

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕЗИНЫ НА ОСНОВЕ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА И ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА, КАК МЕЖОБЛАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА

А.В. Смирнов, А.А. Терентьев, С.А. Баласанян, Е.Н. Егоров, Н.И. Кольцов, С.А. Васильев

Александр Вячеславович Смирнов (ORCID 0000-0003-2424-8142)*

Кафедра прикладной физики и нанотехнологий, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр., 15, Чебоксары, Российская Федерация, 428015

E-mail: fizteh21@yandex.ru*

Андрей Алексеевич Терентьев (ORCID 0000-0001-8571-2020)

Кафедра высшей математики и теоретической механики им. С.Ф. Сайкина, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр., 15, Чебоксары, Российская Федерация, 428015

E-mail: taa2004@list.ru

Сергей Аракелович Баласанян (ORCID 0009-0001-0615-2190)

Кафедра теоретической ядерной физики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31, Москва, Российская Федерация, 115409

E-mail: sergeibalasanian@gmail.com

Евгений Николаевич Егоров (ORCID 0000-0003-1739-3122), Николай Иванович Кольцов (ORCID 0000-0003-2264-1370)

Кафедра физической химии и высокомолекулярных соединений, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр., 15, Чебоксары, Российская Федерация, 428015

E-mail: enegorov@mail.ru, koltsovni@mail.ru

Сергей Анатольевич Васильев (ORCID 0000-0003-3346-7347)

Кафедра робототехники и прикладной механики, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр., 15, Чебоксары, Российская Федерация, 428015

E-mail: vsa_21@mail.ru

Исследованы электрофизические, реометрические и физико-механические свойства резины на основе бутадиен-нитрильного каучука, наполненного техническим углеродом, для ее применения в качестве чувствительных элементов гибких переменных емкостей в датчиках систем дистанционного контроля давления в автомобильных шинах. В качестве модификаторов электрофизических свойств резины изучены политетрафторэтилен, графен и диоксид титана. Резиновую смесь готовили на лабораторных вальцах ЛБ 320 160/160 при температуре поверхности валков 60-70 °С в течение 25 мин. Реометрические свойства резиновой смеси исследовались на реометре MDR 3000 Basic при 150 °С в течение 30 мин в соответствии с ASTM D2084-79. Для определения физико-механических показателей резиновую смесь вулканизовали при температуре 150 °С и давлении 18,2 МПа в течение 20 мин в вулканизационном прессе P-V-100-3RT-2-PCD. Упруго-прочностные свойства вулканизатов определяли в соответствии с ГОСТ 270-75; твердость по Шору А – в соответствии с ГОСТ 263-75; сопротивление раздиру – в соответствии с ГОСТ 262-93; эластичность по отскоку – согласно ГОСТ 27110-86. Для образцов резины толщиной от 0,3 до 1,5 мм с наклеенными с обеих сторон медными электродами на приборе ТС-7 измерялась и исследовалась электрическая емкость в зависимости от давления. Удельное поверхностное сопротивление образцов резины определялось стандартным четырехзондовым методом на установке Jandel RMS 3000. Установлено, что резина, содержащая 10 мас. ч. диоксида титана на 100 мас. ч. бутадиен-нитрильного каучука, характеризуется повышенной электрической емкостью и может быть рекомендована в качестве межобладоочного материала переменного конденсатора датчика давления в автомобильных шинах.

