

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Замбург Е.Г., Вакулов Д.Е., Вакулов З.Е., Ивонин М.Н., Шумов А.В.* Получение прозрачных проводящих нанокристаллических пленок оксида цинка методом импульсного лазерного осаждения // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – С. 373-376.
2. *Ageev O.A., Zamburg E.G., Mikhailichenko A.V., Ptashnik V.V.* Temperature effect on the electrical properties of nanostructured ZnO and VOx films // *Proc. of «Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy» Symposium and Summer School, Moscow – Zelenograd, Russia, September 12–16*. – 2011. – P. 202.
3. *May-Smith T.C.* Pulsed laser deposition of thick multilayer garnet crystal films for waveguide laser devices. University of Southampton press, 2005. – 212 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.А. Рындин.

**Агеев Олег Алексеевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371611; кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; профессор.

**Замбург Евгений Геннадьевич** – e-mail: zamburg@gmail.com; кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

**Вакулов Даниил Евгеньевич** – e-mail: daniel.vakulov@gmail.com; кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; студент.

**Вакулов Захар Евгеньевич** – e-mail: zakhar.vakulov@gmail.com; кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; студент.

**Ageev Oleg Alekseevich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru; 2, Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371611; the department of micro- and nanoelectronics; professor.

**Zamburg Evgeniy Genad'evich** – e-mail: zamburg@gmail.com; the department of micro- and nanoelectronics; postgraduate student.

**Vakulov Daniel Evgen'evich** – e-mail: daniel.vakulov@gmail.com; the department of micro- and nanoelectronics; student.

**Vakulov Zakhar Evgen'evich** – e-mail: zakhar.vakulov@gmail.com; the department of micro- and nanoelectronics; student.

УДК 621.315.592:539.213:539.217.5:541.64

**Т.А. Бедная, Т.В. Семенистая, В.В. Петров**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ ИК-ПИРОЛИЗОВАННОГО ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА  
С РАЗЛИЧНЫМИ МОДИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ**

*Изучена взаимосвязь физико-химических свойств пленок ИК-пиролизованного полиакрилонитрила (ПАН) с модифицирующими добавками в виде солей кобальта (II), серебра (I) и меди (II) с технологическими параметрами процесса формирования композитного полимерного материала методами регрессионного анализа и построения искусственных нейронных сетей. Базу данных составило 200 образцов пленок металлосодержащего ПАН, полученных методом пиролиза под воздействием ИК-излучения в неглубоком вакууме. Построены модели множественной линейной регрессии для прогноза значений сопротивления полученных пленок. Синтезированы нейронные сети для прогнозирования значений коэф-*

фициента газочувствительности пленок кобальт-, серебро- и медьсодержащего ПАН с коэффициентами корреляции  $R_1 = 0,925$ ;  $R_2 = 0,97$  и  $R_3 = 0,86$  соответственно. Предложенные нейронные сети могут быть использованы как новый метод моделирования физико-химических свойств материалов на основе ИК-пиролизованного ПАН.

ИК-пиролизированный полиакрилонитрил; ИК-отжиг; электропроводящие органические полимеры; нейронная сеть; регрессионный анализ; газочувствительные материалы.

**T.A. Bednaya, T.V. Semenistaya, V.V. Petrov**

### **DESIGN OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF MATERIAL BASED ON IR-PYROLIZED PAN WITH VARIOUS MODIFIED ADDITIVES USING REGRESSION AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK METHODS**

*The relationship between physico-chemical properties and technological parameters of fabrication of polymeric nanocomposite IR-pyrolized polyacrylonitrile (PAN) films with cobalt (II), argentum (I) and copper (II) salts additives has been studied using regression and artificial neural network methods. The database for this study consisted of 200 samples of metal containing PAN films fabricated pyrolysis method under the influence of incoherent IR-radiation under low vacuum conditions. The multivariable regression models for films resistance values prediction have been designed. The neural networks for the prediction of sensitivity values of cobalt-, argentum- and copper containing PAN films have the correlation coefficients  $R_1 = 0,925$ ;  $R_2 = 0,97$  и  $R_3 = 0,86$  correspondingly. The proposed neural networks could be applied as a new method for design of physico-chemical properties of material based on IR-pyrolized PAN.*

*IR-pyrolized polyacrylonitrile; IR-pyrolysis; electroconductive organic polymers; neural network; regression analysis; gas-sensing materials.*

ИК-пиролизированный полиакрилонитрил (ПАН) обладает уникальными физико-химическими свойствами, которые могут сильно изменяться в зависимости от состава, способа формирования химической структуры полимера и выбора модифицирующих добавок. Полимер перспективен для применения в оптоэлектронике, в качестве сенсоров, биосенсоров с высокой селективностью и эффективностью, в микро- и нанoeлектронике, вакуумной электронике для создания дисплеев. ИК-пиролизированный ПАН обладает наиболее стабильными среди органических полупроводников электрофизическими свойствами (в диапазоне от  $-100$  до  $600$  °C) и получается с помощью дешевого способа под действием ИК-облучения.

