

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

Кафедра «Физика»

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

**Материалы
VI Региональной научно-практической конференции
с международным участием**

(Омск, 28 апреля 2017 г.)

*Научное текстовое электронное издание
локального распространения*

Омск
Издательство ОмГТУ
2017

УДК 001
ББК 72
А43

Редакционная коллегия:

А. И. Блесман, к.т.н., доцент, зав. каф. физики ОмГТУ;

М. А. Зверев, к.т.н., доцент каф. физики ОмГТУ;

О. М. Сухарева, ст. преподаватель каф. физики ОмГТУ

Актуальные проблемы современной науки : материалы VI Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, 28 апр. 2017 г.) / Минобрнауки России, ОмГТУ, каф. «Физика» ; [редкол.: А. И. Блесман, М. А. Зверев, О. М. Сухарева]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2017.

ISBN 978-5-8149-2475-9

Рассмотрены вопросы, касающиеся следующих направлений: материаловедения, нанотехнологий, физики, образования.

Издание адресовано научным сотрудникам, аспирантам и студентам, а также всем, кого интересуют проблемы современной науки.

УДК 001
ББК 72

1 электронный оптический диск

Оригинал-макет издания выполнен в Microsoft Office Word 2007/2010 с использованием возможностей Adobe Acrobat Reader.

Минимальные системные требования:

- процессор Intel Pentium 1,3 ГГц и выше;
- оперативная память 256 Мб и более;
- свободное место на жестком диске 260 Мб и более;
- операционная система Microsoft Windows XP/Vista/7/10;
- разрешение экрана 1024×768 и выше;
- акустическая система не требуется;
- дополнительные программные средства Adobe Acrobat Reader 5.0 и выше.

Ответственность за содержание материалов несут авторы

Компьютерная верстка *О. Г. Белименко*

Подписано к использованию 07.06.17.
Объем 10 Мб.

Издательство ОмГТУ.
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12
Эл. почта: info@omgtu.ru

УДК 621.762.065: 536.2

В.В. Акимов, А.Ф. Мишуков, А.Ю. Грязнов, Я.А. Сидорова

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

СНИЖЕНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЛЬНИЦ УДАРНО-ИНТЕГРАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ TiC–TiNi

Аннотация. В работе представлена разработка композиционных материалов типа тугоплавкое соединение – переходный сплав. В качестве матрицы использовали сплав TiNi, обладающий высоким уровнем демпфирования. Применение данного связующего материала позволяет существенно повысить прочность, пластичность, теплостойкость и, тем самым, абразивную износостойкость бил дезинтеграторных установок в процессе эксплуатации.

Измельчительные установки с мелющими элементами высокой износостойкости апробированы в условиях производства и в настоящее время применяются в дорожно-строительных организациях.

Ключевые слова: композиционный материал, износостойкость, прочность, твердость, пористость, дезинтеграторные билы.

Введение. В работе осуществлена разработка твердых безвольфрамовых сплавов типа тугоплавкое соединение – переходный сплав. В качестве связующей использовали сплав TiNi, обладающий высоким уровнем демпфирования. Применение такого связующего материала позволяет существенно повысить прочность, твердость, теплостойкость, абразивную износостойкость бил дезинтеграторных установок.

Твердые сплавы находят широкое применение в качестве инструментального и конструктивного материала, поэтому необходимо исследовать изменение прочности, теплостойкости, твердости таких сплавов при нагревании в процессе эксплуатации. Оценить твердость и теплостойкость твердых сплавов на основе TiC можно при нагреве от комнатной температуры до 820°C, выдержке при этой температуре в течение 4 часов с последующим охлаждением образцов материалов и сравнением их с теплостойкостью быстрорежущих сталей P18, P6M5 и твердого сплава BK8, находящихся при одинаковых условиях.

Методика эксперимента. Исследуемые образцы твердых сплавов готовили из смеси спрессованных порошков карбида титана и никелида титана с добавлением 6% раствора каучука в чистом бензине. Размер исходных частиц карбида титана составляет от 1 до 5 мкм, никелида титана от 1 до 50 мкм. Образцы получили холодным односторонним прессованием при давлении не выше 100...200 МПа. Вакуумное спекание проводили в печи СШВ 1,25/25 – UI-IPOO при давлении не выше $7 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре 1350 °C в течение (5–15) минут с последующим охлаждением. Объемное содержание связующей фазы TiNi изменяли в пределах от 40 до 60 (об. %). Пористость спеченного материала оценивали гидростатическим методом. Фазовый состав образцов определяли на рентгеновской установке «ДРОН-3,0» с фильтрованным медным излучением. Образцы имели пористость от 1 до 3 (%) и

шероховатость поверхности $\sqrt{R_{a1,25} - 0,63}$ [1].

Твердость образцов при комнатной температуре составляла (86-87) HRA. Изменение твердости после термической обработки при определенной температуре проводили пять раз на одном образце, затем вычислили среднюю твердость (табл.1) [2].

Нагрев образцов твердых безвольфрамовых сплавов проводили в печи СНО–2,55.1,77/12, измерение температуры проводили контактным методом термопарой «хромель-алюмель» на столике прибора определения твердости по Роквеллу. Затем в образец внедряли алмазный конус при нагрузке в 60 кг, продолжительностью 20 с, с последующим снятием нагрузки и определением твердости HRA твердого сплава на приборе Роквелла по шкале А.

Результаты и обсуждения. В табл.1 представлены результаты измерения твердости сплавов 60TiC–40TiNi, 50TiC–50TiNi, 40TiC–60TiNi. Видно, что происходит монотонное снижение твердости от HRA 86 до HRA (61-63) [3].

Таблица 1

Изменение твердости сплавов TiC–TiNi

Состав сплава, об %	Температура нагрева сплава, °С									
	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700
	Твердость сплава (HRA)									
60TiC–40TiNi	82,8	80	76,7	74,7	74	69,3	66,3	65,3	65,2	61
50TiC–50TiNi	84,7	81,5	79	77,5	75,5	73,5	68,5	65,2	63,3	62
40TiC–60TiNi	83,6	82	80,3	80	76,3	74,6	71,5	68	66,6	63

Спеченные твердые сплавы не содержат кислорода, поэтому можно утверждать, что в процессе нагрева до (700–850) °С происходит упорядочение в связующей фазе TiNi структуры с утроенным параметром решетки CsCl. Химический анализ на содержание кислорода проводили газохроматографическим методом (ГОСТ 8505-84) по измерению высоты пиков окиси углерода на диаграммной ленте. Содержание кислорода O₂ вычисляли по формуле:

$$X = \frac{(h - h_k) * K * 100}{m},$$

где h – высота пика окиси углерода для пробы порошка, мм;

h_k – высота пика окиси углерода для спеченного материала, мм;

m – масса пробы, мг;

K – калиброванный коэффициент по кислороду, мг/мм.

Это приводит к снижению твердости сплавов TiC–TiNi примерно на 20 HRA (табл. 1). Аналогичные результаты были получены при анализе изменения твердости в сплавах BK6, BK8, BK10 при нагреве до 700 °С [3, 4, 5, 6].

Теплостойкость сплавов TiC–TiNi, быстрорежущей стали марок P18 и P6M5, твердых сплавов BK8 определяли следующим образом. Образцы материалов нагревали до 620 °С или до 820 °С, с выдерживанием в печи в течение 4 ч, охлаждая вместе с печью до комнатной температуры. Твердость измеряли по Роквеллу (твердые сплавы по шкале HRA быстрорежущей стали по шкале HRC) и сравнивали ее с исходной.

Как показали исследования (табл.2), твердость сплавов TiC–TiNi оставалась неизменной, тоже самое наблюдается и у твердых сплавов BK8, а твердость быстрорежущей стали P18 и P6M5 снизилась с (64–65) HRC до (56–57) HRC. Очевидно, что в быстрорежущей стали прошли процессы разупрочнения [7].

Таблица 2

Твердость сплавов после нагревания и 4-х часовой выдержки в печи

Условия испытаний	50TiC–50TiNi	Сталь P18	Сталь P6M5	Сплав BK8
620 °С	86HRA	57HRC	56HRC	91HRA
820 °С	86HRA	-	-	-

Эксперименты показали также, что в композиционных материалах TiC–TiNi не протекает процесс окисления при нагреве до 620 °С и наблюдается небольшой прирост

массы образцов в процессе нагрева до 820 °С примерно на $0,04 \cdot 10^{-3}$ кг (табл.2, табл.3). Твердые сплавы ВК8 сильно окислились и разбухли, прирост массы образцов для них составил $2,5 \cdot 10^{-3}$ кг (табл.3). Произошло окисление связующей Со фазы, что привело к разупрочнению материала. В сплавах же на основе карбида титана твердость полностью сохранилась, разупрочнение материала не произошло (табл.3).

Таблица 3

**Изменение массы твердых сплавов и быстрорежущих сталей
при нагревании с 4-х часовой выдержкой**

	Сплав 50TiC– 50TiNi	Сталь P18	Сталь P6M5	Сплав ВК8
Изменение массы после нагрева до 620 °С, 10^{-3} кг	0	0,01	0,02	0,03
Изменение массы после нагрева до 820 °С, 10^{-3} кг	0,04	-	-	2,50

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что твердые сплавы на основе TiC со связующей фазой из никелида титана обладают достаточно высокой теплостойкостью до 820 °С. Этот факт способствует использованию новых разработанных материалов для изделий (дезинтегральных бил), работающих в условиях интенсивного изнашивания и значительных динамических нагрузок с уменьшением абразивного износа при температурах до 1000 °С.

Перспективным способом повышения прочности и твердости дезинтеграторных бил выбран наиболее доступный механический метод упрочнения твердых композитов – ТМО (термомеханическая обработка). При деформации твердосплавного композиционного материала (ТС КМ) происходит изменение микротвердости образцов. Причем глубина слоя, в котором происходит изменение свойств, достаточно большая (1,5...2 мм) [8]. ТМО втулок с внутренним диаметром 17 мм, внешним диаметром 25 мм и высотой 30 мм из сплавов состава (50TiC–40TiNi–10Ti) об.% и (50TiC–50TiNi) об.% выполнялась на лабораторной установке [8,9]. Обкатанные и упрочненные твердосплавные материалы в виде рабочих элементов измельчительной установки показали снижение абразивного износа при получении порошков из кварцевых песков в 1,5...2 раза, по сравнению с рабочими элементами, изготовленными из стали 40, 45, 110Г13. Деформационный характер упрочнения бил подтверждается тем, что твердость снижается отжигом при 1100 °С в течение 2 ч. Микротвердость отожженных бил снижается до микротвердости исходных материалов.

Библиографический список

1. Акимов В. В., Калачевский Б. А., Пластинина М. В. [и др.] Изучение процессов спекания и формирования структур сплавов на основе TiC с неравновесным состоянием связующей фазы TiNi // Омский научный вестник. 2002. Вып. 19. С. 76–78.
2. Акимов В. В., Корытов М. С. Влияние состава твердых сплавов TiC–TiNi на их твердость при повышенных температурах // Омский научный вестник. 2005. №3 (32). С. 111–112.
3. Акимов В. В., Мишуров А. Ф., Акимова Е. В. Жаростойкость безвольфрамовых твердых сплавов TiC–TiNi в зависимости от объемного состава композиции при нагреве до высоких температур // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59, № 10. С. 688–691.
4. Раковский В. С. Спеченные материалы в технике. М.: Металлургия, 1998. 263 с.

5. Панов В. С., Зайцев А. А. Твердые сплавы WC-Co, легированные карбидом тантала. Обзор // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. №2. С. 44-48.
6. Орданьян С. С., Пантелеев И. Б., Лукашова Т. В. Жаростойкость и жаропрочность легированных твердых сплавов WC-Co-Ni-RE(MN) // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2010. №2. С. 23-25.
7. Андриевский Р. А., Спивак И. И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе: справ. Челябинск: Металлургия, 1989. 368 с.
8. Акимов В. В., Кузнецов А. И., Попов А. Ю. [и др.] Деформационные упрочнения твердых композитов на основе TiC методом ТМО // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2005. № 4. С. 35-37.
9. Попов А. Ю., Васильев Н. Г., Рауба А. А. Термомеханическое упрочнение твердосплавных пластин, используемых для обточки колесных пар // Железнодорожный транспорт Сибири: проблемы и перспективы: докл. научн. практ. конф., 1989. Омск, 1989. С. 83.

УДК 621.9.048

Б.Ш. Алимбаева, М.Ю. Байбарацкая, Е.А. Черкасов

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ В РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. В работе рассматривается процесс синтеза наноструктурных покрытий с повышенными триботехническими свойствами методом электроискровой обработки. Анализируется влияние материала легирующих электродов и технологических режимов обработки на элементный и фазовый составы, топографию и триботехнические свойства синтезируемых покрытий. Показано значительное снижение скорости изнашивания полимерных контробразцов при трении по стали 15ХГН2ТА, модифицированной электроискровой обработкой в различных технологических условиях.

Ключевые слова: электроискровая обработка, легирующий электрод, фазовый состав, топография, элементный состав, скорость изнашивания, оптимизация.

Введение. Повышение требований к надежности и долговечности деталей машин и технологического оборудования стимулирует развитие методов их поверхностного упрочнения и повышения износостойкости. В зависимости от условий эксплуатации изделий применяются различные методы поверхностного модифицирования сталей и сплавов [1, 2]. Все известные методы имеют свои преимущества и область применения, но в полной мере не удовлетворяют современным требованиям к эффективности, универсальности и экономичности технологических процессов. Поэтому разработка эффективного, достаточно простого для освоения в промышленном производстве и экономичного метода повышения износостойкости остается актуальной научной и практической задачей. В последнее время наиболее перспективными являются высокоэнергетические методы поверхностного модифицирования [2], к которым относится и электроискровая обработка (ЭИО), позволяющая получать покрытия с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами. Формирование упрочненного слоя и тонкого покрытия при ЭИО происходит вследствие сложных плазмохимических и теплофизических процессов, реализуемых на

локальных участках поверхности обрабатываемой детали, при которых на поверхности детали формируется тонкое покрытие, состоящее из материала легирующего электрода (ЛЭ) – катода – и межэлектродной среды [2–4].

Целью настоящей работы является исследование влияния материалов ЛЭ и технологических условий электроискровой обработки на элементный и фазовый состав, топографию и триботехнические свойства покрытий, формируемых на поверхности стальных деталей.

Оборудование и методика эксперимента. Исследования проводились на образцах конструкционной легированной стали 15ХГН2ТА, широко применяющейся в промышленности. Поверхности образцов модифицировали ЭИО различными электродами: стандартный электрод марки Т15К6; электрод ИМХ2, в состав которого входит 50%WC-Co, 50%Ni-Cr-B-Si; электрод Ш2 с минеральным сырьем Дальневосточного региона на основе TiC-Ni-Cr-Al-ШЛК (шеелитовый концентрат CaWO₄) [5].

Электроискровая обработка выполнялась на установке ЭИЛ модели ИМЭИ-1001-IMES с технологическими режимами: емкость конденсаторов $C = 34\text{--}240$ мкФ; анодно-катодное напряжение $U = 80\text{--}160$ В; удельная продолжительность обработки $t = 2\text{--}4$ мин/см². Микрорельеф, характерные размеры структурных элементов в поверхностном слое образцов, модифицированных различными электродами, исследовали на сканирующем зондовом микроскопе NTEGRAPrima (НТ-МДТ, Россия) в режиме контактной атомно-силовой микроскопии (к-АСМ).

Исследование элементного состава покрытий проводили на растровом электронном микроскопе JeolJCM-5700 и рентгеновском энергодисперсионном спектрометре. Структуру и фазовый состав модифицированных покрытий исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker) в Cu-K_α излучении в области углов $2\theta = 5\text{--}120^\circ$.

Характеристики триботехнических свойств исследовали на специальной установке при схеме трения «палец–диск», контактном давлении $P = 2,66$ МПа и скорости скольжения $V = 1,20$ м/с. В качестве контробразцов применялись цилиндрические пальцы из полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ). Влияние технологических режимов электроискровой обработки на скорость изнашивания сопряженных полимерных контробразцов исследовали с использованием метода планирования полного многофакторного эксперимента типа $N = 2^3 = 8$ [6]. В качестве независимых факторов были приняты: X_1 – анодно-катодное напряжение между легирующим электродом и поверхностью образца; X_2 – разрядная емкость конденсаторов; X_3 – удельная продолжительность обработки. В качестве функции отклика принята скорость изнашивания полимерных контробразцов.

Результаты исследований и их обсуждение. При сближении легирующего электрода с поверхностью обрабатываемой детали напряженность электрического поля возрастает, между ними возникает искровой электрический разряд. Поток электронов устремляется к поверхности катода, кинетическая энергия заторможенных электронов аккумулируется в поверхностных слоях анода, переводя его в возбужденное состояние. Металл анода плавится, из него выделяется поток мелких частиц, направляющийся к поверхности катода. Частицы нагреваются, закипают, и при взаимодействии с поверхностью катода образуют сильные адгезионные связи и частично диффундируют на незначительную глубину, модифицируя поверхностный слой. Вслед за частицами движется анод, при механическом контакте электродов происходит второй импульс тока и в зоне взаимодействия развиваются диффузионные процессы переноса микрочастиц на катод, а также химические реакции и формирование неустойчивой модифицированной структуры. В таком режиме работы системы «анод–катод» вследствие развивающихся диссипативных процессов на поверхности катода формируется тонкий слой покрытия с устойчивой модифицированной структурой.