Ключевые слова: электрофические свойства, бутадиен-нитрильный каучук, технический углерод, резина, политетрафторэтилен, графен, диоксид титана, гибкие переменные емкости, датчики давления

**STUDY OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF RUBBER BASED
ON NITRILE-BUTADIENE RUBBER AND CARBON TECHNICAL
AS AN INTERLINING MATERIAL OF FLEXIBLE VARIABLE CAPACITIES**

A.V. Smirnov, A.A. Terentyev, S.A. Balasanyan, E.N. Egorov, N.I. Kol'tsov, S.A. Vasiliev

Alexander V. Smirnov (ORCID 0000-0003-2424-8142)*

Department of Applied Physics and Science Technologies, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Moskovsky ave., 15, Cheboksary, 428015, Russia

E-mail: fizteh21@yandex.ru*

Andrey A. Terentyev (ORCID 0000-0001-8571-2020)

Department of Higher Mathematics and Theoretical Mechanics named after S.F. Saikin, Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Moskovsky pr., 15, Cheboksary, 428015, Russia

E-mail: taa2004@list.ru

Sergey A. Balasanyan (ORCID 0009-0001-0615-2190)

Department of Theoretical Nuclear Physics, National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia

E-mail: sergeibalasanian@gmail.com

Evgeny N. Egorov (ORCID 0000-0003-1739-3122), Nikolay I. Kol'tsov (ORCID 0000-0003-2264-1370)

Department of Physical Chemistry and Macromolecular Compounds, Chuvashia State University named after I.N. Ulyanova, Moskovsky pr., 15, Cheboksary, 428015, Russia

E-mail: enegorov@mail.ru, koltsovni@mail.ru

Sergey A. Vasiliev (ORCID 0000-0003-3346-7347)

Department of Robotics and Applied Mechanics, Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Moskovsky pr., 15, Cheboksary, Russian Federation, 428015

E-mail: vsa_21@mail.ru

Electrophysical, rheometric and physicommechanical properties of rubber based on butadiene-nitrile rubber filled with technical carbon were studied for its application as sensitive elements of flexible variable capacities in sensors of remote pressure monitoring systems in automobile tires. Polytetrafluoroethylene, graphene and titanium dioxide were studied as modifiers of the electrophysical properties of rubber. The rubber mixture was prepared on laboratory rollers LB 320 160/160 at a roller surface temperature of 60-70 °C for 25 min. Rheometric properties of the rubber mixture were studied on a rheometer MDR 3000 Basic at 150 °C for 30 min in accordance with ASTM D2084-79. To determine the physical and mechanical properties, the rubber mixture was vulcanized at a temperature of 150 °C and a pressure of 18.2 MPa for 20 min in a P-V-100-3RT-2-PCD vulcanization press. The elastic strength properties of vulcanizates were determined in accordance with GOST 270-75; Shore A hardness – in accordance with GOST 263-75; tear resistance – in accordance with GOST 262-93; rebound elasticity – in accordance with GOST 27110-86. For rubber samples with a thickness of 0.3 to 1.5 mm with copper electrodes glued to both sides, the electrical capacity was measured and studied as a function of pressure on a TS-7 device. The specific surface resistance of the rubber samples was determined by the standard four-probe method on a Jandel RMS 3000 installation. It was found that rubber containing 10 parts by weight of titanium dioxide per 100 parts by weight of butadiene-nitrile rubber, is characterized by increased electrical capacity and can be recommended as an interlining material for a variable capacitor of a pressure sensor in automobile tires.

Keywords: electrophysical properties, butadiene-nitrile rubber, carbon black, vulcanized rubber, graphene, titanium dioxide, flexible variable capacities, pressure sensors

Для цитирования:

Смирнов А.В., Терентьев А.А., Баласанян С.А., Егоров Е.Н., Кольцов Н.И., Васильев С.А. Исследование электрофизических свойств резины на основе бутадиен-нитрильного каучука и технического углерода, как межобкладочного материала. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 9. С. 99–105. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.9y.