Материалы на основе нанокompозита  $\text{FeNi}_3/\text{C}$  (на основе ПАН,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) перспективны для изготовления эффективных электромагнитных экранов и использованы в работе [1] в качестве дисперсного компонента электромагнитного экрана и катализатора для роста углеродных нанотрубок. Синтез наночастиц  $\text{FeNi}_3$  под действием ИК нагрева ПАН модифицирует свойства углеродного материала и создает возможность синтезировать нанокompозит  $\text{FeNi}_3/\text{C}$  с контролируемыми электрофизическими и магнитными свойствами.

Нанокompозиты на основе ИК-пиролизованного ПАН и соединений Fe, Co, Gd перспективны для получения магнитных нанопорошков, контрастных материалов для магниторезонансной томографии [2].

Тонкие (25–50 мкм) двухслойные композиционные мембраны на основе пористых полиэтиленовых пленок и ПАН перспективны для использования в составе компактных элементов ультрафильтрации для водоподготовки, биотехнологии и регенерации отработанных растворов [3].

Углеродный нанокристаллический материал на основе термообработанного ПАН и композитов Me/C (где Me – Cu, Fe, Co) использован для получения материала pH-электрода с повышенной электропроводностью ( $\sigma = 102$  См/см), что позволило создать электрод с повышенной помехоустойчивостью к электростатическим полям [4].

Модифицированные гибридными системами ПАН волокна обеспечивают получение полиакрилонитрильных волокон с пониженной пожарной опасностью и требуемыми эксплуатационными свойствами для текстильного и технического назначения [5].

Горючесть ПАН сополимера обусловлена выделением при термоокислительной деструкции горючих продуктов (пропилен, цианистый водород, акрилонитрил и др.), образующихся в результате отщепления атомов и групп, образующих основную цепь макромолекул и внутримолекулярной перестройки. При этом в молекулярной цепи формируются циклические структуры, образующие при горении карбонизованный остаток. В связи с этим, для снижения горючести ПАН сополимера необходимо инициировать процессы циклизации, обеспечивая снижение выхода летучих горючих продуктов в газах пиролиза [5].

В данной работе для создания чувствительных слоев сенсоров газа на основе пленок металлосодержащего ПАН использовали метод пиролиза под воздействием ИК-излучения в неглубоком вакууме [6]. ИК-отжиг образцов проводили в два этапа: термостабилизация при более низкой температуре и образование  $-C=N-$  и  $-C=C-$  связей с образованием полисопряженной цепи полимера при более высокой температуре [2, 4]. Интенсивность излучения на первом этапе ИК-отжига соответствовала температурам 250 °С, 300 °С и 350 °С, а интенсивность излучения на втором этапе ИК-отжига – 250÷500 °С. Время воздействия ИК-излучения при каждой температуре варьировали (2÷20 мин). Для повышения избирательности и адсорбционной активности ПАН использованы соли серебра (I), меди (II) и кобальта (II) в качестве модифицирующих добавок [7].

Разработка новых полимерных материалов, обладающих заданными свойствами, является перспективным направлением исследований в электронной технике и технологии. Для предсказания свойств используются различные методы, одним из которых является нейросетевое моделирование.

Материалы на основе ПАН с различными модифицирующими добавками являются основой для создания эффективных низкотемпературных сенсоров газов. Варьирование параметров технологии изготовления пленок на основе таких материалов может существенно изменить их свойства.

Чувствительность пленок к диоксиду азота определяли при температуре 20 °С и оценивали с помощью коэффициента газочувствительности  $S$ , который рассчитывается как:

$$S = (R_0 - R_g)/R_0, \text{ при } R_0 > R_g,$$

где  $R_0$  – значение сопротивления плёнки на воздухе,  $R_g$  – значение сопротивления пленки в атмосфере детектируемого газа.