В рассмотренной термодинамической системе «анод–катод» электрический разряд, физически являющийся концентрированным потоком электронов (плотность мощности $10^7\text{--}10^{12}$ Вт/см²), взаимодействует с поверхностью металлического образца – катода в исходном состоянии. В кристаллической решетке металла вследствие высокоэнергетического взаимодействия резко повышается температура. Длительность активной фазы взаимодействия очень мала и не превышает $10^{-6}\text{--}10^{-5}$ с. Практически одновременно формируются диссипативные тепловые потоки и рассеяние теплоты с обрабатываемой поверхности. Благодаря этому развиваются процессы релаксации и диссипации тепловой энергии искрового разряда.

Высокая плотность мощности искрового разряда и малая продолжительность периода его активного взаимодействия затрудняет формирование устойчивых диссипативных каналов, что приводит к дисбалансу энергетических потоков. Избыточная доля энергии, превышающая диссипативную долю, расходуется на работу эрозионного поверхностного разрушения главным образом обрабатываемой детали – катода.

Таким образом, согласно рассмотренному процессу, перенос частиц материала анода происходит в промежутке времени от момента электрического пробоя межэлектродного пространства до момента ударного контакта электродов. Следовательно, за это время происходит два импульса тока, а вещество переносится в жидко-капельном распыленном состоянии, что способствует формированию тонкого покрытия на поверхности катода.

Результаты экспериментальных исследований влияния материалов ЛЭ на элементный состав синтезируемых покрытий на стальных образцах, обработанных электродами Т15К6, Ш2 и ИМХ2, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Элементный состав покрытий и поверхностного слоя образцов из стали 15ХГН2ТА

Образец	Химический элемент, %							
	Fe	Cr	Mn	Ni	Si	Ti	W	O
Сталь 15ХГН2ТА (исходная)	95,3	1,09	1,95	1,66				
Обработка ЛЭ Т15К6	54,87					12,34	32,8	
Обработка ЛЭ ИМХ2	23,73	14,39		58,02	3,86			
Обработка ЛЭ Ш2	47,05			7,32		29,56		16,07

Полученные результаты показывают, что элементный состав исходной поверхности стального образца отличается от состава покрытий, синтезированных электроискровой обработкой различными электродами. В составе покрытий не установлено наличие легирующих элементов стали 15ХГН2ТА: хрома, марганца, титана и никеля. При этом присутствуют вольфрам, кислород и кремний, что можно объяснить эрозией легирующих элементов и их малой концентрацией в стали, а также взаимодействием химических элементов электродов со сталью.

Исследование влияния ЭИО на фазовый состав покрытий показало, что обработка стандартным электродом Т15К6 приводит к образованию в поверхностном слое карбида титана (TiC), а также фаз: (CrTi)₂O₃ и FeO в незначительном количестве. При этом пиков от некоторых кристаллических фаз исходного материала не наблюдается.

В результате ЭИО легирующим электродом ИМХ2 на поверхности образцов образуется покрытие сложной структуры, включающей интерметаллиды с участием железа, хрома и никеля (FeNi₃, CrNiW) и твердого раствора CrFe.

Поверхностный слой, сформированный при обработке электродом Ш2, содержит фазы: FeC, CrFe, CrTiC и Cr₂O₃.

Топография покрытий, полученных электроискровой обработкой различными легирующими электродами, показана на рисунке 1.

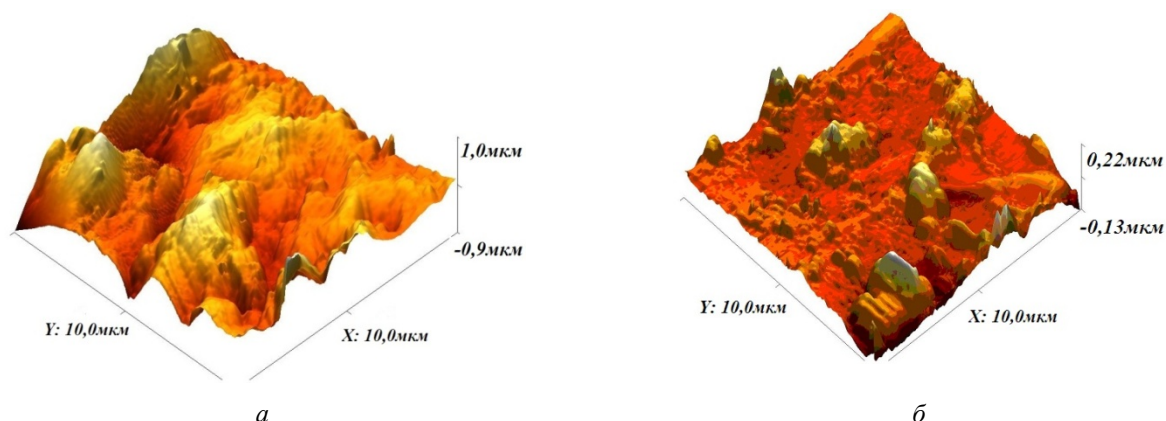


Рис. 1. Топография поверхности образцов, обработанных электродами: Т15К6 (а); ИМХ2 (б)

Характерные размеры структурных элементов (D) покрытий, высотные параметры шероховатости: среднее арифметическое отклонение профиля (R_a), глубина наибольшей впадины (R_v) и высота наибольшего выступа (R_p) профиля поверхностей образцов, обработанных различными ЛЭ, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры поверхности исходного и модифицированных образцов

Образец	D , нм	R_a , мкм	R_p , нм	R_v , нм
Сталь 15ХГН2ГА	2000-2500	$\approx 1,6$	379,0	344,8
Обработка ЛЭ Т15К6	200-250	$\approx 2,5$	477,3	378,5
Обработка ЛЭ Ш2	150-200	$\approx 3,2$	504,1	485,7
Обработка ЛЭ ИМХ2	250-300	$\approx 6,3$	538,3	484,4

Полученные значения характерных размеров структурных элементов покрытий показывают, что они уменьшаются в 8–13 раз (до 150–200 нм) по сравнению с исходным состоянием образцов. Минимальные размеры параметра D получены при обработке электродом Ш2.

Приведенные результаты показывают, что параметры (R_a , R_p и R_v) изменяются в зависимости от материала легирующего электрода. Они увеличиваются в следующем порядке: исходное состояние поверхности $\rightarrow$ обработка электродом Т15К6 $\rightarrow$ обработка электродом Ш2 $\rightarrow$ обработка электродом ИМХ2. При этом, параметр R_a увеличивается в 1,5–3,9 раза по сравнению с исходным состоянием поверхности образца.

Триботехнические свойства структур, формирующихся на стальной основе при ЭИО, оценивали по скорости изнашивания полимерных контрообразцов при трении скольжения по поверхности стальных образцов, обработанных электродом ИМХ2. Этот электрод выбран по результатам предварительных исследований [7, 8]. Установлено, что скорость изнашивания полимерных контрообразцов в металлополимерной паре трения уменьшается в 1,7 раза при трении по наноструктурному покрытию стального образца.

Оптимизационное исследование методом «крутого восхождения» позволило установить область оптимальных режимов электроискровой обработки: напряжение $U \approx 145\text{--}150$ В, емкость конденсаторов $C \approx 225\text{--}230$ мкФ, обеспечивающие максимальное снижение скорости изнашивания. Следовательно, вышеуказанный технологический режим целесообразно рекомендовать для ЭИО металлических деталей металлополимерных пар трения в качестве оптимального.

Заключение

1. Электроискровая обработка стальных поверхностей легирующими электродами различного химического состава приводит к образованию в поверхностном слое и покрытии различных фаз: карбидов FeC, TiC, интерметаллидов железа, хрома, никеля, вольфрама, а также твердых растворов и оксидов железа.

2. Методом контактной атомно-силовой микроскопии установлено значительное (в 8–13 раз) уменьшение характерных размеров структурных элементов (D) в сформированных покрытиях, что свидетельствует о ЭИО наноструктурных покрытий на исходных стальных поверхностях.

3. Методами планирования факторного эксперимента и оптимизации режимов электроискровой обработки установлены оптимальные режимы обработки: напряжение $U = 145\text{--}150$ В, емкость конденсаторов $C = 225\text{--}230$ мкФ, удельная продолжительность обработки $t = 3\text{--}4$ мин/см², обеспечивающие наибольшее снижение скорости изнашивания полимерного контртела.

Библиографический список

1. Машков Ю. К., Кропотин О. В. Трибофизика и структурная модификация материалов трибосистем: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. 324 с.
2. Коротаев Д. Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием: моногр. Омск: СибАди, 2009. 256 с.
3. Коротаев Д. Н., Иванова Е. В. Управление активационно-диссипативными процессами при электроискровом легировании стальной поверхности // Физика и химия обработки материалов. 2010. №6. С. 81-84.
4. Mashkov Y. K., Korotaev D. N., Baybaratskaya M. Y., Alimbaeva B. S. Research and optimization of technological modes of electro-spark processing details of tribosystem // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2014, IEEE 2015. С. 7005682.
5. Николенко С. В., Верхотуров А. Д. Новые электродные материалы для электроискрового легирования. Владивосток: Дальнаука, 2005. 218 с.
6. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. М. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228 с.
7. Машков Ю. К., Коротаев Д. Н., Алимбаева Б. Ш. [и др.] Влияние электроискровой обработки на структуру и свойства модифицированных поверхностей трения // Трение и износ. 2016. Т. 37, № 1. С. 83-88.
8. Mashkov Y. K., Baybaratskaya M. Y., Alimbaeva B. S. Enhancement of mechanical and tribotechnical properties of structural steel by electrical discharge machining // Inorganic materials: Applied research. 2016. Т. 7, № 1. С. 115-118.

УДК 621.9.015, 539.975

А.И. Блесман, Г.Н. Камишилов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА AG-ПЛЕНКИ, ПОЛУЧЕННОЙ МАГНЕТРОННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

Аннотация. Проведена попытка нанесения твердой тонкой пленки на сталь и исследования свойств полученной поверхности. Экспериментальное напыление проводилось на установке магнетронного распыления ADVAVACVSM-200. Поверхность заготовок изучалась на зондовом микроскопе NTEGRA-PRIMA. Показана поверхность осажденного слоя серебра. Показаны результаты статистики величины шероховатостей нанесённой плёнки на стальную матрицу. В совокупности полученные результаты показали возможный потенциал применения напыленной пленки в электрических контактах.

Ключевые слова: магнетронное распыление, тонкие плёнки, зондовая микроскопия, шероховатость.

Нанесение тонких пленок на поверхности материалов – одна из самых изучаемых тем последнего десятилетия. Актуальность исследований тонкопленочных покрытий заключается в возможности их нанесения на матрицы различного вида форм. Для определения свойств нанесенного слоя пленки необходимо исследовать полученный микрорельеф, от которого напрямую зависят технологические параметры материала. Однако качество микрорельефа целиком опирается на выбранный метод нанесения пленки на материал.

К одним из самых современных способов нанесения тонких пленок на поверхность материала относится метод магнетронного напыления, отличительной особенностью которого является наличие двух скрещенных полей – электрического и магнитного. Принцип действия магнетронного распылительного устройства основан на свойствах катодной области аномального тлеющего газового разряда, подвергающегося ионной бомбардировке, вследствие которого происходит распыление мишени. Магнитное поле, приложенное в области катода перпендикулярно электрическому, позволяет снизить рабочее давление плазмообразующего газа без уменьшения интенсивности ионной бомбардировки и улучшить условия перемещения распыляемого вещества к подложке. За счет уменьшения рассеивания, вызванного соударениями с молекулами газа, между подложкой и катодом возникает зона низкотемпературной плазмы. Распыляемые частицы осаждаются в виде тонкого слоя, а также частично рассеиваются и осаждаются на стенках рабочей камеры [1].

Процесс получения пленочных покрытий протекает следующим образом. После начала работы распылителя на поверхности подложки начинается образование и последующий рост зародышей. Образование зародышей обусловлено взаимодействием двух и более атомов на поверхности подложки, с образованием химической связи. Будучи связанными, атомы не могут проникнуть вглубь подложки и остаются на поверхности, присоединяя к себе новые атомы. Так образуются совокупность адсорбированных атомов, имеющих предрасположенность к дальнейшему росту, который происходит за счет присоединения перемещающихся по поверхности атомов, падающих атомов и более мелких кластеров. Таким образом, на поверхности формируется сеть объединенных кластеров, до тех пор, пока не образуется сплошная поликристаллическая пленка.

К достоинствам метода магнетронного напыления тонких пленок относят универсальность и относительную простоту реализации. На фоне остальных способов нанесения тонкопленочных покрытий метод магнетронного напыления является очень выгодным в силу возможности достаточно точно регулировать толщину наносимого металлического слоя, от которого напрямую зависит его сопротивление, что очень важно при создании структур с определенной проводимостью. Таким образом, данный метод позволяет получать тонкие пленки высокого качества с рекордными физическими характеристиками (толщина, пористость, адгезия и пр.), а также проводить послойный синтез новых структур, создавая пленку буквально на уровне атомных плоскостей [1].

Для получения детализированной и исчерпывающей информации о полученной твердой тонкой пленке применяют электронную микроскопию, рентгеновскую спектроскопию и другие методы, разработанные для исследования поверхности твердых тел [2-5].

В данной работе представлены аспекты исследований, направленных на осуществление метода получения Ag-пленок нанометровой толщины, а также результаты исследования некоторых топологических особенностей полученного тонкого слоя серебра, нанесенного на стальную матрицу.

Эксперимент. Для получения поликристаллических пленок серебра нанометровой толщины использовался описанный ранее метод магнетронного распыления. После напыления слоя серебра на матрицу были проведены топологические исследования полученной пленки при помощи зондового микроскопа.

Результаты. Получена фотография нанесенной на матрицу пленки размера 5x5 мкм, представленная на рисунке 1.

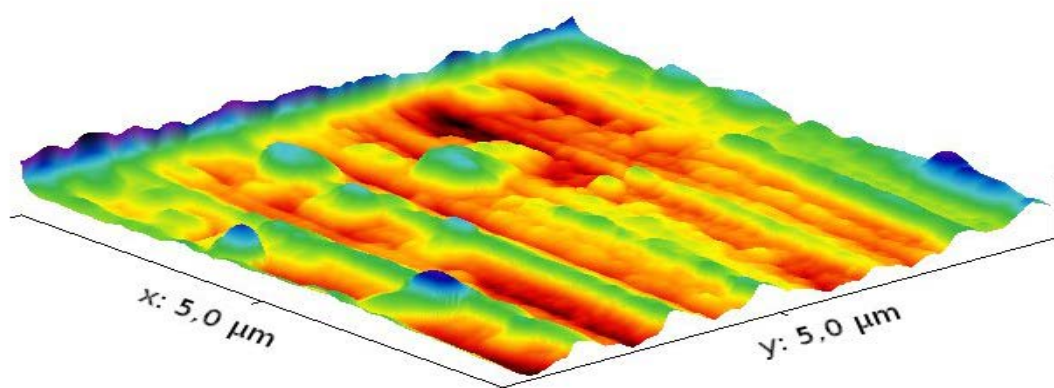


Рис. 1. Топография поверхности участка образца

Ниже в таблицах 1 и 2 представлены статистические величины нанесенного тонкопленочного покрытия на стальную матрицу и исследованы параметры шероховатости полученной поверхности.

Таблица 1

Статистические величины

Среднее значение	4155,5 nm
Минимум	4096,0 nm
Максимум	4277,7 nm
Срединное	20,9 nm
Ra	20,9 nm
Rms	26,1 nm
Rms (зёрен)	26,1 nm
Асимметрия	0,704
Эксцесс	0,697
Площадь поверхности	21,9716 μm^2
Площадь проекции	21,4072 μm^2
Наклон θ	0,1 deg
Наклон ϕ	66,2 deg

Таблица 2

Параметры шероховатости

Средняя шероховатость (Ra)	5,5 nm
Среднеквадратичная шероховатость (Rq)	6,8 nm
Максимальная высота шероховатости (Rt)	34,4 nm
Максимальная глубина впадины шероховатости (Rv)	19,3 nm
Максимальная высота пика шероховатости (Rp)	15,1 nm
Средняя максимальная высота шероховатости (Rtm)	26,4 nm
Средняя максимальная глубина долины шероховатости (Rvm)	14,3 nm
Средняя максимальная высота пика шероховатости (Rpm)	12,1 nm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины (R3z)	26,3 nm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины (R3z ISO)	9,7 nm
Средняя максимальная высота профиля (Rz)	24,8 nm
Средняя максимальная высота шероховатости (Rz ISO)	26,4 nm
Коэффициент асимметрии (Rsk)	-0,203
Эксцесс (Rku)	2,737
Средняя волнистость (Wa)	4142,8 nm
Среднеквадратичная волнистость (Wq)	4142,8 nm
Максимальная высота волнистости (Wy=Wmax)	4190,2 nm
Максимальная высота профиля (Pt)	4198,8 nm

Вывод. Отработаны режимы магнетронного напыления тонких Ag-пленок на металлическую матрицу. Получены плотноупакованные, мелкодисперсные по структуре пленки Ag толщиной до 0,1 мкм. Средняя высота микронеровностей не превышает 26,5 нм. Возможно получение такого рода площадок электрического контакта произвольной формы при использовании масок, наносимых на матрицу.