For citation:

Smirnov A.V., Terentyev A.A., Balasanyan S.A., Egorov E.N., Kol'tsov N.I., Vasiliev S.A. Study of electrophysical properties of rubber based on nitrile-butadiene rubber and carbon technical as an interlining material of flexible variable capacities. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 9. P. 99–105. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.9y.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальным является разработка чувствительных емкостных устройств измерения давления, которые находят функциональное применение в качестве миниатюрных датчиков-сенсоров в медицине, аэрокосмической отрасли, авиа- и автомобилестроении [1-3]. Чувствительный элемент емкостного датчика давления представляет собой переменный конденсатор с диэлектрической прослойкой-подложкой, в качестве которой используются различные материалы. В работе [4] емкостной датчик давления создан на основе кремниевой подложки. Приведены результаты исследований, которые дают максимальную чувствительность 1,34 фФ/МПа для нового емкостного датчика давления с низкой нелинейностью 0,094 FS в диапазоне давлений 0-150 МПа, когда температурные эффекты не учитываются. При учете температурных эффектов чувствительность датчика увеличивается с ростом температуры. При рабочей температуре 20 °С и температуре склеивания 70 °С датчик имеет чувствительность 1,25 фФ/МПа и нелинейность 0,089 FS. Кроме того, на основе результатов трех циклов давления были получены гистерезис 0,35% FS и повторяемость 0,02% FS. Приведенные результаты говорят о невысокой чувствительности и низких значениях электрической емкости датчика давления, что требует создания прецизионных элементов регистрации сигнала для прикладных областей применения. В работах [5, 6] описан сверхчувствительный датчик давления с полимерным диэлектриком с использованием углеродных нанотрубок. Однако, стоит отметить, что необходим строгий контроль стехиометрического состава компонентов для обеспечения воспроизводимости результатов. При изготовлении емкостных датчиков в основном используются твердые силиконовые каучуки, такие как полидиметилсилоксан PDMS [7, 8] и ecoflex [9]. Однако, несмотря на гибкость этих силиконовых каучуков, их низкая

деформация сжатия и высокий модуль Юнга [10] приводят к снижению чувствительности датчиков [11]. Чувствительность и точность емкостного датчика давления зависит от электрических и физико-механических свойств входящего в состав конденсатора межобкладочного диэлектрического материала - чем выше диэлектрическая проницаемость межобкладочного материала, тем больше электрическая емкость конденсатора. Кроме того, чем выше эластичность материала и его сжимаемость, тем выше точность и чувствительность датчика давления. Кроме того, увеличение емкости конденсатора прямо-пропорционально уменьшению толщины межобкладочного материала. В работе [12] в качестве диэлектрического слоя использовали высушенные лепестки роз с однородной структурой, которые обеспечивают чувствительность, благодаря своей пенообразной структуре. Датчики с таким межобкладочным материалом обладают удовлетворительной чувствительностью в диапазоне давлений от 0,6 Па до 155 кПа, что недостаточно для измерения давления в шинах современных автомобилей. Одним из эффективных способов повышения емкостных свойств межобкладочных материалов является введение в них добавок, которые обладают высокими диэлектрическими показателями и практически не влияют на их физико-механические свойства [13]. В качестве таких добавок можно использовать политетрафторэтилен [14], графен [15, 20], оксиды металлов, среди которых следует выделить оксид цинка [16] и диоксид титана [17]. Диэлектрическая проницаемость последнего достигает 100 [18]. Поскольку межобкладочный материал должен обладать эластичностью и хорошими физико-механическими свойствами, для его изготовления могут быть использованы углеродсодержащие резины с серной и цинкоксидной вулканизирующей системой. В работах [21, 22] исследованы углеродсодержащие резины, включающие различные технологические добавки, с изучением их реометрических и физико-механических

показателей. Однако для этих резин электрофизические свойства не изучались. В связи с этим в данной работе исследованы реометрические, физико-механические и электрофизические свойства резины с серной системой вулканизации, содержащей добавки с различными диэлектрическими свойствами с целью возможности ее использования в качестве межобкладочного материала в составе чувствительного элемента (конденсатора переменной емкости) системы дистанционного контроля давления в автомобильных шинах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве датчика давления для шин автотранспортных средств использовалась переменная электрическая емкость (конденсатор) с эластичным межобкладочным материалом, который с двух сторон обложен электродами [19]. Принцип работы переменного конденсатора состоит в том, что под воздействием давления на его обкладки происходит уменьшение толщины межобкладочного материала и расстояния между электродами, что приводит к изменению резонансной частоты колебательного контура датчика.