В зависимости от интенсивности и продолжительности воздействия ИК-излучения на материал пленок ПАН получали структуры с различными значениями электропроводности, поэтому с целью сокращения экспериментальных исследований по выбору оптимальных технологических параметров получения пленок с наилучшими чувствительными характеристиками возникает потребность в повышении оперативности управления процесса формирования полимерного материала пленок с заданной химической структурой, которая управляется за счет варьирования температурно-временных условий ИК-пиролиза и количественного содержания модифицирующей добавки в пленкообразующих растворах.

Прогноз значений сопротивления полученных образцов пленок кобальт-, серебро- и медьсодержащего ПАН по технологическим параметрам их получения осуществлен с помощью регрессионной модели и нейронных сетей.

По экспериментальным данным построены регрессионные уравнения, в качестве дескрипторов выбраны технологические параметры (температура и время первого и второго ИК-отжигов, массовая доля содержания металла в составе плё-

нок ПАН). Метод МНК использовали для обработки экспериментальных данных для установления зависимости между сопротивлением и технологическими параметрами формирования материала на основе плёнок металлсодержащего ПАН. Расчёт методом МНК был реализован при помощи пакета программ Maple 12. Регрессионные модели обозначили следующим образом: для прогнозирования значений сопротивления пленок кобальтсодержащего ПАН – P1, серебросодержащего ПАН – P2 и медьсодержащего ПАН – P3.

Количественные соотношения представлены в виде регрессионных уравнений (2)–(4):

$$P1: \ln R = -3,89 \ln T_1 + 0,19 \ln t_1 - 34 \ln T_2 - 1,66 \ln T_2 - 1,89 \omega + 247 \quad (2)$$

$$P2: \ln R = 0,51 \ln T_1 - 0,09 \ln t_1 - 26 \ln T_2 - 0,67 \ln T_2 - 2,43 \omega + 172,28 \quad (3)$$

$$P3: \ln R = -2,31 \ln T_1 - 0,09 \ln t_1 - 32 \ln T_2 - 1,37 \ln T_2 + 3,05 \omega + 223, \quad (4)$$

где  $T_1, T_2$  – интенсивность первого и второго этапа ИК-отжига соответственно, °С;  $t_1, t_2$  – время воздействия ИК-излучения на первом и втором этапе ИК-отжига соответственно, мин;  $\omega$  – массовая доля содержания металла в составе пленки, мас. %.

Построенные регрессионные модели статистически обработаны (табл. 1). Коэффициент детерминации описывает связь между зависимой и независимыми переменными модели для прогнозирования значений сопротивления пленок металлсодержащего ПАН и содержит информацию о том, насколько хорошо модель подходит под исходные данные, имеет достаточно высокие значения и не объясняет 13–23 % установленных зависимостей. Критерий Фишера по специальным таблицам оценивает вероятность того, что между предсказываемым объектом и дескрипторами имеется статистическая связь. Высокое значение критерия Фишера показывает наличие данной связи.

Таблица 1

**Статистическая обработка построенных регрессионных моделей  
для прогнозирования значений сопротивления пленок кобальт-, серебро-  
и медьсодержащего ПАН**

	P1	P2	P3
Коэффициент корреляции	0,93	0,88	0,87
Коэффициент детерминации	0,87	0,775	0,77
Критерий Фишера	140	12,4	17
Количество уравнений	146	24	32

Результаты статистической обработки указывают на высокое соответствие между моделью и описываемой ею реальной системой и позволяют утверждать адекватность построенных регрессионных моделей.

Составлены уравнения корреляционных зависимостей (5)–(7) между расчётными и экспериментальными значениями сопротивлений полученных пленок:

$$P1: \ln R_{\text{расчёт}} = 0,84 \ln R_{\text{эксперимент}} + 2,6 \quad (5)$$

$$P2: \ln R_{\text{расчёт}} = 0,775 \ln R_{\text{эксперимент}} + 3,248 \quad (6)$$

$$P3: \ln R_{\text{расчёт}} = 0,762 \ln R_{\text{эксперимент}} + 5,133 \quad (7)$$

На рис. 1 представлена зависимость между расчетными и экспериментальными значениями сопротивлений пленок кобальт-, серебро- и медьсодержащего ПАН.