Библиографический список

1. Иванов А. Технология напыления тонких пленок // Современная светотехника. 2010. Вып. 1. С. 45-48.
2. Folkenant M., Nygren K., Malinovskis P. [et al.] Structure and properties of Cr-C/Ag films deposited by magnetron sputtering // Surface and Coatings Technology. 2015. Vol. 281, P. 184-192. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.09.054.
3. Ju Hongbo, Xu Junhua Microstructure and tribological properties of NbN-Ag composite films by reactive magnetron sputtering // Applied Surface Science. 2015. Vol. 355, P. 878-883. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.07.114.
4. Ju Hongbo, Yu Lihua, Yu Dian [et al.] Microstructure, mechanical and tribological properties of TiN-Ag films deposited by reactive magnetron sputtering // Vacuum. 2017. Vol. 341, P. 82-88. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.03.026.
5. Francq R., Snyders R., Cormier P.-A. Structural and morphological study of ZnO-Ag thin films synthesized by reactive magnetron co-sputtering // Vacuum. 2017. Vol. 137, P. 1-7. DOI:10.1016/j.vacuum.2016.10.024.

УДК 621.317.3

А.А. Кабанов, В.Ф. Ковалевский, Ю.А. Фоминых, А.И. Щелканов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕДУКЦИИ ГИТАРЫ ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА НА БАЗЕ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ И ХОЛЛОВСКОГО ДАТЧИКА УГЛОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы использования сенсорных элементов Холла в целях минимизации погрешностей технологического металлообрабатывающего оборудования. Проведен анализ параметров существующих датчиков линейных перемещений.

Ключевые слова: токарно-винторезный станок, коэффициент редукции гитары, погрешность, линейные перемещения.

Отечественные машиностроительные предприятия располагают огромным парком универсальных токарно-винторезных станков, техническое состояние которых не обеспечивает выпуск продукции с необходимыми метрологическими характеристиками. Действительно, технологическое обеспечение широкой номенклатуры нарезаемых резьб предполагает существенные затраты времени и материальных средств на перестройку коэффициента редукции гитары станка. Для этого необходимо располагать весьма

громоздким набором зубчатых шестерен с прецизионным эвольвентным профилем, причем число таких шестерен может достигать нескольких десятков.

Предварительные технико-экономические расчеты затрат на проведение модернизации станочного парка выявили перспективность внедрения современных микроконтроллерных средств и прогрессивных первичных измерительных преобразователей непосредственно в состав конкретного металлорежущего оборудования.

Изменение параметров нарезаемой резьбы достигается путем изменения коэффициента редукции гитары, передающей вращающий момент со шпинделя передней бабки токарного станка на ходовой винт, обеспечивающий необходимое перемещение резьбонарезного резца, размещенного в держателе инструмента на фартуке токарного станка. В конечном счете, метрологические характеристики нарезаемой резьбы определяются точностью коэффициента редукции гитары.

К сожалению, получение широкого ряда шагов резьбы ограничивается параметрами (числом зубьев) шестерен гитары, что в принципе определяет недостаточно широкие функциональные возможности оборудования.

Появление в современной технике таких прецизионных электромеханических устройств, как шаговые двигатели, позволит организовать функциональную связь между параметрами вращения шпинделя и ходового винта без использования шестеренчатых передач. Дискретное перемещение ротора шагового двигателя определяет шероховатость поверхности профиля нарезаемой резьбы. При этом вкладом дискретности перемещения резца в результирующую шероховатость можно пренебречь ввиду его несоизмеримости с вкладом микрогеометрии режущей части резца, что оставляет на весьма приемлемом уровне потребительские свойства выпускаемой продукции.

На сегодняшний день в литературе описано большое количество алгоритмов управления шаговыми двигателями. В структуре прикладного программного обеспечения библиотеки-драйвера шаговых двигателей являются стандартными компонентами, в силу чего инженеру-разработчику достаточно остановить свой выбор на конкретном типе шагового двигателя и удобном с точки зрения практики алгоритме его управления.

Наиболее актуальной задачей в плане получения высоких метрологических характеристик станка является выбор первичного измерительного преобразователя углового перемещения шпинделя. Действительно, эта величина является определяющей с точки зрения метрологии. При этом весьма важное значение приобретают динамические характеристики датчиков, определяющие в конечном итоге производительность оборудования.

Анализ доступных для использования датчиков углового перемещения выявил перспективность современных твердотельных прецизионных датчиков на основе эффекта Холла.

Эффект Холла возникает в кристалле полупроводника под действием магнитного поля и заключается в появлении перпендикулярно направлению тока I и магнитного поля B так называемой э.д.с. Холла. Значение э.д.с. пропорционально магнитной индукции поля. Причиной эффекта Холла является отклонение заряженных частиц, движущихся в магнитном поле, под действием силы Лоренца. Эффект Холла используется в измерительной технике, радиоэлектронной аппаратуре, датчиках тока с гальванической развязкой, бесконтактных датчиках частоты вращения и датчиках угла поворота. Преимущества использования датчиков на эффекте Холла — высокое быстродействие и надежность, обусловленные отсутствием движущихся частей.

На рис. 1 приведена структурная схема типичного датчика Холла.

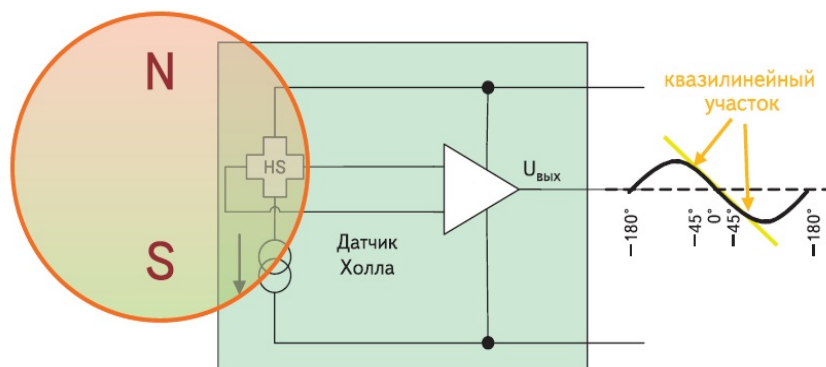


Рис.1. Датчик угловых перемещений на основе эффекта Холла

Вращение вала с установленным на нем магнитом будет изменять магнитную индукцию над датчиком Холла, а по значению величины магнитного поля можно делать вывод об угловом перемещении вала.

Использование датчиков угловых перемещений на основе эффекта Холла позволяет быстро и точно производить измерение угла. Отсутствие движущихся контактных частей в системе измерения угла поворота обеспечивает высокую надежность. Исполнение датчика в виде чипа позволяет использовать датчик угловых перемещений на основе эффекта Холла в достаточно жестких условиях окружающей среды.

В настоящее время существует множество датчиков угловых перемещений на основе эффекта Холла. Датчики, выпускаемые фирмой «Austriamicrosystems», содержат на кристалле ряд узлов, обеспечивающих температурную коррекцию номинальной статической характеристики, а также элементы цифровой обработки выходных сигналов элементов Холла. Погрешности преобразования угловых характеристик могут достигать сотых и тысячных долей угловых градусов.

Устройство работает следующим образом. Датчик углового перемещения монтируется на шпинделе (ведущей шестерне) станка, ходовой винт стыкуется с валом шагового двигателя (ведомая шестерня), между ними имеет место электронный редуктор с переменным коэффициентом редукции. Численное значение выходного кода углового датчика делится на требуемый коэффициент редукции – получается необходимое число управляющих импульсов для драйвера шагового двигателя.

Реализация алгоритма обеспечивается за счет использования микроконтроллера Arduino Mega2560 с необходимыми периферийными элементами (функциональная клавиатура и дисплейный модуль).

Макетный образец реализует 8 дискретных значений линейных скоростей движения резца с шагом 0,03 мм в диапазоне от 0,03 мм до 0,24 мм при частоте вращения шпинделя до 3000 об/мин. Диапазон шагов нарезаемой резьбы включает 38 резьб, как метрических (0,2 мм...3 мм), так и дюймовых с шагом от 80 до 10 ниток на дюйм. Угловая скорость вращения шпинделя ограничена сверху значением 1500 об/мин.

Дополнительной весьма полезной функцией предлагаемого устройства является режим делителя шпинделя для выполнения фрезерных работ с дополнительным фрезерным шпинделем. Кроме того, реализуется программная защита от недопустимых перемещений инструмента.

Библиографический список

1. Janisch J. Understanding Integrated Hall Effect Rotary Encoders. Analog Devices. Nov 1, 2006.
2. URL: <http://www.ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Rotary-Magnetic-Position-Sensors/AS5048A>

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ

Аннотация. Разработаны основанная на рентгенографических параметрах структуры математическая модель и на языке программирования C# компьютерная программа расчета рентгеновской плотности аморфно-кристаллических полимеров, аморфная фаза которых характеризуется наличием упорядочения. На примере политетрафторэтилена показано, что плотность матрицы при конкретных значениях рентгенографических параметров структуры линейно возрастает при увеличении степени упорядочения. При постоянном значении степени упорядочения она возрастает при увеличении степени кристалличности и уменьшении среднего межслоевого расстояния в аморфной фазе ПТФЭ.

Ключевые слова: структура, фаза, ячейка, степень упорядочения, степень кристалличности.

Введение. Плотность композитов на основе аморфно-кристаллических полимеров является одной из величин, характеризующих их структуру и различные свойства в исходном состоянии материала и их изменение при различных воздействиях. При этом обычно плотность композитов определяют экспериментальными методами, среди которых наиболее применяемыми являются метод гидростатического взвешивания и пикнометрический метод [1, 2]. Теоретический расчет плотности аморфно-кристаллических полимеров производится по формуле [3]:

$$\rho_{\text{ПТФЭ}} = \chi \rho_{\text{кр}} + (1 - \chi) \rho_{\text{ам}}, \quad (1)$$

где степень кристалличности χ характеризует массовую долю кристаллической фазы в объеме матрицы. Плотности кристаллической $\rho_{\text{кр}}$ и аморфной $\rho_{\text{ам}}$ фаз вычисляются через массовые соотношения двух фаз, при этом аморфная фаза априори считается неупорядоченной частью матрицы.

В области рентгеноструктурного анализа расчет так называемой рентгеновской плотности можно провести для кристаллического вещества на основе значений параметров кристаллической ячейки по соответствующей формуле, представленной в [4]. Рентгенограмма аморфно-кристаллического полимера (на примере ПТФЭ) имеет сложный вид [2, 5]. Надмолекулярную структуру (НДС) кристаллической фазы аморфно-кристаллического полимера могут представлять кристаллиты, монокристаллы, фибриллы, сферолиты, в которых наблюдается идеальная кристаллическая решетка, построенная из элементарных ячеек и характеризующаяся единой ориентацией кристаллографических осей. Поэтому от кристаллической фазы на рентгенограмме ПТФЭ получается серия четко выделенных дифракционных рефлексов. Если бы аморфная фаза была полностью неупорядоченной, то линия фона на рентгенограмме ПТФЭ имела бы вид ниспадающей к большим углам дифракции монотонной кривой рассеяния. Однако, в области расположения рефлексов (00L) наблюдаются участки аморфных гало, что говорит о некотором упорядочении в аморфной фазе полимера по определенным кристаллографическим направлениям. Кроме того, на электронно-оптических снимках ПТФЭ наблюдаются хаотически расположенные кристаллические образования более мелких размеров по сравнению с кристаллической фазой в виде глобул, пачек, доменов или кластеров [1, 3], которые могут условно иметь деформированную кристаллическую решетку и давать на

рентгенограмме рефлексы, сконцентрированные в определенных угловых интервалах в виде участков аморфных гало.

В настоящее время об упорядочении в аморфной фазе ПТФЭ говорится все чаще, например, в работах [6, 7]. Применяя для исследования образцов ПТФЭ методику количественного рентгеновского анализа, авторы работы [7] прямо предполагают наличие в структуре ПТФЭ трех фаз: кристаллической и двух аморфных фаз, одна из которых представляет собой низкомолекулярные продукты.

Предлагаемая авторами настоящей статьи математическая модель расчета плотности аморфно-кристаллического полимера основана на наличии рентгенографических сведений о структурных параметрах матрицы полимера, определяемых из его рентгенограммы, полученной по большеугловой методике дифракции рентгеновского излучения. При этом предполагается, что матрица полимера состоит из двух фаз: аморфной и кристаллической. При этом массовая доля аморфной фазы полимера состоит из двух частей: условно упорядоченной части, имеющей степень упорядочения α и характеризуемой наличием деформированной кристаллической ячейки и полностью неупорядоченной части без наличия кристаллической решетки. Поскольку между упорядоченной и неупорядоченной частями аморфной фазы нет четкой границы раздела, то мы не говорим о наличии третьей фазы. Тогда аналогично формуле (1) для плотности аморфной фазы можно записать:

$$\rho_{\text{ам}} = \alpha \rho_{\text{ам,уп}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{ам,неуп}} \quad (2)$$

Подставляя формулу (2) в формулу (1), получаем выражение для вычисления рентгеновской плотности аморфно-кристаллических полимеров:

$$\rho_{\text{ПТФЭ}} = \chi \rho_{\text{кр}} + \alpha (1 - \chi) \rho_{\text{ам,уп}} + (1 - \alpha) (1 - \chi) \rho_{\text{ам,неуп}} \quad (3)$$

Вычисление рентгеновской плотности ПТФЭ проводится через последовательный расчет отдельных плотностей: $\rho_{\text{кр}}$, $\rho_{\text{ам,уп}}$ и $\rho_{\text{ам,неуп}}$. Первые выводы по расчету рентгеновской плотности ПТФЭ приведены в работе [5].

Цель работы. В данной работе предлагается алгоритм последовательных действий с компьютерной программой, разработанной на языке программирования C# для расчета плотности чистого ПТФЭ, и проводится дальнейший анализ формулы (3).

Блок-схема программы. Программный код (блок-схема) для расчета рентгеновской плотности ПТФЭ написан в программе Microsoft Visual Studio на языке C#. Microsoft Visual Studio представляет собой полнофункциональную интегрированную среду разработки для приложений на ОС Android, IOS, Windows. Разработанная компьютерная программа содержит три независимых расчетных блока: рентгенографический (блок 1), расчет плотностей отдельных фаз (блок 2) и расчет плотности матрицы полимера (блок 3). Это позволяет производить анализ результатов плотностей всех упомянутых выше частей матрицы на любом этапе программы.

Блок 1. Рентгенограмма ПТФЭ имеет сложный вид и содержит дифракционные максимумы от кристаллических областей матрицы ПТФЭ, а также участки аморфных гало от отражающих плоскостей (00L) [5]. Из рентгенограммы определяются и вводятся в программу первого блока следующие величины, характеризующие структуру ПТФЭ: длина волны рентгеновского излучения λ ; углы дифракции кристаллических рефлексов θ_{100} , θ_{003} , угол дифракции $\theta_{(003)\text{ам}}$, соответствующий положению центра тяжести аморфного гало; площади $Q_{\text{кр}}$ и $Q_{\text{ам}}$, занимаемые на рентгенограмме под кристаллическими рефлексами и аморфным гало. По этим данным программа по соответствующим формулам рентгеновской кристаллографии [2, 4] вычисляет и выдает значения величин, описывающих структуру полимерной матрицы:

параметры кристаллической гексагональной ячейки ПТФЭ

$$a = b = \sqrt{\frac{\lambda^2}{3(\sin\theta)_{100}^2}}, \quad c = \sqrt{\frac{9\lambda^2}{4(\sin\theta)_{003}^2}};$$

среднее межслоевое расстояние

$$C_{ам} = \sqrt{\frac{9\lambda^2}{4(\sin\theta)_{003,ам}^2}};$$

степень кристалличности

$$\chi = \frac{Q_{кр}}{Q_{кр} + Q_{ам}};$$

степень деформации кристаллической ячейки

$$\varepsilon = \frac{|c - C_{ам}|}{c};$$

объем идеальной гексагональной ячейки кристаллической фазы

$$V_{кр} = 0,866 abc;$$

объем деформированной ячейки упорядоченной части аморфной фазы

$$V_{ам} = 0,866 abC_{ам}.$$

Блок 2. В программу второго блока вводятся: M – молярная масса ПТФЭ ($M = 0,75$ кг/моль), N_A – число Авогадро и рассчитанные первым блоком величины: $V_{кр}$, $V_{ам}$ и ε . По этим данным второй блок программы по соответствующим формулам вычисляет плотности отдельных фаз ПТФЭ:

плотность кристаллической фазы

$$\rho_{кр} = \frac{M}{N_A V_{кр}};$$

плотность упорядоченной части аморфной фазы

$$\rho_{ам,уп} = \frac{M}{N_A V_{ам}};$$

плотность неупорядоченной части аморфной фазы

$$\rho_{ам,неуп} = \varepsilon \cdot \rho_{кр}.$$

Блок 3. В третьем блоке программы на основе вычисленных вторым блоком плотностей $\rho_{ам,уп}$ и $\rho_{ам,неуп}$ производится вычисление плотности аморфной фазы $\rho_{ам}$ по формуле (2) с учетом степени упорядочения α аморфной фазы и плотности ПТФЭ $\rho_{ПТФЭ}$ по формуле (1) с учетом степени кристалличности χ матрицы.