В данной работе решалась задача разработки резинового межобкладочного материала переменного конденсатора, обеспечивающего высокую чувствительность и точность измерения давления в автомобильных шинах.

Межобкладочный материал переменных емкостных устройств изготавливали на основе базовой резиновой смеси, которая содержала бутадиен-нитрильный каучук БНКС-28АМН (100,0 мас. ч.), вулканизирующий агент – серу (1,5 мас. ч.), ускоритель вулканизации – N-циклогексил-2-бензотиазолсульфенамид (0,7 мас. ч.), активаторы вулканизации – оксид цинка (3,0 мас. ч.) и стеариновую кислоту (1,0 мас. ч.), активный наполнитель – технический углерод П 324 (40,0 мас. ч.). В базовую резиновую смесь вводили следующие модификаторы: политетрафторэтилен, графен и диоксид титана. Политетрафторэтилен представляет собой

порошок (PFTE powder) с размером частиц 2 мкм. Графен марки RG-S1 (компании Русграфен), состоит из частиц углерода размером от 0,5 до 10 мкм. Диоксид титана марки TiOx-220 (ТУ 2321-001-17547702-2014, ООО «Титановые инвестиции») представляет собой порошок с размером частиц 10-15 мкм и массовой долей TiO_2 95,0%.

Резиновую смесь готовили на лабораторных вальцах ЛБ 320 160/160 при температуре поверхности валков 60-70 °С в течение 25 мин. Реометрические свойства резиновой смеси исследовались на реометре MDR 3000 Basic при 150 °С в течение 30 мин в соответствии с ASTM D2084-79. Для определения физико-механических показателей резиновую смесь вулканизовали при температуре 150 °С в течение 20 мин в сдвоенном вакуумном вулканизационном прессе типа P-V-100-3RT-2-PCD. Физико-механические свойства определяли в соответствии с ГОСТ 270-75; твердость по Шору А – в соответствии с ГОСТ 263-75; сопротивление раздиру – в соответствии с ГОСТ 262-93; эластичность по отскоку – согласно ГОСТ 27110-86. Резиновую смесь вулканизовали при температуре 150 °С и давлении 18,2 МПа в течение 20 мин в вулканизационном прессе P-V-100-3RT-2-PCD. Межобкладочный материал изготавливали из полученной резины в форме листов толщиной от 0,3 до 1,5 мм, на которые с обеих сторон наклеивались электроды из медной фольги. Удельное поверхностное сопротивление конденсаторов на основе межобкладочного материала определялось стандартным четырехзондовым методом на установке Jandel RMS-EL-Z, а их электрическая емкость измерялась мультиметром МЕГЕОН 12725 в барокамере при избыточном давлении от 0 до 0,45 бар.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены варианты резиновых смесей, содержащих добавки, обладающие различными диэлектрическими свойствами, в количестве от 2,5 до 10,0 мас. ч. на 100,0 мас. ч. каучука.

Таблица 1

Варианты и реометрические свойства резиновой смеси
Table 1. Variants and rheometric properties of rubber compound

Варианты резиновой смеси	1	2	3	4	5*	6	7	8
Модификатор	Количество, мас. ч.							
Политетрафторэтилен	–	5,0	–	–	–	–	–	–
Политетрафторэтилен	–	–	10,0	–	–	–	–	–
Графен	–	–	–	2,5	–	–	–	–
Диоксид титана	–	–	–	–	3,0	2,5	5,0	10,0