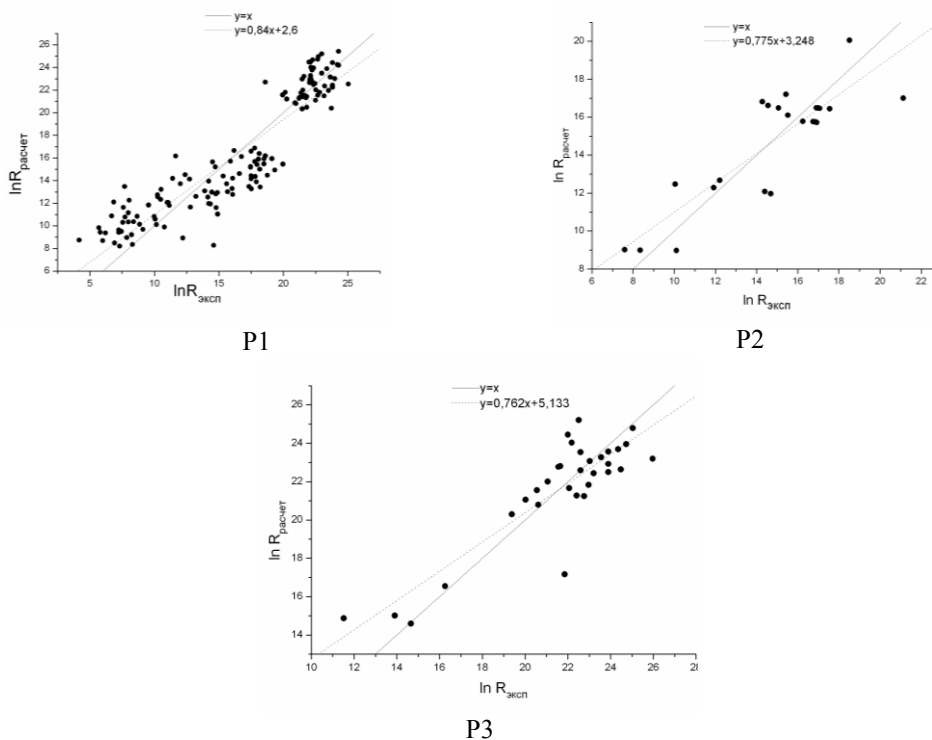


Рис. 1. Диаграмма разброса расчетных значений сопротивления и измеренных значений сопротивления пленок ПАН с модифицирующими добавками в виде солей кобальта (P1), серебра (P2) и меди (P3)

Анализ графиков позволил выделить выпадающие точки, которые исключили из дальнейшего анализа данных при построении нейросетевой структуры (табл. 2).

Таблица 2

**Выпадающие точки регрессионных моделей (2)–(4) для прогнозирования значений сопротивления пленок кобальт-, серебро- и медьсодержащего ПАН**

Модифицирующая добавка	$\omega$ (Me), масс. %	$T_1$ , °C	$t_1$ , мин	$T_2$ , °C	$t_2$ , мин	$R_{\text{эксп}}$ , Ом	$R_{\text{расчет}}$ , Ом
CoCl <sub>2</sub>	0,5	300	5	500	2	$0,95 \cdot 10^3$	$1,81 \cdot 10^5$
CoCl <sub>2</sub>	0,75	300	15	450	5	$2,2 \cdot 10^3$	$7,11 \cdot 10^5$
CoCl <sub>2</sub>	1,0	300	15	500	10	$2,2 \cdot 10^6$	$3,91 \cdot 10^3$
CuCl <sub>2</sub>	1,0	250	20	450	2	$3,1 \cdot 10^9$	$2,86 \cdot 10^7$
AgNO <sub>3</sub>	0,75	150	3	400	2	$1,50 \cdot 10^9$	$2,43 \cdot 10^7$

Для прогнозирования коэффициента газочувствительности использован нейросетевой подход, представляющий собой упрощенную математическую модель обработки информации головным мозгом человека. В процессе работы нейросети осуществляется преобразование сигналов (кодирующих обрабатываемые данные) внутри нейронов и их передача между соседними нейронами.

В данной работе задача нейропрогнозирования значения коэффициента газочувствительности пленок металлсодержащего ПАН по параметрам технологического процесса их получения решается при помощи нейронных сетей.