Таким образом, блоковая система программы позволяет производить анализ последней формулы в зависимости от разных величин, характеризующих структуру матрицы ПТФЭ, а именно, зависимости $\rho_{\text{ПТФЭ}}$ от величин α , χ и $C_{\text{ам}}$.

Обсуждение теоретических результатов. За основу расчета плотности принята конформация ПТФЭ с химической формулой $[CF_2 - CF_2]_{15/7}$, по которой спираль из макромолекул ПТФЭ раскручивается и состоит из 7 витков и 15 групп CF_2 , образуя гексагональную решетку с параметрами: $a = b = 0,564$ нм; $c = 1,68$ нм; $\alpha = \beta = 90^\circ$; угол $\gamma = 120^\circ$ [1, 2].

Рентгенографические данные структуры образца ПТФЭ, вычисленные из его рентгенограммы и используемые созданной компьютерной программой для расчетов плотностей фаз, следующие: параметры гексагональной идеальной кристаллической ячейки $a = 0,564$ нм и $c = 1,68$ нм; вычисленное по положению центра тяжести аморфного гало среднее межслоевое расстояние в аморфной фазе полимера $C_{\text{ам}} = 1,60$ нм; степень деформации кристаллической ячейки в упорядоченной части аморфной фазы $\varepsilon = 4,76$ %; степень кристалличности $\chi = 63$ %, степень упорядочения аморфной фазы $\alpha = 0,46$.

В работе [5] показано, что плотность кристаллической фазы ПТФЭ, вычисленная по табличным параметрам кристаллической ячейки, равна $\rho_{\text{кр}} = 2,69 \cdot 10^3$ кг/м³. Плотность аморфной фазы с учетом ее упорядочения в разумных пределах в интервале значений $\alpha = 0,3 - 0,7$ меньше плотности кристаллической фазы, что соответствует литературным данным. При неизменных значениях структурных параметров плотность ПТФЭ линейно увеличивается при возрастании степени упорядочения α .

В данной статье для этого же образца ПТФЭ приводятся результаты дополнительного исследования зависимостей рентгеновской плотности от структурных параметров матрицы при неизменном и конкретном значении степени упорядочения $\alpha = 0,46$. Это значение было получено путем решения обратной задачи формулы (2) при значении экспериментально измеренной методом гидростатического взвешивания плотности ПТФЭ, равной $\rho_{\text{экс.}} = 2,20 \cdot 10^3$ кг/м³.

Плотности $\rho_{\text{ам.уп.}}$, $\rho_{\text{ам.неуп.}}$ и $\rho_{\text{ПТФЭ}}$ при разных значениях степени кристалличности χ , но одинаковом значении среднего межслоевого расстояния приведены в табл. 1. Вычисления значений всех плотностей выполнены для трёх значений величины $C_{\text{ам}}$: 1,50; 1,58; 1,65 нм.

Таблица 1

Рентгеновская плотность фаз ПТФЭ в зависимости от степени кристалличности

$C_{\text{ам}}$ нм	χ %	$\rho_{\text{ам.неуп.}}$ г/см ³	$\rho_{\text{ам.уп.}}$ г/см ³	$\rho_{\text{ам}}$ г/см ³	$\rho_{\text{ПТФЭ}}$ г/см ³
1,50	30	0,288	3,014	1,542	1,886
	45	0,288	3,014	1,542	2,059
	60	0,288	3,014	1,542	2,231
	75	0,288	3,014	1,542	2,403
1,58	30	0,160	2,861	1,403	1,789
	45	0,160	2,861	1,403	1,982
	60	0,160	2,861	1,403	2,175
	75	0,160	2,861	1,403	2,368
1,65	30	0,048	2,740	1,286	1,707
	45	0,048	2,740	1,286	1,918
	60	0,048	2,740	1,286	2,129
	75	0,048	2,740	1,286	2,339

Из табл. 1 видно, что при конкретном значении величины $C_{\text{ам}} = 1,50$ нм при увеличении степени кристалличности χ с 30 % до 75 % плотность ПТФЭ возрастает на 27,4 % по отношению к первоначальному значению только за счет массового увеличения содержания кристаллической фазы в объеме матрицы, поскольку плотности всех ее частей остаются постоянными величинами. При значении $C_{\text{ам}} = 1,65$ нм плотность ПТФЭ возрастает

уже на 37 % по отношению к первоначальному значению. Таким образом, скорость увеличения плотности ПТФЭ возрастает при увеличении величины среднего межслоевого расстояния.

В табл. 2 представлены значения плотностей всех фаз от среднего межслоевого расстояния $C_{ам}$, но при постоянной величине степени кристалличности χ . Расчеты проведены для трех значений χ : 50, 60 и 80 %. Плотность ПТФЭ уменьшается при возрастании величины $C_{ам}$.

Из табл. 2 видно, что плотность ПТФЭ при конкретной величине χ определяется, во-первых, совокупностью значений плотностей всех фаз и, во-вторых, она уменьшается при возрастании величины $C_{ам}$. Так при увеличении значения $C_{ам}$ от 1,50 до 1,65 нм величины $\rho_{ам,неуп.}$, $\rho_{ам,уп.}$, $\rho_{ам.}$ и $\rho_{ПТФЭ}$ соответственно уменьшились на 83,3; 9,1 %; 16,6 и 6 %. При значении степени кристалличности $\chi = 80$ % уменьшение соответствующих величин в процентном соотношении не изменяется, кроме величины $\rho_{ПТФЭ}$, которая уменьшилась на 2 %. При возрастании степени кристалличности с 50 до 80 % скорость уменьшения плотности ПТФЭ уменьшилась в 3 раза. Таким образом, скорость уменьшения плотности ПТФЭ возрастает при увеличении величины степени кристалличности.

Таблица 2

Рентгеновская плотность фаз ПТФЭ в зависимости от среднего межслоевого расстояния

χ %	$C_{ам}$ нм	$\rho_{ам,неуп.}$ г/см ³	$\rho_{ам,уп.}$ г/см ³	$\rho_{ам.}$ г/см ³	$\rho_{ПТФЭ.}$ г/см ³
50	1,50	0,288	3,014	1,542	2,116
	1,55	0,208	2,916	1,454	2,072
	1,60	0,128	2,826	1,369	2,029
	1,65	0,048	2,740	1,286	1,988
60	1,50	0,288	3,014	1,542	2,231
	1,55	0,208	2,916	1,454	2,196
	1,60	0,128	2,826	1,369	2,162
	1,65	0,048	2,740	1,286	2,129
80	1,50	0,288	3,014	1,542	2,460
	1,55	0,208	2,916	1,454	2,443
	1,60	0,128	2,826	1,369	2,426
	1,65	0,048	2,740	1,286	2,409

Выводы

1. Разработана методика и компьютерная программа расчета плотностей отдельных фаз и плотности матрицы аморфно-кристаллических полимеров на примере ПТФЭ в области применения рентгеноструктурного анализа.

2. Теоретические расчёты показывают, что в области реализуемых интервалов значений степени кристалличности $\chi = (50-70)$ % и среднего межслоевого расстояния $C_{ам} = (1,55-1,65)$ нм плотность ПТФЭ можно считать слабо изменяющейся величиной и равной $\rho_{ПТФЭ} = (2,20-2,30)$ г/см³, что является очень важным фактором при техническом применении ПТФЭ.

3. При любом реальном значении степени упорядочения α плотность аморфной фазы ПТФЭ всегда меньше плотности кристаллической фазы, но плотность упорядоченной части аморфной фазы больше плотности кристаллической фазы.

4. Плотность ПТФЭ при конкретных значениях рентгенографических параметров структуры линейно возрастает при увеличении степени упорядочения. При постоянных значениях степени упорядочения и среднего межслоевого расстояния она возрастает при увеличении степени кристалличности. При постоянных значениях степени упорядочения и степени кристалличности она возрастает при уменьшении среднего межслоевого расстояния в аморфной фазе ПТФЭ.

5. Зависимости $\rho_{ПТФЭ} = f(\alpha)$, $\rho_{ПТФЭ} = f(\chi)$, $\rho_{ПТФЭ} = f(C_{ам})$ являются линейными при постоянных остальных структурных параметрах.

Библиографический список

1. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Суриков В. И., Калистратова Л. Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. М.: Машиностроение. 2005. 239 с.
2. Машков Ю. К., Калистратова Л. Ф., Овчар З. Н. Структура и износостойкость модифицированного политетрафторэтилена. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. 144 с.
3. Кропотин О. В., Акименко С. С. [и др.] // Омский научный вестник. 2014. № 1 (127). С. 22–26.
4. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Гос. Изд-во физ.-мат. лит., 1961. 863 с.
5. Киреев А. П., Калистратова Л. Ф. // Наука и молодежь в XXI веке: матер. 2-ой Всесоюзной научно-практической конференции, Омск, 5 декабря 2016. С. 106–110.1 электр. оптический диск. 4,8 Мб.
6. Kozlov G. V., Novikov V.U. // Physics-Uspekhi. 2001. Т. 44, № 7. С. 681–724.
7. Антипов Е. М., Игнатьева Л. Н. [и др.] Рентгеновское исследование кристаллической фазы в образцах политетрафторэтилена // Кристаллография. 2010. Т. 55, № 4. С. 651–656.

УДК 655.3.026

С.Н. Литунов, Д.Б. Пономарев, Ю.Д. Тоцакова

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ КРАСКИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ АКТИВАТОРА

Аннотация. В офсетной печати существует проблема структурирования краски. В статье представлено исследование проблемы неполного перемешивания офсетной краски. Проведено моделирование течения краски в красочном ящике с активатором. Построение модели позволило найти функцию, которая описывает течение в красочном ящике печатной машины. С помощью проведенного анализа линий тока будет возможно подобрать параметры течения, при которых образуются линии тока, для моделирования циркуляционного течения краски.

Ключевые слова: тиксотропия, офсетная краска, модель, офсетная печать.

Одна из проблем офсетной печати – это возникновение зон в красочном ящике, в которых краска не перемешивается, а движется как твердое тело [1]. Образование структуры в краске вызвано свойством тиксотропности печатных красок. В производстве используют периодическое перемешивание краски вручную или механические мешалки, что оказывает негативное воздействие на качество печатной продукции, ухудшает условия труда печатника. Нами предложено использовать активаторы, которые работают за счет сил вязкого трения [2, 3]. Предварительные эксперименты показали, что при некоторых соотношениях геометрических параметров красочного ящика и активатора, а также вязкости и количества краски указанные активаторы работают с разной эффективностью. Для оптимизации размеров и формы активаторов необходимо разработать математическую модель, которая позволит сократить материальные и временные затраты при разработке активаторов. На первом этапе разработки модели было необходимо разработать комплексный потенциал течения и построить картину течения с помощью линий тока.

Целью работы являлось построение модели, основанной на модели идеальной жидкости.

На первом этапе рассмотрим поток, который построен из поступательного потока и диполя.

Уравнение комплексного потенциала потока имеет вид:

$$\omega_1(z) = V_{\infty} \cdot z \cdot e^{-i\alpha} \quad (1)$$

Уравнение комплексного потенциала диполя имеет вид:

$$\omega_2(z) = V_{\infty} \cdot \frac{e^{-i\alpha} \cdot R^2}{z} \quad (2)$$

Комплексный потенциал потока представлен на рис. 1. Комплексный потенциал диполя представлен на рис. 2.

Картина линий тока при сложении комплексных потенциалов диполя и сплошного потока показана на рис. 3.

На рис.3. показано обтекание бесконечным поступательным потоком кругового цилиндра.

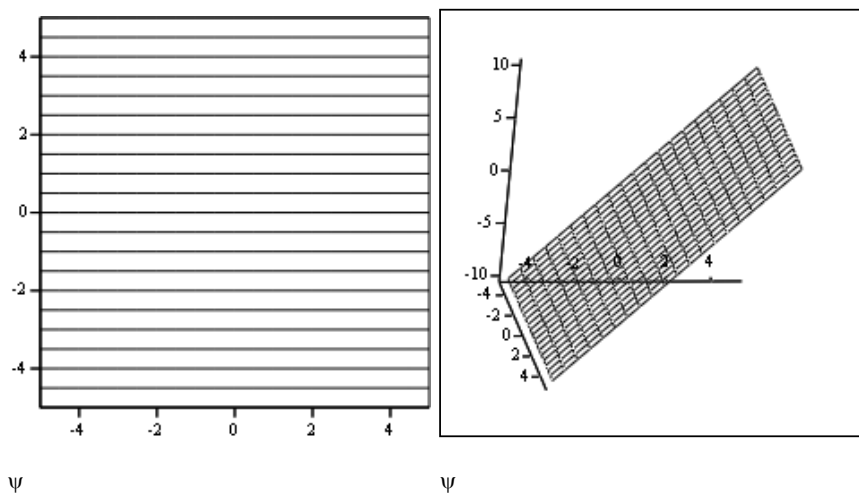


Рис. 1. Линии тока сплошного потока

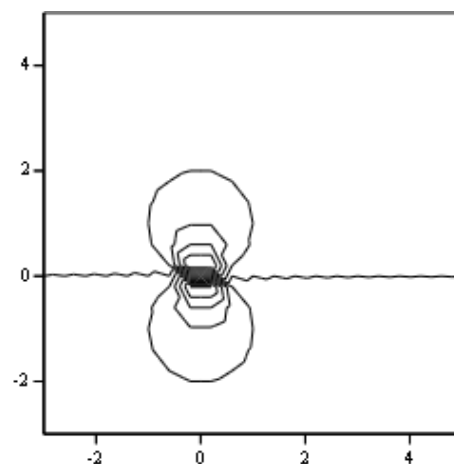


Рис. 2. Линии тока диполя

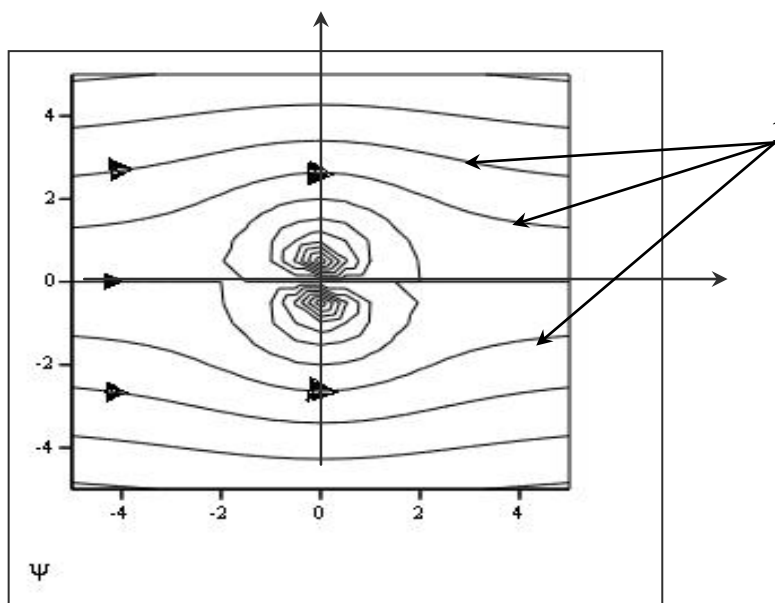


Рис. 3. Линии тока обтекания цилиндра сплошным потоком:
1 – направление течения жидкости

В идеальной жидкости не происходит образования вихрей, потому что отсутствует внутреннее трение. Для того чтобы течение было согласовано с практикой, необходимо поместить в течение вихрь.

Для моделирования вихря используем комплексный потенциал (3) и функцию тока (4) вихревой нити.

$$\omega_3(z) = G_1 \cdot i \cdot \ln(z - z_1), \quad (3)$$

$$\Psi_3(x, y) = G_1 \cdot \ln \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}. \quad (4)$$

где, G – интенсивность, z_1 – центр.

Картина линий тока вихревой нити показана на рис. 4.