Продолжение таблицы

Реометрические свойства								
M_H , дН·м	13,63	14,53	15,43	13,47	10,66	13,23	13,18	13,26
M_L , дН·м	1,95	2,68	3,31	2,16	1,88	2,10	2,06	2,21
t_s , мин	4,69	4,59	4,52	4,08	4,80	4,09	4,11	4,16
t_{90} , мин	15,97	15,21	15,96	13,73	24,15	13,86	13,74	13,73

Примечание: M_H – максимальный крутящий момент; M_L – минимальный крутящий момент; t_s – время начала вулканизации; t_{90} – оптимальное время вулканизации; * в варианте «5» произведена равномассовая замена оксида цинка на диоксид титана.
 Note: M_H – maximum torque; M_L – minimum torque; t_s – vulcanization start time; t_{90} – optimal vulcanization time; * in option “5” an equal mass replacement of zinc oxide with titanium dioxide was performed

Таблица 2

Физико-механические и электрофизические свойства вулканизатов
 Table 2. Physical, mechanical and electrophysical properties of vulcanizates

Показатели	Варианты резиновой смеси							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Физико-механические свойства								
f_p , МПа	21,1	18,1	15,7	19,2	16,8	20,8	19,3	18,7
ϵ_p , %	530	450	340	580	640	600	620	540
H , ед. Шор А	65	67	72	66	56	62	63	64
B , кН/м	79	72	70	75	72	77	74	67
S , %	34	24	20	28	34	30	28	28
Электрофизические свойства								
ϵ , усл. ед.	3,7	3	5,4	147,3	279,8	276,7	294,1	165
ρ , МОм/кв.	40	3,5	4	60	45	>125	>125	>125
C , Пкф	30	25	37	1250	2600	1800	2800	1150

Примечание: f_p – условная прочность при растяжении; ϵ_p – относительное удлинение при разрыве; H – твердость по Шору А; B – сопротивление раздиру; S – эластичность по отскоку; ϵ – диэлектрическая проницаемость; ρ – удельное поверхностное сопротивление; C – электрическая емкость

Note: f_p – conventional tensile strength; ϵ_p – relative elongation at break; H – Shore A hardness; B – tear resistance; S – rebound elasticity; ϵ – permittivity; ρ – specific surface resistance; C – electrical capacitance

На рис. 1 приведены кривые вулканизации резиновой смеси.

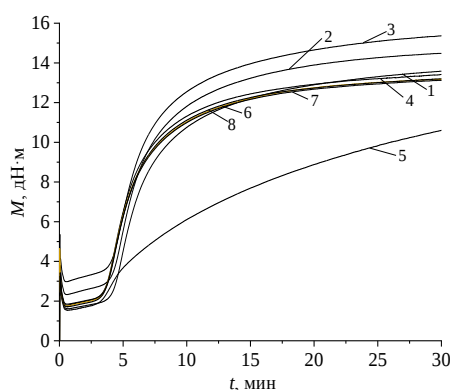


Рис. 1. Вулканизационные кривые резиновой смеси (номера кривых соответствуют номерам вариантов резиновой смеси)
 Fig. 1. Vulcanization curves of the rubber compound (curve numbers correspond to the numbers of the rubber compound variants)

На основе данных рис. 1 были определены реометрические характеристики для разных вариантов резиновой смеси, которые представлены в табл. 1. Как видно, при введении всех модификато-

ров происходит уменьшение минимального крутящего момента и оптимального времени вулканизации. Равномассовая замена оксида цинка в базовой композиции на диоксид титана (варианты 1 и 5, соответственно) приводит к ухудшению всех реометрических характеристик резиновой смеси. Это указывает на то, что диоксид титана в отличие от оксида цинка не является активатором вулканизации. При введении диоксида титана в резиновую смесь, содержащую оксид цинка (варианты 6-8) в базовом количестве, ее реометрические свойства близки к реометрическим свойствам базового варианта (вариант 1).

В табл. 2 приведены физико-механические свойства вулканизатов подготовленных вариантов резиновой смеси.