Для моделирования зависимости коэффициента газочувствительности от технологических параметров синтезировали нейронные сети с прямым распространением сигнала (многослойный персептрон). Архитектура нейронных сетей представлена на рис. 2, как видно, построенные сети содержат 5 входных нейронов и 1 выходной нейрон. Каждый входной нейрон соответствовал одному из технологических параметров получения пленок, выходной – прогнозируемому свойству (S).

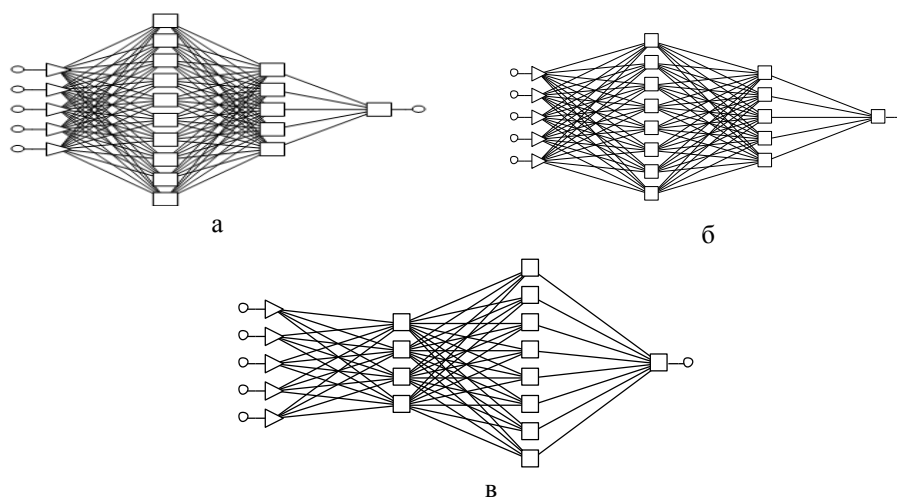


Рис. 2. Архитектуры нейронных сетей для прогнозирования коэффициента газочувствительности: а – пленок Со-содержащего ПАН; б – пленок Аg-содержащего ПАН; в – пленок Си-содержащего ПАН

Для проверки работоспособности сетей сравнивали экспериментальные и теоретические данные выходов сетей, т.е. значения коэффициента газочувствительности полученных пленок.

Для тестирования качества моделей использовали линейные регрессионные уравнения связи между измеренными  $S_{\text{эксп.}}$  и модельными  $S_{\text{расч.}}$  значениями зависимых переменных:

$$S_{\text{эксп.}} = k_0 + k_1 \cdot S_{\text{расч.}}, \quad (8)$$

где  $k_0$  и  $k_1$  – коэффициенты, которые рассчитывали при помощи МНК, близость к 0 и 1 коэффициентов  $k_0$  и  $k_1$  соответственно характеризует адекватность нейросетевой модели.

На рис. 3 точками представлены экспериментальные значения коэффициента газочувствительности в зависимости от рассчитанных построенными нейросетевыми моделями величин, линия – результат расчета по уравнению.

Таким образом, синтезированные нейронные сети использованы для прогнозирования значения коэффициента газочувствительности пленок кобальт-, серебро- и медьсодержащего ПАН с целью создания эффективного низкотемпературного сенсора диоксида азота. Оптимальные параметры для создания эффективных сенсоров  $\text{NO}_2$  представлены в табл. 4.