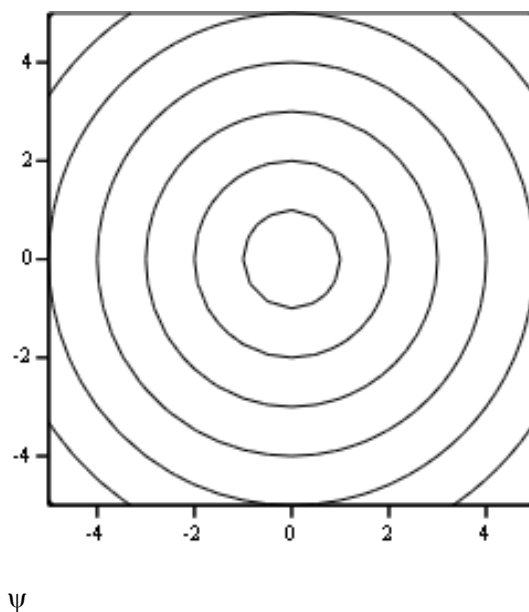


Рис. 4. Картина вихревой нити

Введение в поток вихрей может повлиять на границы цилиндра. Для того чтобы восстановить форму окружности, нужно в поток поместить систему дополнительных вихрей.

В центр цилиндра поместим первый вихрь. Здесь направление вращения вихря и направление вращения окружности совпадут. Комплексный потенциал и функция тока системы отраженных вихрей имеет вид:

$$\omega_4(z) = -G_1 \cdot i \cdot \ln \left(\frac{R^2}{z} - \bar{z}_1 \right), \quad (5)$$

$$\Psi_4(x, y) = -G_1 \cdot i \cdot \ln \sqrt{\left(\frac{R^2 \cdot x}{x^2 + y^2} - x_1 \right)^2 + \left(y_1 - \frac{R^2 \cdot y}{x^2 + y^2} \right)^2}, \quad (6)$$

где R – радиус цилиндра.

На рис. 5 показана картина течения, построенная с помощью функции тока, которую получили из разработанной модели. На рисунке введены следующие обозначения: R – радиус цилиндра, r – радиус активатора, a – длина пластинки. Линии тока моделируют циркуляционное течение краски. Для расчета использовали программу MathCAD.

По замкнутым линиям тока можно судить о наличии циркуляции краски внутри области. Из рис.5 видно, что при обтекании диполя поступательным потоком образуется окружность радиуса R , с помощью которой смоделирован дукторный цилиндр. Диполь 2 при обтекании поступательного потока воспроизводит окружность с радиусом r , с помощью которого моделируется активатор. Вращение цилиндра (дуктора) и активатора моделируется помещением вихрей в центр диполей. Для того чтобы убрать нулевое значение скорости на концах пластинки 3, в нее поместим вихрь. Для того чтобы сохранить геометрическую форму пластинки и двух цилиндров, вводим отраженные вихри. Для нахождения скорости движения краски в красочном ящике подобрали параметры течения таким образом, чтобы образовывались замкнутые линии тока, с помощью которых моделировали поверхность красочного слоя.

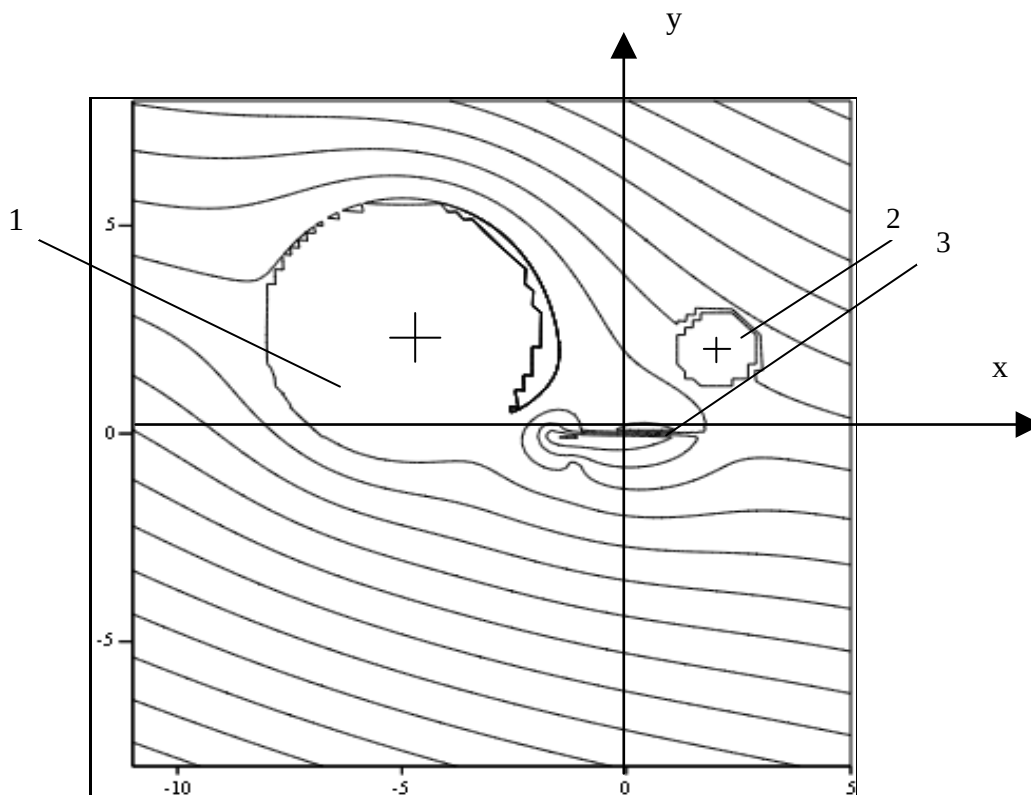


Рис. 5. Суммарное течение при параметрах:
1 – цилиндр; 2 – активатор; 3 – пластинка; $R=5$; $a=2$; $r=0.5$

В данной работе мы построили модель красочного ящика при применении функции комплексной переменной и обратного преобразования Жуковского.

Библиографический список

1. Раскин А. Н., Ромейков И. В. Технология печатных процессов. М.: Книга, 1989. 432 с.
2. Литунов С. Н., Тощакова Ю. Д. // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2015. № 1. С. 36–42.
3. Литунов С. Н., Тощакова Ю. Д. // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2015. № 5. С. 29–36.

УДК 539.612

М.В. Мамонова

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ МАГНИТНЫХ СВЕРХСТРУКТУР

Аннотация. В данной работе в рамках первопринципного подхода исследуются магнитные свойства мультислойных систем переходных металлов на наномасштабном уровне. Получены значения полной энергии нескольких коллинеарных спиновых конфигураций, энергии образования пленки и магнитного момента атомов для трехслойных структур Ni/Cu/Ni, Co/Cu/Co и Fe/Cr/Fe с ориентацией поверхностной грани (100). Осуществлен расчет интегралов обменного взаимодействия для ближайших и следующих за ближайшими соседями в рамках классической модели Гейзенберга. Полученные значения интегралов обменного взаимодействия могут быть применены при расчете температурной зависимости коэффициента магнитосопротивления.

Ключевые слова: первопринципные расчеты, ультратонкие пленки, обменный интеграл, мультислойные структуры.

Тенденцией современных исследований в области магнетизма стало смещение фундаментальных интересов в направлении изучения наноразмерных структур и, в частности, тонких магнитных пленок, вызванное их большим практическим применением и такими свойствами, как гигантское и туннельное магнитосопротивления [1–3].

В настоящее время, характеристики низкоразмерных систем, которые сложно или дорого исследовать в эксперименте, благодаря развитию современной вычислительной техники и методов решения больших систем уравнений можно получить с высокой точностью при расчете свойств веществ из первых принципов.

В основе первопринципных расчетов электронной и кристаллической структуры магнитных материалов лежит спиновая теория функционала плотности и численное решение системы уравнений Кона-Шэма. Для осуществления первопринципных расчетов в данной работе применялся лицензионный программный пакет VASP (ViennaAb-InitioSimulationPackage) [4], предназначенный для моделирования атомно-молекулярных и электронно-ядерных систем методами квантовой механики с использованием набора псевдопотенциалов и метода проекционно-присоединенных волн (PAW).

Целью данного исследования является расчет полной энергии системы, магнитных моментов атомов для различных спиновых конфигураций и интегралов обменного взаимодействия для ближайших и следующих за ближайшими соседями для трехслойных структур Ni/Cu/Ni, Co/Cu/Co и Fe/Cr/Fe. Возможность теоретического определения обменных характеристик позволит предсказать лучшую комбинацию материалов для

применения в мультислойных магнитных структурах с эффектами гигантского магнитосопротивления.

Система моделировалась с помощью периодической 36-атомной суперячейки 2×2 (4 атома в слое), состоящей из трех атомарных слоев немагнитной подложки с ориентацией поверхностной грани (100) и трех атомарных слоев ферромагнетика с обеих сторон пластины. Так как ультратонкая пленка повторяет структуру подложки, то атомная структура суперячейки для Ni/Cu/Ni и Co/Cu/Co соответствовала ГЦК, а для Fe/Cr/Fe ОЦК структуре. На рис.1 приведены конфигурации атомов в суперячейке для трехслойных ГЦК и ОЦК пленок. Стрелками обозначены направления магнитных спинов. Постоянная решетки системы соответствовала постоянной решетки подложки. Из условия минимума полной энергии мы получили оптимизированную постоянную решетки для меди, используя приближение локальной плотности (LDA) $a = 3.524(1)$ и обобщенного градиента (GGA) $a = 3.6367(5)$. Сравнение рассчитанных значений с результатами других авторов $a = 3.6369$ [5], показывает, что мы должны использовать приближение GGA для описания систем. Расчеты электронной структуры осуществлялись интегрированием в зоне Бриллюэна с использованием сетки k-точек, построенной по методу Монкхорста-Пака. Размерность k-сетки была выбрана $8 \times 8 \times 1$ при энергии обрезания базиса плоских волн, равной 350 эВ.

Исследовался случай коллинеарного магнетизма: спины атомов ориентированы в одном направлении, перпендикулярном поверхности. Были рассмотрены три спиновых конфигурации атомов пленок сплава: одно ферромагнитное (все спины направлены вверх) и два антиферромагнитных состояния. Рассчитанные для ферромагнитного состояния значения магнитных моментов атома пленки в i -м слое μ_i , приповерхностного атома подложки μ_0 и средний магнитный момент атома μ_{tot} приведены в таблице 1. В соответствии с представлением о магнитных свойствах атомов наибольшим магнитным моментом обладает атом Fe, а наименьшим атом Ni. Сравнение значений магнитных моментов атомов в разных слоях позволяет сделать вывод, что наибольшим моментом обладают атомы, наиболее удаленные от подложки. А поверхностные атомы немагнитной подложки подмагничиваются, причем для системы Fe/Cr/Fe направления магнитных атомов железа и хрома противоположны.

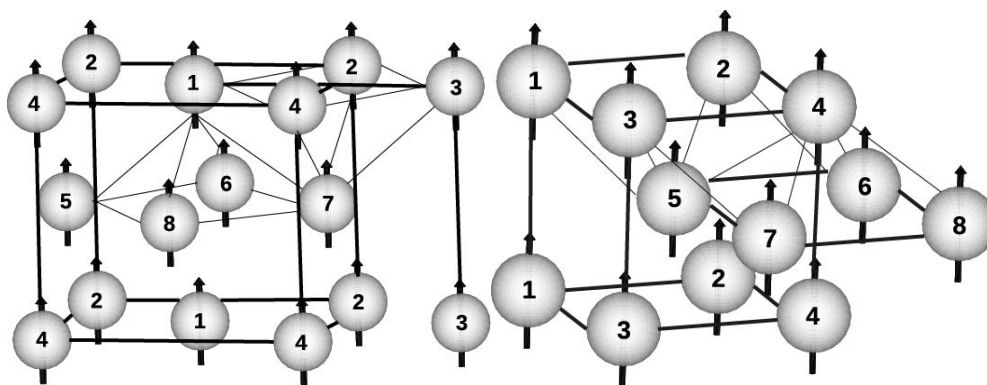


Рис. 1. Конфигурации атомов в суперячейке для трехслойных ГЦК и ОЦК пленок. Стрелками обозначены направления магнитных спинов. Тонкие и жирные линии показывают соединения ближайших и следующих за ближайшими атомов

Таблица 1

Значения магнитных моментов атома пленки в i -ом слое μ_i ,
приповерхностного атома подложки μ_0 и среднего μ_{tot}

Система	μ_0 $\mu_B/\text{ат}$	μ_1 $\mu_B/\text{ат}$	μ_2 $\mu_B/\text{ат}$	μ_3 $\mu_B/\text{ат}$	μ_{tot} $\mu_B/\text{ат}$
Co/Cu/Co	0,024	1,602	1,580	1,825	1,670
Ni/Cu/Ni	0,014	0,489	0,678	0,776	0,622
Fe/Cr/Fe	-0,318	2,084	2,417	2,932	2,349

Для определения энергии образования пленки на подложке необходимо вычислить разность энергии данной системы и энергий ее составляющих (пленки магнитного металла и подложки).

В рамках данных исследований были рассчитаны значения энергии образования пленки и среднего магнитного момента многослойной пленки никеля (1 атом в слое) на пятислойной медной подложке с ориентацией грани (100) в зависимости от толщины ферромагнитной пленки. Из представленной на рис. 2 зависимости видно, что при увеличении толщины магнитного материала энергия образования пленки значительно уменьшается, а магнитный момент атомов стремится к значению для объемного никеля ($\mu = 0.61 \mu_B/\text{ат}$).

Кроме того, стоит отметить сильное отличие энергии формирования пленки при толщине $N = 2$ по сравнению с энергией для одноатомной пленки. Такая же закономерность была выявлена нами для системы Ni/Cu(111) при $T=0$, применяя при расчетах энергии адсорбции вариационный метод пробных функций [6] (с учетом, что энергия адсорбции равна энергии формирования пленки, взятой с обратным знаком).

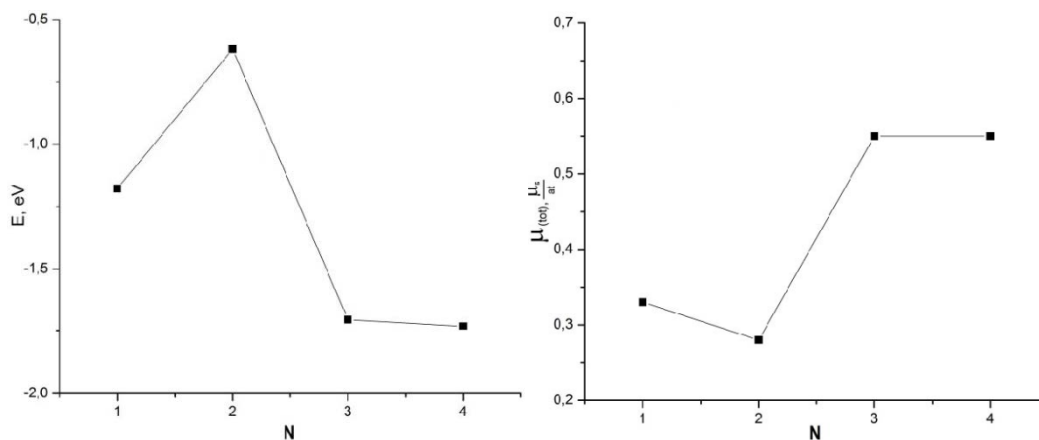


Рис. 2. Зависимость энергии образования пленки и среднего магнитного момента атома от количества монослоев пленки Ni

Таблица 2

Антиферромагнитные спиновые конфигурации, число пар атомов с антипараллельными спинами N_{ij} для ОЦК и ГЦК структур

Структура	i-е АФ состояние	ориентации спинов	N_{i1}	N_{i1}
ГЦК	1	+ - + - - + - + + - + -	22	0
	2	+ + - - - - + + + + - -	18	6
ОЦК	1	- - + + + + - - - - + +	20	24
	2	+ - - + - + + - + - - +	24	12

Вклад в полную энергию, соответствующий обменному взаимодействию, описывался модельным гамильтонианом Гейзенберга (в расчете на одну ячейку)

$$H = -\frac{1}{2n} \sum_{i,j} J_{ij} (\vec{S}_i \vec{S}_j), \quad (1)$$

где n – число ячеек в пленке.

Значения интегралов обменного взаимодействия для ближайших J_1 и следующих за ближайшими соседями J_2 могут получены на основе расчета разницы полных энергий системы для ферромагнитной E^Φ и антиферромагнитных спиновых конфигураций $E^{\Lambda\Phi}$:

$$N_{ij} J_j = \Delta E_i = E_i^{\Lambda\Phi} - E^\Phi, \quad (2)$$

где N_{ij} – число пар атомов в ячейке с антипараллельными спинами для i -го антиферромагнитного состояния для случая учета взаимодействия ближайших соседей ($j=1$) и для случая учета взаимодействия следующих за ближайшими соседями ($j=2$). На рис. 1 тонкие и жирные линии показывают соединения ближайших и следующих за ближайшими атомов. Значения параметров в данном уравнении, полученные в результате первопринципных расчетов для исследуемых структур, представлены в таблицах 2 и 3. Рассмотренные антиферромагнитные состояния приведены в табл.1. Знаком ‘+’ обозначено направление проекции спина -вверх, знаком ‘-’ направление вниз. Порядок чередования знаков соответствует нумерации атомов, пример которой приведен на рис.1.