Из табл. 2 следует, что введение исследуемых добавок в резиновую смесь приводит к снижению условной прочности при растяжении, сопротивления раздиру и эластичности по отскоку вулканизатов. Равномассовая замена оксида цинка на диоксид титана (вариант 5) приводит к ухудшению физико-механических свойств вулканизатов. Вве-

дение же диоксида титана в резиновую смесь, содержащую оксид цинка в базовом количестве (варианты 6-8), приводит к незначительным изменениям физико-механических свойств вулканизатов по сравнению с базовым вариантом.

В табл. 2 также приведены снятые при атмосферном давлении электрофизические свойства вулканизатов. Как видно, добавки политетрафторэтилена практически не оказывают влияния на электрофизические свойства резины. При введении графена и диоксида титана в состав резины наблюдается увеличение ее удельного поверхностного электрического сопротивления и электрической емкости изготовленных конденсаторов.

На рис. 2 приведены результаты исследования влияния давления на емкость конденсатора с межобкладочным материалом из резины, содержащей графен и различные количества диоксида титана.

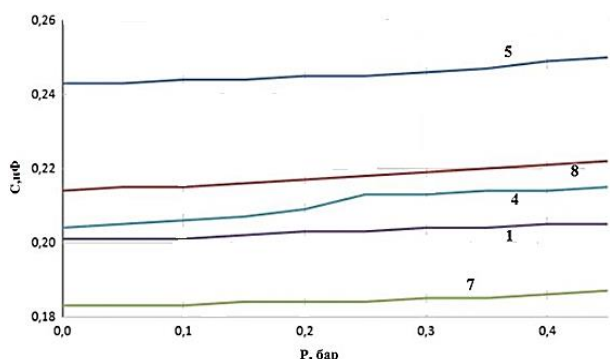


Рис. 2. Зависимость электрической емкости (C) от избыточного давления (P) для конденсатора с межобкладочным материалом (номера кривых соответствуют номерам вариантов резиновой смеси)

Fig. 2. Dependence of electrical capacity (C) on excess pressure (P) for a capacitor with interlining material (curve numbers correspond to the numbers of rubber compound variants)

Как видно, увеличение давления приводит к возрастанию электрической емкости конденсатора с межобкладочным материалом из резины, содержащей как графен, так и диоксид титана. При этом конденсатор с межобкладочным материалом из резины, содержащей диоксид титана вместо оксида цинка (вариант 5), обладает наибольшими значениями емкости в исследованной области избыточных давлений. Однако этот вариант резины характеризуется неудовлетворительными физико-механическими свойствами, что не позволяет использовать его в качестве межобкладочного материала. Конденсатор с межобкладочной резиной, содержащей 10 мас. ч. диоксида титана на 100 мас.ч. каучука, обладает наилучшими электрофизиче-

