. of eng. sc.

Ladigina Anastasia Alexandrovna – the department of chemistry and ecology; student.