Таблица 3

Рассчитанные значения обменных интегралов и полных энергий системы для ферромагнитной E^Φ и антиферромагнитных спиновых конфигураций $E^{\Lambda\Phi}$

Система	E^Φ эВ	$E_1^{\Lambda\Phi}$ эВ	$E_2^{\Lambda\Phi}$ эВ	J_1 10^{-14} эрг	J_2 10^{-14} эрг
Co/Cu/Co	-201,463	-197,313	-197,313	2,52	1,68
Ni/Cu/Ni	-167,819	-166,749	-166,691	0,65	0,56
Fe/Cr/Fe	-300,036	-295,483	-295,621	1,73	0,73

Исследование различных спиновых конфигураций мультислойных систем (табл.3) показало, что, независимо от системы, энергетически более выгодно (энергия минимальна) полностью упорядоченное ферромагнитное состояние.

Таким образом, в представленной работе осуществлены первопринципные расчеты энергетических и магнитных характеристик для пленок Co, Ni, Fe на немагнитной подложке с использованием специализированного программного пакета VASP. Был проведен расчет значений магнитных моментов атома для каждого слоя пленки и среднего магнитного момента. Был осуществлен первопринципный расчет значений интегралов J_1 и J_2 обменного взаимодействия между соседними атомами пленок (ближайшими и следующими за ближайшими соседями), которые необходимы для применения в расчетах мультислойных магнитных структурах с эффектами гигантского магнитосопротивления [7].

Библиографический список

1. Bass J., Pratt W. P. Current-perpendicular (CPP) magnetoresistance in magnetic metallic multilayers // J. Magn. Mater. 1999. Vol. 200 p. 274-289.
2. Nabiyouni G. Growth, characterization and magnetoresistive study of electrodeposited Ni/Cu and Co-Ni/Cu multilayers // J. Cryst. Growth. 2005. Vol. 275. P. 1259-1262.
3. Chappert C., Fert A., Nguyen van Dau F. The emergence of spin electronics in data storage // Nature Mater. 2007. Vol. 6. P. 813-822.
4. Kresse P. G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54. p. 11169.
5. Lejaeghere K., Van Speybroeck V., Van Oost G., Cottenier S. Error estimates for solid-state density-functional theory predictions: an overview by means of the ground-state elemental crystals // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2014. Vol. 39, №1. p. 1-24.

6. Mamonova M. V., Prudnikova I. A., Prudnikov V. V. Description of dimensional change for energy and magnetic properties of ultrathin magnetic films based on critical behavior characteristics // Material Science Forum. 2016. Vol. 845. P. 101-104. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.845.101

7. Prudnikov V. V., Prudnikov P. V., Romanovskiy D. E. Monte Carlo calculations of the magnetoresistance in magnetic multilayer structures with giant magnetoresistance effects // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49, №23. p. 235002.

УДК620.178.16

Ю.К. Машков, А.С. Рубан¹, С.В. Шилько²

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Беларусь

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПТФЭ В ПРОЦЕССЕ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Аннотация. В работе исследованы свойства полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), наполненного частицами скрытокристаллического графита и наноразмерной двуокиси кремния, и закономерностей структурно-фазовых превращений в указанном ПКМ в условиях фрикционного взаимодействия. Для исследования структуры указанного композита использованы методы электронной микроскопии и проведен анализ элементного состава поверхности до и после фрикционного взаимодействия. Методом атомно-силовой микроскопии исследована топография поверхности трения. На основе полученных данных сделаны выводы о преобразовании надмолекулярной структуры исследуемых образцов вследствие развития сложных физико-химических процессов в условиях фрикционного взаимодействия.

Ключевые слова: нанокompозиты, политетрафторэтилен, надмолекулярная структура, наполнители–модификаторы.

Создание полимерного композиционного материала (ПКМ) является сложной научно-технической задачей. Свойства ПКМ существенно зависят от вида, содержания и физико-механических свойств наполнителя. Правильный выбор наполнителя позволяет существенно расширить область применения ПКМ и повысить технический уровень, надежность и срок службы приборов или оборудования.

Анализ разработок и результатов экспериментальных исследований металлополимерных пар трения показывает, что проблема прогнозирования триботехнических свойств полимерных композиционных материалов не утрачивает своей актуальности [1-5]. Дальнейшее развитие исследований в этом направлении ставит задачу оптимизации состава композитов не только исходя из наилучших триботехнических характеристик, но и по критерию обеспечения их стабильности при эксплуатации узла трения.

Целью работы являлось исследование свойств полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), наполненного частицами скрытокристаллического графита (СКГ) и наноразмерной двуокиси кремния, и закономерностей структурно-фазовых превращений в указанном ПКМ в условиях фрикционного взаимодействия.

Исследуемые образцы содержали в качестве наполнителей СКГ марки ГЛС-3 (ГОСТ 5420-74) в виде ультрадисперсных частиц неупорядоченной ориентации с удельной поверхностью 55–70 м²/г и структурно активный наноразмерный порошок двуокиси кремния SiO₂ марки БС-120 (ГОСТ 18307-78). Средний размер частиц БС-120 составлял 19–27 нм, удельная адсорбционная поверхность 300 м²/г. На основе данных [6], полученных при изучении влияния нанопорошка двуокиси кремния БС-120 [6,7], для дальнейших исследований были выбраны образцы следующего состава: 89 масс% ПТФЭ, 8 масс% СКГ, 3 масс% SiO₂.

Влияние наномодификаторов на структуру полимерных композитов и полимерной матрицы ПТФЭ изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL JCM-5700, оснащенного рентгеновским микроанализатором для изучения элементного состава.

Рентгенограммы образцов композитов одинакового состава, изготовленные по одной технологии, иногда количественно отличаются друг от друга. Это указывает на то, что процесс формирования надмолекулярной структуры композита сложного состава начинается уже в процессе изготовления под влиянием различных технологических факторов.

Для создания условий, способствующих повышению структурной активности наномодификатора, на основе литературных данных и проведенных предварительных исследований был выбран режим спекания в специализированных приспособлениях в виде металлических зажимов, ограничивающих тепловое расширение спекаемого материала в направлении прессования [8]. Возникающее при нагреве одноосное давление сжатия оказывает значительное влияние на структурообразование в материале.

С целью изучения физико-химических процессов, развивающихся в поверхностном слое ПКМ в условиях фрикционного взаимодействия, и их влияния на износостойкость ПКМ исследовали элементный состав поверхности до и после фрикционного взаимодействия.

Таблица 1

Элементный состав ПКМ, %масс

89 масс% ПТФЭ, 8 масс% СКГ, 3 масс% SiO ₂ .	F	C	O	Si	Ni	Al
до взаимодействия	60,60	34,37	-	3,84	-	1,19
после взаимодействия	20,29	51,33	15,44	-	7,42	-

Результаты исследования (табл. 1) показали, что при введении в ПТФЭ комплексных полидисперсных и наноразмерных модификаторов, включающих наряду с СКГ порошок SiO₂ марки БС-120, происходит значительное изменение морфологии полимерной матрицы [6,9,10]. Содержание элементов в поверхностном слое образцов определяется сложными физико-химическими процессами, возникающими при трении. В процессе фрикционного взаимодействия наблюдается значительное изменение концентрации элементов F, C; уменьшение содержания фтора в 3 раза, увеличение содержания углерода почти в два раза и появление значительного количества кислорода.

На рис. 1 представлены микрофотографии поверхностей трения образца указанного выше состава.

Как видно из рис. 1, имеет место преобразование надмолекулярной структуры полимера и увеличение его пористости. Вследствие неравномерности распределения частиц модификатора в матрице в композиционном материале появляются области дефектности, представленные на микрофотографиях неплотноупакованными неструктурированными участками.

Сравнение полученных данных с результатами работы [10] показывает, что увеличение концентрации наполнителя проявляется в виде разрыхляющего воздействия на матрицу.

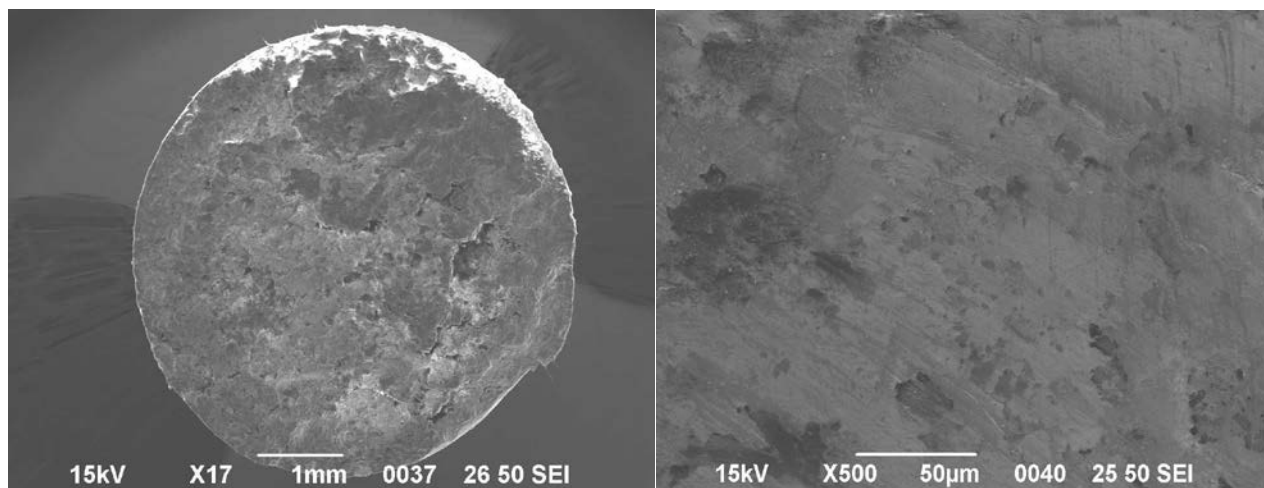


Рис. 1. Микрофотографии поверхности трения ПКМ, содержащего 89 масс% ПТФЭ, 8 масс% СКГ, 3 масс% SiO_2

На рис. 2 приведены микрофотографии поверхности трения исследуемых образцов, а на рис. 3 показан микрорельеф поверхности, полученный с использованием программы Gwyddion.

Анализ рельефа поверхностей трения и элементного состава позволяет сделать вывод о развитии на поверхности трения химических и диффузионных процессов, обусловленных температурным градиентом, возникающим при трении.

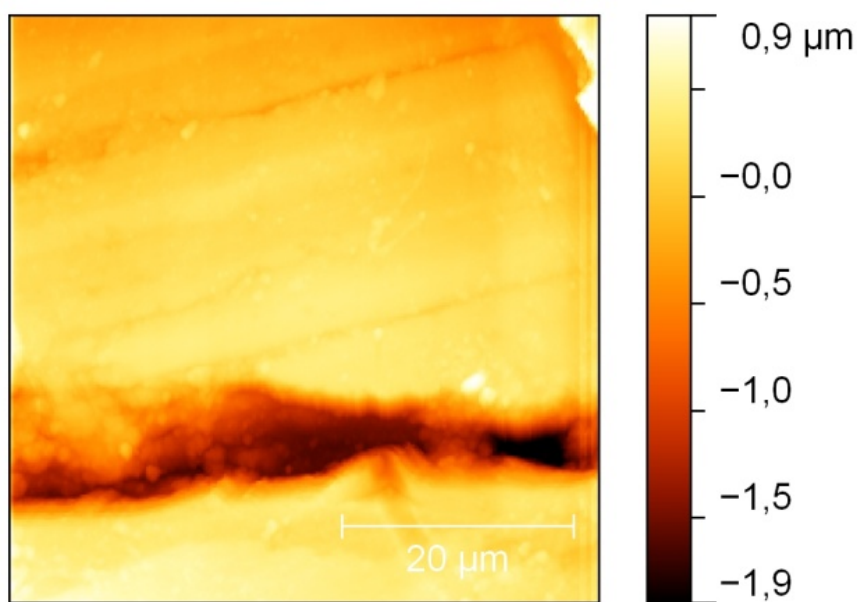


Рис. 2. Микрофотография поверхности трения ПКМ, содержащего 89 масс% ПТФЭ, 8 масс% СКГ, 3 масс% SiO_2

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Надмолекулярная структура ПКМ, полученная с использованием комплексных наномодификаторов, характеризуется наличием дефектных областей, неплотно упакованных и неструктурированных участков, главным образом в области межфазных границ.
2. Изменение химического состава и анализ микрорельефа поверхности образцов ПКМ свидетельствует о развитии сложных физико-химических процессов, происходящих в процессе фрикционного взаимодействия.

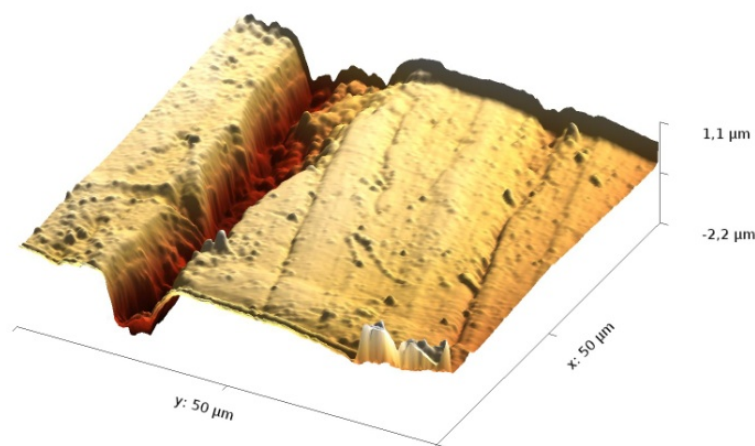


Рис. 3. Микрорельеф поверхности трения ПКМ, содержащего 89 масс% ПТФЭ, 8 масс% СКГ, 3 масс% SiO₂

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 16-58-0037/16 / T16P-202БРФФИ

Библиографический список

1. Песецкий С. С., Богданович С. П., Мышкин Н. К. Триботехнические свойства нанокompозитов, получаемых диспергированием наполнителей в расплавах полимеров // Трение и износ. 2007. Т. 28, № 5. С. 500-524.
2. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Гоголева О. В., Федоров А. Л. Фторполимерные композиты триботехнического назначения // Трение и износ. 2007. Т. 28, № 6. С. 627-634.
3. Суворова Ю. В., Фроня М. А. Анализ некоторых свойств композиционных наноматериалов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2009. № 2. С. 62-69.
4. Воропаев В. В., Струк В. А., Горбачевич Г. Н., Лавринюк И. Л. Технология высокопрочных композиционных материалов на основе модифицированного политетрафторэтилена // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. 2012. № 3. С. 31-38.
5. Антонов А. С., Воронцов А. С., Авдейчик С. В., Гаврилова В. В. Формирование высокопрочных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена // Материалы Междунар. н/т конференции INTERMATIC-2015, Москва, 1-5 декабря 2015 г. Часть 2. МИРЭА. С. 153-156.
6. Машков Ю. К., Кропотин О. В., Чемисенко О. В. Разработка и исследование полимерного нанокompозита для металлополимерных узлов трения // Омский научный вестник. 2014. Т. 133, № 3. С. 64-66.
7. Машков Ю. К., Кропотин О. В., Чемисенко О. В., Шилько С. В. Износостойкие ПТФЭ-нанокompозиты, содержащие двуокись кремния, для металлополимерных узлов трения // Трение и износ. 2015. № 6. С. 524-529.
8. Кропотин О. В., Егорова В. А. Оптимизация условий спекания композиционного материала методом моделирования контактного взаимодействия с учетом вязкоупругих свойств полимера // Омский научный вестник. 2011. Т. 103, № 3. С. 60-64.
9. Машков Ю. К., Кропотин О. В., Егорова В. А. Влияние скрытокристаллического графита на физические свойства политетрафторэтилена // Вестник Омского гос. ун-та. 2014. № 4. С. 65-69.
10. Машков Ю. К., Косаренко Р. И., Чемисенко О. В., Макиенко В. А. Разработка и исследование полимерного нанокompозита для металлополимерных узлов трения // Россия молодая: передовые технологии в промышленность. 2015. № 2. С. 114-118.

НАНОТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Аннотация. Медицина была, есть и остаётся одной из важнейших областей деятельности человека. Именно она позволяет продлить человеку жизнь и улучшить её уровень. Однако лекарственные препараты и способы диагностики не всегда дают желаемый результат. Новые открытия в области нанотехнологий могут предоставить огромные перспективы в области лечения, визуализации и диагностики различных заболеваний, как предоставив новые пути, так и значительно улучшив старые. В статье проанализировано текущее состояние использования нанотехнологий в биомедицине с использованием статей в печатных изданиях и открытых источниках.