скими свойствами, что с учетом достаточно высоких реометрических и физико-механических показателей позволяет рекомендовать ее для изготовления чувствительных датчиков давления автомобильных шин.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в данной статье исследована углеродсодержащая резина на основе бутадиен-нитрильного каучука с модификаторами, обладающими различными диэлектрическими свойствами. Установлено, что резина, содержащая диоксид титана, практически не уступает по реометрическим и физико-механическим свойствам базовой резине, превосходя по электрофизическим параметрам, что позволяет рекомендовать ее в качестве чувствительного межобкладочного материала в переменных конденсаторах датчиков давления в автомобильных шинах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-10211.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 23-29-10211.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Huang Y., Fan X., Chen S.C., Zhao N.** Emerging technologies of flexible pressure sensors: materials, modeling, devices, and manufacturing. *Adv. Funct. Materials*. 2019. V. 29. N 12. P. 1808509. DOI: 10.1002/adfm.201808509.
2. **Kim S.-W., Oh G.-Y., Lee K.-I., Yang Y.-J., Ko J.-B., Kim Y.-W., Hong Y.-S.** A Highly Sensitive and Flexible Capacitive Pressure Sensor Based on Alignment Airgap Dielectric. *Sensors*. 2022. 22(19). P. 7390. DOI: 10.3390/s22197390.
3. **Li W., Jin X., Zheng Y., Chang X., Wang W., Lin T., Zheng F., Onyilagha O., Zhu Zh.** Porous and Air Gap Elastomeric Dielectric Layer for Wearable Capacitive Pressure Sensor with High Sensitivity and Wide Detection Range. *J. Mater. Chem. C*. 2020. V. 8. P. 11468-11476. DOI: 10.1039/D0TC00443J.
4. **Kirankumar B. Balavalad.** Design and Simulation of MEMS Capacitive Pressure Sensor Array for Wide Range Pressure Measurement. *Int. J. Comp. Applicat.* 2017. V. 163. N 6. P. 39-46. DOI: 10.5120/ijca2017913554.
5. **Jihyeon Oh, Dong-Young Kim, Hyunwoo Kim, Oh-Nyoung Hur, Sung-Hoon Park.** Comparative Study of Carbon Nanotube Composites as Capacitive and Piezoresistive Pressure Sensors under Varying Conditions. *Materials (Basel)*. 2022. V. 15. N 21. P. 7637. DOI: 10.3390/ma15217637.
6. **Jongchan Yoo, Dong-Young Kim, Hyunwoo Kim, Oh-Nyoung Hur, Sung-Hoon Park.** Comparison of Pressure