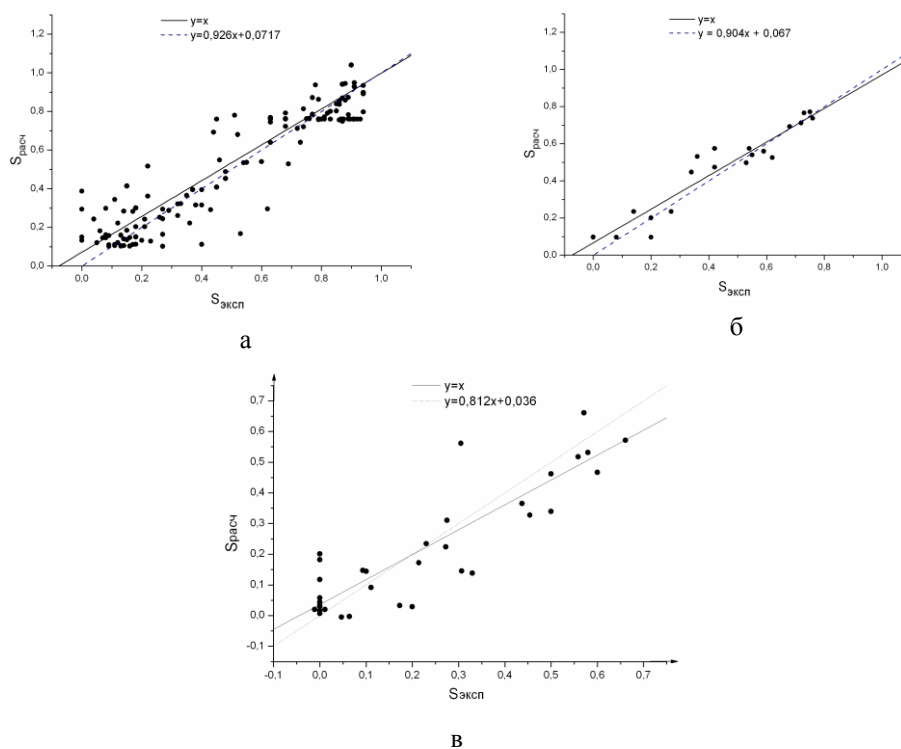


Рис. 3. Зависимость между экспериментальными и расчетными значениями коэффициента газочувствительности: а – пленок Со-содержащего ПАН (коэффициент корреляции  $R_1 = 0,925$ ); б – пленок Аg-содержащего ПАН (коэффициент корреляции  $R_2 = 0,97$ ); в – пленок Си-содержащего ПАН (коэффициент корреляции  $R_3 = 0,86$ )

Таблица 4

**Технологические параметры для формирования материала пленок металлсодержащего ПАН с наилучшими значениями коэффициента газочувствительности согласно синтезированным нейронным сетям**

Модифицирующая добавка	$\omega$ (Me), мас. %	$T_1$ , °C	$t_1$ , мин	$T_2$ , °C	$t_2$ , мин
$AgNO_3$	0,05	250	2	350	28
$CuCl_2$	0,3	250	20	350	2
$CoCl_2$	0,8	270	7	370	4

Проведен теоретический анализ экспериментальных данных по формированию электропроводящего полимерного материала пленок полупроводникового типа на основе кобальт-, серебро- и медьсодержащего ПАН методами множественной линейной регрессии и нейросетевого подхода.

Регрессионный анализ позволил построить количественные соотношения между значениями сопротивления пленок и технологическими параметрами их получения. Построенные регрессионные модели позволили исключить из рассмотрения выпадающие точки для анализа газочувствительных свойств материала полученных пленок.

Использование нейронных сетей дает возможность повысить точность предсказания и дать удовлетворительный прогноз физико-химических свойств органических материалов. Синтезированы нейросетевые модели для прогнозирования значений коэффициента газочувствительности пленок металлсодержащего ПАН. Проведена структурная и параметрическая идентификация полученных нейронных сетей. Выполнена верификация моделей: использованы линейные регрессионные уравнения связи между измеренными и модельными значениями коэффициента газочувствительности.

Полученные модели в пределах экспериментальной ошибки удовлетворительно описывает собранные данные: коэффициенты корреляции  $R_1 = 0,925$ ;  $R_2 = 0,97$  и  $R_3 = 0,86$ .