Ключевые слова. Наноматериалы, направленная доставка лекарств, тканевая инженерия, биомаркеры, нанотоксикология.

На сегодняшний день нанотехнологии – одна из самых бурно развивающихся отраслей науки. Они внедряются во все сферы деятельности, начиная от электроники и заканчивая медициной. В медицине нанотехнологии применяются для диагностики, мониторинга, лечения заболеваний, для создания биосенсоров, получения изображений биологических объектов и в тканевой инженерии. Размеры наночастиц и, соответственно, большая площадь их поверхности по сравнению с объёмом позволяют им эффективно взаимодействовать с биомолекулами живых организмов. Одним из наиболее востребованных направлений является кардиохирургия.

Наиболее известное применение наноматериалов – таргетная доставка лекарств [1]. Классические способы введения лекарств часто обладают рядом недостатков, уменьшающих их эффективность: преждевременным распадом препарата в организме, токсичным воздействием на здоровые клетки, затруднением прохождения через барьеры организма. Нанотехнологии же позволяют направить лекарства в заданные участки организма и к определённым клеткам таким образом, чтобы не подвергать здоровые клетки воздействию лекарств. В результате, этот способ имеет очевидные преимущества перед классическими способами доставки: риск развития побочных эффектов значительно ниже, как и токсичное воздействие лекарственных препаратов на организм [2]. Также наночастицы намного проще проходят биологические мембраны вроде ЖКТ и его оболочки [3]. Кроме того, серьёзным преимуществом является то, что суммарная удельная площадь поверхности наночастиц больше, чем у частиц большего размера, что используется для создания лекарств, позволяющих повысить эффективность высвобождения препаратов. Наночастицами, наиболее активно изучаемыми и используемыми в качестве переносчиков лекарственных препаратов, в настоящее время являются липосомы, фосфолипидные и полимерные мицеллы, наноземульсии, полимерные биodeградируемые наночастицы и дендримеры [4].

По механизму обеспечения адресной доставки препаратов выделяют две основные стратегии – пассивный и активный перенос. Пассивный перенос происходит за счёт преимущественного выхода лекарственных наночастиц в поражённую ткань вследствие локального повышения проницаемости микрососудов при патологических процессах. Активация и доставка лекарственных препаратов происходит под действием физико-химических сигналов (реакция переносчика на изменение pH, температуры, реакция на свет (фотохимический способ), воздействие на материал магнитного поля или ультразвука), либо направленно за счёт связывания наночастиц со специфическими молекулами, обеспечивающими доставку лекарственных препаратов (инсулин, ряд пептидов и др.).

Для обеспечения эффективного пассивного переноса требуется продолжительная циркуляция лекарственных наночастиц в кровотоке. Однако наночастицы обычно быстро подвергаются захвату клетками ретикуло-эндотелиальной системы. Чтобы избежать этого, наночастицы покрывают слоем полиэтиленгликоля, который обладает химической инертностью и низкой иммуногенностью. Показано, что время полураспада в кровотоке липосом, покрытых полиэтиленгликолем, у грызунов и у человека составляет соответственно от 15 и до 45 часов, в то время как непокрытые липосомы имеют время полужизни, не превышающее 2 часов [5].

Активная доставка лекарственных препаратов в поврежденные ткани предполагает маркирование поверхности наночастиц антителами или иными распознающими элементами, которые обеспечивают высокоизбирательное связывание наночастиц с антигенами, экспрессирующимися на поверхности поврежденных клеток.

На сегодняшний день активно изучается возможность транспортировки лекарственных средств с помощью «наномашин». В качестве таких носителей можно рассматривать белки и нуклеиновые кислоты. Одной из задач, выполняемых с помощью использования наномашин, является попытка встроить их в систему естественных взаимодействий белков и нуклеиновых кислот с целью коррекции их функционирования.

Использование биомаркеров может быть полезно, к примеру, для исследования процесса ишемического каскада. Биомаркеры осуществляют при развитии патологического процесса коммуникацию сигнальных путей между клетками-участниками развития нестабильности атеросклеротической бляшки с последующим тромбозом ткани. После возникновения инфаркта в зоне ишемии дальнейший процесс во многом зависит от поступивших в эту зону макрофагов. Альфа-2-макроглобулиновая наномашинка может направленно доставить в необходимую зону наночастицы с ингибитором синтеза противовоспалительного фактора. Также с помощью наномашин может осуществляться направленная доставка генетических конструкций; к примеру, генетические конструкции, несущие факторы ангиогенеза, могут быть доставлены в зоны ишемии при хронической артериальной недостаточности [6]. Помимо того, наночастицы могут использоваться для создания препаратов, регулирующих кровотоки, к примеру, биологически активный нанопорошок на основе натрия показал ранозаживляющие свойства [7].

Помимо доставки лекарств, непосредственно наночастицы можно применять для создания трансплантатов кровеносных сосудов, искусственных сердечных клапанов, биологически разлагаемых шовных материалов, кардиостимуляторов и др. В имплантатах и других устройствах, соприкасающихся с кровью, широко используются синтетические полимеры; в клинической практике применяются сосуды, изготовленные из политетрафторэтилена. Одной из самых главных способностей искусственных сосудов является способность к предотвращению тромбообразования. Для улучшения этой способности используется ионная имплантация [8]. К примеру, имплантация ионами кислорода улучшает адгезию эндотелиальных клеток [9].

Важным процессом коронарных вмешательств, направленных на реваскуляризацию ишемизированного миокарда, является стентирование коронарных артерий. Обработка стентов наночастицами потенциально снижает риск тромбообразования. В клиническую практику внедряются стенты, покрытые наночастицами, содержащими антирестенозные препараты. Одним из вариантов доставки и высвобождения лекарственных препаратов может быть их помещение в качестве наночастиц внутрь микропор стента.

Другим перспективным направлением в изучении и использовании наноструктур является тканевая инженерия, которая применяет принципы нанотехнологии для восстановления или регенерации тканей с помощью биологических материалов. Создание трёхмерной структуры происходит путём посева клеток на специализированную искусственную матрицу. В кардиохирургии тканевая инженерия может быть использована для создания искусственно синтезированных сосудов. Одной из альтернатив синтетическим сосудам было предложение использовать искусственные полимерные протезы на основе

политетрафлуорэтилена и полиэтилена тетрафталата, на которые был нанесён слой эндотелия. Обработанные таким образом протезы показали хорошую биосовместимость и низкую тромбогенность. Однако такие искусственные сосуды показали низкую продолжительность нормальной работоспособности (3–5 лет).

Лучшие результаты могут получиться при применении полноценных тканеинженерных конструкций, которые представляют собой многослойные тканево-клеточные структуры, выращиваемые на цилиндрическом полом матрикса из биodeградируемого материала. При этом на полимер наслаивают гладкомышечные стенки артерий, затем эндотелиальные клетки.

Среди новых подходов к указанной проблеме было предложено использовать человеческие фибробласты, выделенные из биопсийного материала кожи пациентов с тяжёлыми формами сердечно-сосудистых заболеваний. Эти фибробласты культивировались в условиях, стимулирующих продукцию внеклеточного матрикса. Указанный матрикс формировал отдельный участок из клеток, который можно было в дальнейшем отделить от поверхности культурального пластика и который затем можно использовать для конструирования трёхмерной модели сосуда путём использования временной основы из нержавеющей стали с тефлоновым покрытием. Затем модель освобождалась от фибробластов и засеивалась клетками эндотелия. Полученные биоинженерные сосуды показали хорошую прочность при испытаниях как *invitro*, так и *invivo* [10]. Такие методы позволяют создавать, в основном, крупные сосуды.

Помимо лечения лекарствами и использования тканевой инженерии, наночастицы можно использовать для диагностики, мониторинга течения заболеваний. Применение наночастиц в диагностике и мониторинге заболеваний является на сегодняшний день одним из наиболее распространённых нанотехнологических направлений в медицине. Диагностика производится на основании анализа результатов, полученных биодатчиками. Биодатчики используются в комбинации с сигнальными агентами, чтобы показать содержание определённых биомаркеров в изучаемых анализах. В качестве биодатчиков обычно используют аптамеры, являющиеся эффективными определителями единичных молекул. Тест-системы на основе олигонуклеидных микрочипов для молекулярно-генетической диагностики сердечно-сосудистых заболеваний и факторов риска их развития показали достаточную точность диагностики [6]. Наночастицы также используются для визуализации поражённых клеток и тканей, что помогает не только диагностировать, но следить за процессом терапии в реальном времени. Из-за размера и свойств частиц их можно использовать для широкого спектра целей: визуализация и последующее уничтожение тромбов, определение уязвимых атеросклеротических бляшек и др. [11].

Нанотехнологии открыли множество новых возможностей для человечества в целом и медицины в частности. Наночастицы применяются клинически и активно изучаются, темпы развития наноинженерии чрезвычайно высоки. Однако, подобное активное внедрение нанотехнологий в такую сферу науки как биомедицина требует точных знаний о потенциальных рисках и побочных эффектах применения этих материалов. Для предотвращения возможного токсичного воздействия на организм человека наноматериалов необходимо иметь полную характеристику используемых материалов в условиях биологического окружения. При этом классический тест для определения токсичности материалов может оказаться неэффективным из-за особенностей наночастиц, поэтому производство и внедрение наноматериалов должно быть строго регламентировано, их изучение и создание лекарств на их основе должно выполняться параллельно со всесторонним анализом влияния изучаемых материалов на человека.

Поступление наночастиц в организм человека возможно ингаляционным, пероральным, перкутанным и парентеральным путями. Эти пути существенно отличаются друг от друга, а значит, и побочные эффекты могут быть проявлены разные, в разных частях человеческого тела. Несмотря на то, что все пути, которыми наночастицы могут попасть в

человеческое тело, имеют естественные барьеры, наночастицы всё же могут проникать через них. К примеру, в экспериментальных исследованиях была показана возможность транслокации наночастиц из лёгких в кровь [12], что должно заслуживать особого внимания, так как ряд исследований показывает роль вдыхаемых частиц в патогенезе ряда заболеваний, например, углеродные нанотрубки, попавшие в кровь, стимулируют процесс тромбообразования [13].

Токсичность наночастиц может быть связана с двумя механизмами – воспалением и оксидативным стрессом. Далеко не все наночастицы обладают способностью индуцировать эти факторы. К примеру, экспериментальным методом было обнаружено, что наночастицы оксида титана, наночастицы углерода и карбоксилированного полистирола не вызывают окислительного стресса в линии макрофагов мыши, тогда как катионный полистирол и наночастицы, загрязняющие воздух, наоборот, вызывали значимое усиление образования свободных радикалов [14].

Применительно к сердечно-сосудистым заболеваниям, имеет смысл более пристально рассматривать конкретный ряд наиболее часто используемых материалов: наночастицы диоксида титана, оксида цинка, серебра, углерода, оксида кремния, оксидов железа. Человек может взаимодействовать с частицами, в том числе, в процессе производства, что может привести к нежелательным последствиям для систем его организма, в том числе сердечно-сосудистой системы, таким образом, необходимо исследовать влияние частиц на все органы при различных путях попадания их в организм. Частицы диоксида титана в экспериментах *in vivo* показали способность транслоцироваться из органа в орган, проникать из крови в сердце и там накапливаться; при этом токсичность этих частиц достаточно слабо изучена. Большая часть частиц оксида цинка выводится из организма, однако, эксперименты показали, что они склонны накапливаться в сердце, что снизило частоту пульса у исследуемых животных; также у них были отмечены повреждения ДНК, воспаления и апоптоз. Наночастицы серебра после вдыхания также оказывают негативное влияние на сердечную мышцу и замедляют сердцебиение; опыты с введением наночастиц серебра через кожу подопытных животных также показывают накопление частиц в сердце и деформацию кардиомиоцитов. Наночастицы углерода могут быть в разных формах, и, в зависимости от их вида, взаимодействие с организмом будет разное. Частицы, попавшие в кровоток из лёгких, могут привести к воспалительным реакциям в сердечно-сосудистой системе [15]. Фуллерен C60 выступает как сильный прооксидант, повышая число свободных радикалов [16]. Частицы оксида кремния, наиболее широко применяемые в нанотехнологиях, наиболее опасны при попадании в воздух, так как легко смешиваются с ним, таким образом попадая в лёгкие и из них в кровоток. В экспериментах частицы оксида кремния вызывают увеличение числа ряда молекул (Интерлейкин 6 и ряд других), вызывающих воспалительные реакции в сердечно-сосудистой системе. Наночастицы железа также широко используются в медицине: в качестве контрастного вещества, при доставке лекарственных веществ и генов. В кровотоке эти частицы могут вызвать процессы окисления, которые в итоге могут привести к гибели клеток; также опытным путём наблюдалось снижение скорости сердцебиения [15]. Таким образом, можно сказать, что вопрос токсичности наноматериалов ещё недостаточно исследован, а нанотоксикология, как отдельное направление изучения свойств наночастиц, ещё находится в стадии развития.

Резюмируя, отметим, что применение наночастиц сможет открыть новые подходы к созданию эффективных способов лечения, диагностики и профилактики заболеваний различного профиля, в том числе и заболеваний сердечно-сосудистой системы, удовлетворяя возрастающие требования современной медицины. На основе новейших достижений в изучении наночастиц применительно к здоровью человека можно с уверенностью сказать, что создание новейших лекарственных средств, как и другие области применения наночастиц в медицине, переживает период особенного интереса к нему со стороны исследователей, и, соответственно, имеет перед собой большие перспективы развития.

Библиографический список

1. Sahoo A. K., Labhasetwar V. Nanotech approaches to drug delivery and imaging // Drug. Discov. Today. 2003. Vol. 8, no. 24. P. 1112-1120.
2. Couvreur P., Vauthier C. Nanotechnology: intelligent design to treat complex disease // Pharm Res. 2006. Vol. 23, no. 7. P. 1417-50.
3. Desai M. P. Gastrointestinal uptake of biodegradable microparticles: effect of particle size // Pharm Res. 1996. Vol. 13, no. 12. P. 1838-45.
4. Улащик В. С. Современные технологии направленного транспорта лекарственных веществ // Здоровоохранение (Минск). № 4. С. 12-19.
5. Woodle M. C. Surface-modified liposomes: assessment and characterization for increased stability and prolonged blood circulation // Chem Phys Lipids. 1993. Vol. 64. P. 249-262.
6. Шляхто Е. В. Инновационные нанотехнологии в медицине и биологии // Инновации. 2008. № 6. С. 54-59.
7. Арсентьева И. П., Афанасенкова Е. С., Дзидзигури Э. Л. [и др.] Аттестация нанопорошка на основе магния, используемого в качестве активной основы ранозаживляющих препаратов // Наноинженерия. 2015. № 8. С. 22-26.
8. Iwaki M. Ion Bombardment into Inner Wall Surfaces of Tubes and their biomedical Applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1995. Vol. 106. № 1-4. P. 618-623.
9. G. Xu Oxygen Ion Implantation at 20 to 2000 keV Into Polysulfone for Improvement of Endothelial Cell Adhesion Colloids // Surf. B. Biointerfaces. 2000. Vol. 19, № 3. P. 237-247.
10. Григорян А. С. Тканевая инженерия испытания новых тканеинженерных кровеносных сосудов в экспериментальных моделях // Гены и клетки. 2006 Т.1, № 3. С. 23-24.
11. Deb S., Ghosh K., Shetty S. D. Nanoimaging in cardiovascular diseases: Current state of the art // Indian J Med Res. 2015. Vol. 141, no. 3. P. 285-298.
12. Oberdorster G. Toxicology of ultrafine particles: In vivo studies // Philos. Trans. R. Soc Lond. 2000. Vol. 358. P. 2719-2740.
13. Radomski A., Jurasz P., Alonso-Escolano D. Nanoparticle-induced platelet aggregation and vascular thrombosis // Br. J. Pharmacol. 2005. Vol. 146. P. 882-893.
14. Xia T., Kovochich M., Brant J. Comparison of the abilities of ambient and manufactured nanoparticles to induce cellular toxicity according to an oxidative stress paradigm // Nano. Lett. 2006. Vol. 6. P. 1794-1807.
15. Bostan H. B., Rezaee R. Cardiotoxicity of nano-particles // Life Sciences. 2016. Vol. 165. P. 91-99.
16. Пиотровский Л. Б., Думплис М. А., Литасова Е. В. [и др.] Токсикология углеродных наноструктур // Медицинский академический журнал. 2010. Т. 10, № 4. С. 125-134.

УДК 533.9: 538.9

Д.Ю. Никонов, С.В. Бирюков

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ТИТАНОВОЙ ПОДЛОЖКЕ

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме получения композиционных биополимерных материалов, применяемых в биоинженерии и современной медицине. В связи с этим в работе акцентируется внимание на методах подготовки образцов и способах

нанесения покрытий на поверхность границы «имплантат–кость». В частности, на биосовместимые, сохраняющие память формы титановые подложки, которые идеальны для формирования определённого рельефа, после модифицирования. Целью данного исследования является описание модификаций получения кальций-фосфатных покрытий, представляющих интерес для использования в медицинской практике в качестве биопокрытий на титановых имплантатах, а также физических величин, характеризующих их свойства.