- Sensing Properties of Carbon Nanotubes and Carbon Black Polymer Composites. *Materials (Basel)*. 2022. V. 15. N 3. P. 1213. DOI: 10.3390/ma15031213.
7. **Lipomi D.J., Vosgueritchian M., Tee B.C.K., Hellstrom S.L., Lee J.A., Fox C.H., Bao Z.** Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes. *Nat. Nanotechnol.* 2011. V. 6. P. 788–792. DOI: 10.1038/nnano.2011.184.
 8. **Viry L., Levi A., Totaro M., Mondini A., Mattoli V., Mazzolai B., Beccai L.** Flexible Three-Axial Force Sensor for Soft and Highly Sensitive Artificial Touch. *Adv. Mater.* 2014. V. 26. P. 2659–2664. DOI: 10.1002/adma.201305064.
 9. **Zhang H., Wang M.Y., Li J., Zhu J.** A soft compressive sensor using dielectric elastomers. *Smart Mater. Struct.* 2016. V. 25. P. 035045. DOI: 10.1088/0964-1726/25/3/035045.
 10. **Qin R., Hu M., Li X.** A new strategy for the fabrication of a flexible and highly sensitive capacitive pressure sensor. *Microsyst. Nanoeng.* 2021. V. 7. P. 100. DOI: 10.1038/s41378-021-00327-1.
 11. **Li R., Zhou Q., Bi Y., Cao S., Xia X., Yang A., Li S., Xiao X.** Research progress of flexible capacitive pressure sensor for sensitivity enhancement approaches. *Sens. Actuators A-Phys.* 2021. V. 321. P. 112425. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112425.
 12. **Moheimani R., Aliahmad N., Aliheidari N.** Thermoplastic polyurethane flexible capacitive proximity sensor reinforced by CNTs for applications in the creative industries. *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 1104. DOI: 10.1038/s41598-020-80071-0.
 13. **Mannsfield S.C.B., Tee B.C.K., Stoltenberg R.M., Chen C., Barman S., Muir B.V.O., Sokolov A.N., Reese C., Bao Z.N.** Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers. *Nat. Mater.* 2010. V. 9. P. 859–864. DOI: 10.1038/nmat2834.
 14. **Quan Wang, Junbo Che, Weifei Wu, Zhendong Hu, Xueqing Liu, Tianli Ren, Yuwei Chen, Jianming Zhang.** Contributing Factors of Dielectric Properties for Polymer Matrix Composites. *Polymers*. 2023. V. 15. N 3. P. 590. DOI: 10.3390/polym15030590.
 15. **Hongda Zhu, Dingfei Deng, Chiwei Xu, Xuebin Wang, Xiangfen Jiang.** Three-dimensional network of graphene for electrochemical capacitors and capacitive deionization. *APL Energy*. 2024. V. 2. P. 011502. DOI: 10.1063/5.0177677.
 16. **Николаева А.В., Маркина Д.Е., Кадинская С.А., Кондратьев В.М.** Новые подходы к созданию ёмкостных сенсоров давления на основе мембран ZnO-ПДМС. Электроника: физические процессы, технологии, приборы и устройства. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. С. 304-307. **Nikolaeva A.V., Markina D.E., Kalinskaya S.A., Kondratiev V.M.** New approaches to the creation of capacitive pressure sensors based on ZnO-PDMS membranes. *Electronics: physical processes, technologies, devices and devices*. St. Petersburg: SPbGETU "LETI". 2023. P. 304-307 (in Russian).
 17. **Atta A., Alotiby M.F., Al-Harbi N., El-Aassar M.R., Uosif M.A.M., Rabia M.** Fabrication, Structural Properties, and Electrical Characterization of Polymer Nanocomposite Materials for Dielectric Applications. *Polymers*. 2023. V. 15. P. 3067. DOI: 10.3390/polym15143067.
 18. **Bonkerud J., Zimmermann C., Weiser P.M.** On the permittivity of titanium dioxide. *Sci Rep.* 2021. V. 11. P. 12443. DOI: 10.1038/s41598-021-92021-5.
 19. **Смирнов А.В., Терентьев А.А., Баласанян С.А., Егоров Е.Н., Кольцов Н.И., Васильев С.А.** Исследование электрических свойств эластомеров на основе бутадиен-нитрильного и бутадиен-метилстирольного каучуков с техническим углеродом для межобкладочного материала гибких переменных емкостей. Сб. тр. 16 Международ. Конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» CFPMST. 2024. С. 251-252. **Smirnov A.V., Terentyev A.A., Balasanyan S.A., Egorov E.N., Koltsov N.I., Vasiliev S.A.** Investigation of electrical properties of elastomers based on butadiene-nitrile and butadiene-methylstyrene rubbers with technical carbon for interlayer material of flexible variable containers. Collection of art. 16 International. Conference "Carbon: fundamental problems of science, materials science, technology" CFPMST. 2024. P. 251-252 (in Russian).
 20. **Yuwei Guo, Simei Zeng, Qi Liu, Jingye Sun, Mingqiang Zhu, Linan Li, Tao Deng.** Review of the pressure sensor based on graphene and its derivatives. *Microelectron. Eng.* 2024. V. 288. P. 112167. DOI: 10.1016/j.mee.2024.112167.
 21. **Егоров Е.Н., Ушмарин Н.Ф., Кольцов Н.И.** Технологические добавки для маслостойких резин на основе бутадиен-нитрильных каучуков. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 6. С. 41-46. **Egorov E.N., Ushmarin N.F., Kol'tsov N.I.** Technological additives for oil and petrol resistance rubbers based on butadiene-nitrile caoutchoucs. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 6. P. 41-46 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216406.6169.
 22. **Ушмарин Н.Ф., Егоров Е.Н., Кольцов Н.И.** Влияние микросфер на свойства агрессивностойких резин. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 2. С. 49-55. **Ushmarin N.F., Egorov E.N., Kol'tsov N.I.** Influence of microspheres on properties of aggressive resistant rubbers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 2. P. 49-55 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216402.6165.

Поступила в редакцию 09.01.2025

Принята к опубликованию 30.01.2025

Received 09.01.2025

Accepted 30.01.2025