Использование нейросетевого моделирования позволяет оптимизировать технологический процесс формирования материалов на основе ИК-пиролизованного ПАН с различными модифицирующими добавками и перспективен в области создания новых функциональных материалов для эффективных низкотемпературных сенсоров газа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kozhitov L.V., Kostikova A.V., Kozlov V.V., Bulatov M.Ph.* The FeNi<sub>3</sub>/C Nanocomposite Formation from the Composite of Fe and Ni Salts and Polyacrylonitrile under IR-Heating // Journal of nanoelectronics and optoelectronics. – 2012. – № 7. – P. 419-422.
2. *Karpacheva G.P., Zemtsov L.M., Bagdasarova K.A., Efimov M.N., Ermilova M.M., Orekhova N.V., Muratov D.G.* Nanostructured carbon materials based on IR-pyrolized polyacrylonitrile // NATO security through science series – A: chemistry and biology. Hydrogen materials science and chemistry of carbon nanomaterials. Springer. – 2007. – P. 577-586.
3. *Олифиренко А.С., Розова Е.Ю., Сапрыкина Н.Н., Митилинеос А.Г., Ельяшевич Г.К.* Композиционные мембраны, полученные фазоинверсионным методом нанесения полиакрилонитрила на пористые пленки полиэтилена // Журнал прикладной химии. – 2009. – Т. 82, № 8. – С. 1347-1355.
4. *Zemtsov L.M., Karpacheva G.P., Efimov O.N., Kozlov V.V., Bagdasarova K.A., Muratov D.G.* Structure and Properties of Infra-Red-Irradiated Polyacrylonitrile and Its Composites // Chemine tehnologija. – 2005. – № 1 (35). – P. 25-28.
5. *Щербина Н.А., Бычкова Е.В., Панова Л.Г.* Модифицирование полиакрилонитрильного волокна с целью снижения горения // Хим. волокна. – 2008. – № 6. – С. 17-19.
6. *Коноваленко С.П., Бедная Т.А., Семенистая Т.В., Петров В.В., Мараева Е.В.* Разработка технологии получения неподогреваемых сенсоров газа на основе полиакрилонитрила для гибридных сенсорных систем // Инженерный Вестник Дона. [Электронный ресурс]. – Ростов-на-Дону: Ростовское региональное отделение Российской Инженерной академии, 2012. – №4/2. – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1356>.
7. *Бедная Т.А., Коноваленко С.П., Семенистая Т.В., Королев А.Н.* Влияние модифицирующих добавок на газочувствительность нанокompозитных материалов на основе полиакрилонитрила // Перспективные материалы. – 2012. – № 5. – С. 39-44.

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

**Бедная Татьяна Алексеевна** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: bednayat@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89289561532; кафедра химии и экологии; ассистент.

**Семенистая Татьяна Валерьевна** – 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.



**Bednaya Tatyana Alekseevna** – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»; e-mail: bednayat@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +7289561532; the department of chemistry and ecology; assistant.

**Semenistaya Tatiana Valerievna** – e-mail: semenistaya@sfedu.ru; phone: +79185804422; 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.

УДК 678:699.81

**А.Н. Гаращенко, В.П. Рудзинский, В.О. Каледин**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ОГНЕЗАЩИТЫ**

*Проведен анализ возможности применения различных видов огнезащиты для существенного снижения показателей пожарной опасности полимерных композиционных материалов и конструкций из них. Рассмотрены особенности применения вспучивающихся покрытий, как наиболее перспективного средства огнезащиты таких конструкций. Представлены результаты, демонстрирующие получение приемлемого уровня показателей для типичных полимерных композитов со вспучивающимися покрытиями. Показана перспективность разработки и использования компьютерных программ для проектирования рациональной огнезащиты, для оценки уровня конструктивной пожарной опасности и пределов огнестойкости, а также для создания оптимальных по форме и структуре конструкций с огнезащитой, обеспечивающих требуемый уровень их пожаробезопасности.*

*Полимерные композиционные материалы (композиты); стеклопластик; пултрузия; вспучивающиеся огнезащитные покрытия; пожарная опасность; пожаробезопасность, предел огнестойкости; теплотехнические и статические расчеты; математическое моделирование.*

**A.N. Garashchenko, V.P. Rudzinsky, V.O. Kaledin**

**USE OF FIRE PROTECTION FOR REDUCING FIRE HAZARD OF POLYMER  
COMPOSITES AND STRUCTURES ON THEIR BASIS**

*A possibility of using various kinds of fire protection for the substantial reduction of fire hazard indices of polymer composite materials and structures on their basis is analyzed. The features of using intumescent coatings as the most prospective fire-protection means for these structures are considered. The results that demonstrate obtaining the acceptable level of indices for typical polymer composites with intumescent coatings are presented. The potentiality of developing and using software for designing rational fire protection, evaluating a level of constructive fire hazard and fire-resistance limits as well as developing structures, optimal in their form and design, with fire protection providing the required level of their fire safety is shown.*

*Polymer composite materials (composites); fiberglass plastic, pultrusion; intumescent fire-protective coatings; fire hazard; fire safety; fire-resistance limit; heat-engineering and static calculations; mathematical modeling.*

В настоящее время объем применения конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в нашей стране явно не соответствует потребностям различных отраслей и, прежде всего, наиболее материалоемкой строительной отрасли. В значительной степени это связано с тем, что ПКМ являются горючими материалами, а конструкции из них имеют относительно низкую термо- или огнестойкость. Во всем мире применение ПКМ (стекло-, угле-, базальтопластиков) при изготовлении различных конструкций в строительстве, на транспорте и других