Ключевые слова: остеолит, кальций-фосфатные покрытия, гидроксипатит, пескоструйная обработка, кислотное травление, магнетронное напыление.

Риск возникновения различного рода очагов остеолита в послеоперационный период зависит от качества поверхности имплантируемого протеза и от уменьшения плотности структуры костной ткани (остеопороз). На рисунке 1 стрелками показаны места остеолита, возникающие вследствие воспалительных процессов и микротравм, вызванных нагрузками имплантата на внутреннюю часть кости [9]. Кость как биологическая структура имеет преимущества по сравнению с металлами, поскольку способна самовосстанавливаться (регенерировать). Может изменять свои свойства и геометрию в ответ на изменение механических требований, но, всё же, она не обладает определённым уровнем прочности. Конструкционная остеинтеграционная поверхность имплантатов обеспечивает рост остеобластов, что ведёт к реконструкции и сцепке с костью. Решением медицинских требований для внедрения в организм человека является нанесение биоактивных Ca/P-покрытий, приближающих создаваемые имплантаты к классу имитационных биологических структур для костной ткани [1].

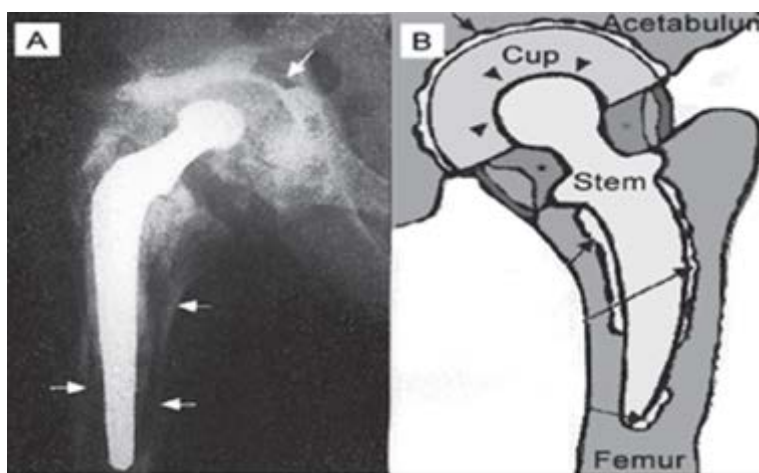


Рис. 1. Фотоотпечаток рентгенограммы после эндопротезирования (А) схематическое изображение мест остеолита (В). Стрелками указаны очаги остеолита

Методики, позволяющие выполнить эти требования, многочисленны. Их можно классифицировать следующим образом: физические модификации (ионно-лучевой синтез, плазменное напыление, пескоструйная обработка, магнетронное нанесение), химические модификации (кислотное травление, анодное оксидирование, использование щелочей), создание монослоёв, осаждение наночастиц (шликерный или золь-гель метод, биомиметический), а также сочетание физических и химических модификаций.

При сочетании различных методов получения матрицы из гидроксипатита (ГАП) $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (или кальций-фосфатных покрытий) для костеобразования на биосовместимом титане возникают различные модификации этих методов, например, пескоструйная обработка или кислотное травление с последующим магнетронным напылением на подложку, кость.

Для оценки физико-химических характеристик титановой матрицы с кальций-фосфатным покрытием необходимо провести подготовку нескольких образцов, модифицированных различными способами. Для увеличения статистики используют различные, но биологически, механически и химически совместимые марки титановых подложек.

Первую группу образцов необходимо отшлифовать до образования гладкой и ровной без царапин поверхности. Шлифовка проводится на небольшой скорости с малой зернистостью абразивного круга в охлаждающей жидкости, что уменьшает степень шероховатости поверхности. Такую обработку можно использовать для создания наноконфигураций методами АСМ литографии (перенос материала с поверхности зонда и наоборот, наночеканка). С помощью пескоструйной обработки на второй группе титановых образцов формируется более грубый рельеф.

На подготовленные образцы наносится кальций-осфатное покрытие. Один из способов нанесения – кислотное травление или оксидирование титановых подложек. Нанесение микроструктурированного кальций-фосфатного покрытия проводится в растворе фосфорной и серной кислот определённых концентраций, дополнительно содержащем суспензию гидроксиапатита, при напряжении и температуре, соответствующим параметрам эксперимента с учётом времени [2]. Порошок для анодного оксидирования нужно приготовить методами мокрого синтеза в растворе или суспензии. После пескоструйной обработки и анодирования титана для очистки поверхности образцы помещают в ультразвуковую мойку. Методами АСМ и РЭМ микроскопии проводится первичная оценка изменения приповерхностных слоёв и элементарного состава. На рисунке 2 (А,В) видим схожую топографию поверхности при пескоструйной обработке и кислотном травлении [10]. Однако в зависимости от задачи в (А) мы можем контролировать величину пор на поверхности от 50 до 100 нм, а в (В) степень диффузионно-сегрегационного перераспределения.

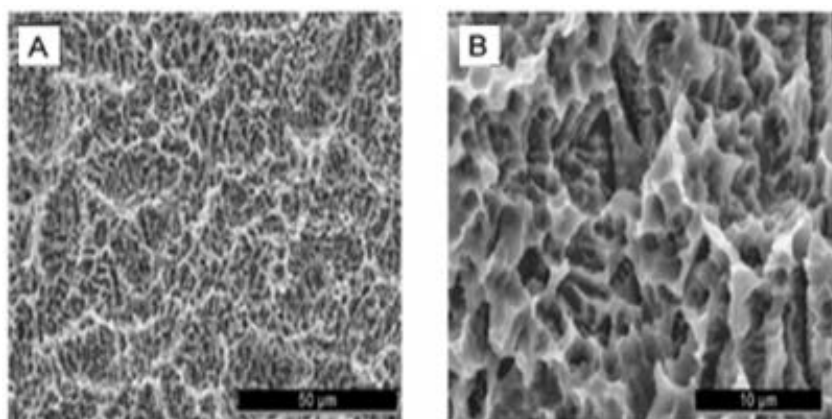


Рис. 2. Микрофотография титановой подложки после (А) пескоструйной обработки (В) кислотного травления

Для улучшения технологического процесса производственного нанесения кальций-фосфатного покрытия используют также способ, заключающийся в распылении материала катода из гидроксиапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ необходимого химического состава, созданного по керамической технологии. При получении керамической таблетки из порошков ГАП должен соблюдаться ряд важных условий: соотношение кальция к фосфору $\text{Ca/P} = 1,67$, что является близким к основному минеральному составу кости; определённый фазовый состав керамики до и после обжига, проверенный методами рентгеноструктурного анализа и ПЭМ микроскопии; высокая дисперсность (размер частиц должен быть мал и обладать высокой дефектностью решётки отдельных кристаллов, иметь определённую структурную организацию)[3].

Одним из перспективных методов магнетронного нанесения слабопроводящих материалов является метод ВЧ-магнетронного распыления. В плазме ВЧ-магнетронного разряда в вакуумной установке в атмосфере аргона под давлением и при определённой плотности распределения мощности, с учётом расстояния до мишени и в течение определённого интервала времени происходит формирование наноструктуры[4]. В связи с эксплуатационными особенностями в работе процесса распыления используют переменное напряжение, так как постоянное напряжение приводит к прекращению возле диэлектрического катода процесса распыления, вследствие образования в пространстве положительного облака. К недостаткам метода относят контроль над факторами, влияющими на свойства покрытий: состояние поверхности титановой подложки, плазма магнетронного разряда и её химический состав, взаимодействие плазмы с основой из титана, плотности потока распыляемой таблетки, влияние температуры подложки, особенность морфологии покрытия при получении его на разных стадиях и, наконец, эволюция сформированных плёнок во внешней среде. Низкая скорость формирования покрытий методом ВЧ-магнетронного распыления несёт на себе значимые потери времени. Метод ВЧ-магнетронного распыления имеет такие достоинства, как низкая температура разогрева титановой основы, при этом сохраняется стехиометрический состав формируемых покрытий; распыление многокомпонентных мишеней[5,6].

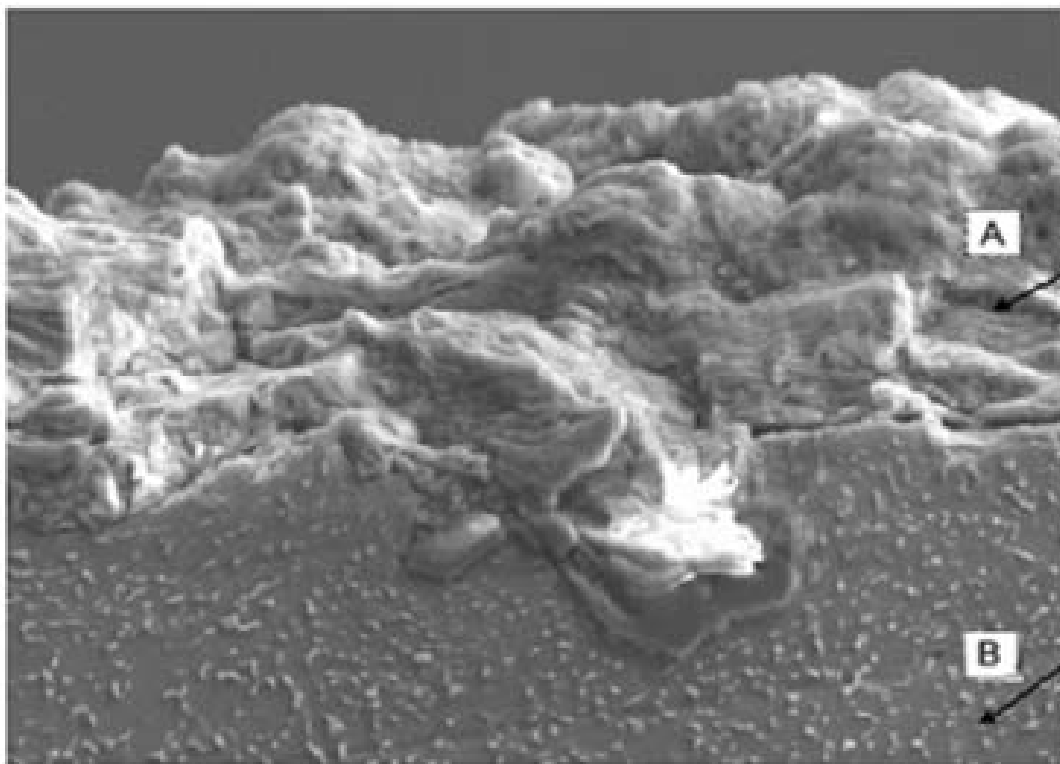


Рис. 3. Микрофотография матрицы
(А) кальций-фосфатное покрытие (В) титановая подложка

Выполнив все ступени создания титановой матрицы с кальций-фосфатным покрытием рис. 3 [8], следует приступить к изучению физико-химических свойств (структура, фазовый и элементарный состав, шероховатость, тип кристаллической решётки, адгезию и т.д.), то есть всех определяющих черт, что должна иметь поверхность имплантата. Возможным недостатком может являться толщина нанесённой плёнки, поэтому предстоит рассчитать высоту покрытия, чтобы она соответствовала и нормальной биоактивности к остеоиндукции, и соизмеримой прочности к кости и адгезии к подложке [7,8]. Методы анализа модифицированных титановых подложек разнообразны и могут быть выделены в отдельную публикацию.

Библиографический список

1. Brinkmann J., Hefti T., Schlottig F. [etal.] Response of Osteoclasts to Titanium Surfaces with Increasing Surface Roughness: An In Vitro Study. *Biointerphases* (2012) 7: 34.
2. Пат. 2444376 Российская Федерация, МПК А61L 27/06. Способ нанесения биоактивного нано- и микроструктурированного кальций-фосфатного покрытия на имплантат из титана и его сплавов / Петровская Т. С., Шахов В. П., Верещагин В.И., Игнатов В. П. N2010150086/15; заявл. 06.12.2010; опубл. 10.03.2012, Бюл. № 7.
3. Сафронова Т. В., Шехирев М. А., Путляев В. И., Третьяков Ю. Д. Керамические материалы на основе гидроксиапатита, полученные из растворов различной концентрации // *Неорганические материалы*. 2007. Т. 43, № 8. С. 1005-1014.
4. Пат. 2523410 Российская Федерация, МПК А61L 27/32. Способ получения наноструктурированного кальций-фосфатного покрытия для медицинских имплантатов / Беркин А. Б., Дерябина В. В. № 2013116102/15; заявл. 09.04.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.
5. Аронов А. М. [и др.] Тонкие кальций-фосфатные покрытия, полученные методом высокочастотного магнетронного распыления и перспективы их применения в медицинской технике // *Медицинская техника*. 2008. № 3. С. 18-22.
6. Пичугин В. Ф. [и др.] Применение высокочастотного магнетронного распыления для формирования на поверхности титана тонких кальций-фосфатных биосовместимых покрытий // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2007. № 11. С. 67-72.
7. Штанский Д. В., Петржик М. И., Башкова И. А. [и др.] Адгезионные, фрикционные и деформационные характеристики покрытий Ti для ортопедических и зубных имплантов // *Физика твёрдого тела*. 2006. Т. 48, вып. 7. С. 1231-1238.
8. Ситников А. А., Яковлев В. И., Сейдуров М. Н., Попова А. А. Исследование тонкой структуры детонационных биосовместимых покрытий из гидроксиапатита кальция // *Ползуновский альманах*. 2010. № 1. С. 167–168.
9. Сагаловски С., Шенерт М. Клеточно-молекулярные механизмы развития асептической нестабильности эндопротеза тазобедренного сустава // *Травма*. 2012. Т. 13, №1. С. 153-160.
10. Stadlinger B., Ferguson S. J., Eckelt U. [et al.] Biomechanical evaluation of a titanium implant surface conditioned by a hydroxide ion solution // *The British Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*. 2012. 50(1). 74–79.

УДК539.612

И.А. Прудникова, М.В. Мамонова¹

Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, г. Омск, Россия

¹Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК ОТ ОРИЕНТАЦИИ ГРАНЕЙ ПОДЛОЖКИ

Аннотация. На основе метода функционала спиновой плотности с введением многопараметрических пробных функций было проведено теоретическое исследование зависимости энергетических характеристик, а также пространственного распределения намагниченности для монослойных пленок железа и кобальта на металлических подложках Au, Ag, Pt, Cu в зависимости от ориентации поверхностной грани подложки. Параметры пробных функций, характеризующие степень спадания электронной плотности и

перемешивания атомов пленки и подложки, определялись из условия минимума функционала межфазной свободной энергии, являющейся сложной функцией температуры и параметра покрытия Θ . Для описания температурной зависимости намагниченности $m(T, \Theta)$ применялись приближения двумерной модели Изинга и XY модели. Проведенные расчеты показали, что в области больших значений параметра покрытия Θ энергия адсорбции E_{ads} для грани (110) больше чем для грани (111), при малых значениях параметра покрытия Θ в зависимости от материала разница составляет примерно 50%. Разница между парамагнитной и ферромагнитной фазой имеет обратную зависимость и максимальна для грани (111), а минимальна для грани (110) для всех рассматриваемых систем.

Ключевые слова: активированная адсорбция, магнитные ультратонкие пленки.

Одна из задач исследований в области наноразмерных структур связана с выявлением условий получения ферромагнитных пленок с наименьшей возможной толщиной и наиболее идеальной межфазной границей раздела пленка-подложка, что позволит получать многослойные магнитные наноструктуры с наибольшим значением магнитосопротивления. Экспериментальные данные показывают [1], что на границе ферромагнитной пленки и благородного металла можно создать искусственную анизотропию типа «легкая ось», поэтому магнитные свойства тонких пленок железа и кобальта на подложках из платины, золота и меди вызывают повышенный интерес [1–6].

Поскольку пространственное распределение атомов напыляемой монослойной пленки характеризуется повторением симметрии поверхностной грани подложки, то изменение ориентации поверхностной грани подложки может существенно повлиять на характеристики напыляемой пленки. Возросшие к настоящему времени технологические возможности получения металлических подложек с различной ориентацией поверхностных граней показывают важность теоретического описания свойств данных поверхностных систем.

При адсорбции металлов температурные эффекты могут привести к перемешиванию атомов пленки и подложки [2], при этом межфазная граница раздела размывается, что отрицательно сказывается на магнитных свойствах системы. Поэтому для практического применения важно предсказать, в какой системе, при каких значениях параметра покрытия и температуры образуется стабильная непрерывная пленка.

В данной работе представлены результаты теоретических расчетов энергетических и магнитных характеристик для магнитных монослойных пленок Fe и Co на подложках из Au, Ag, Pt и Cu при различных ориентациях их поверхностной грани. Теория применяющейся модели подробно описана в [2,3], поэтому приведем основные полученные результаты.

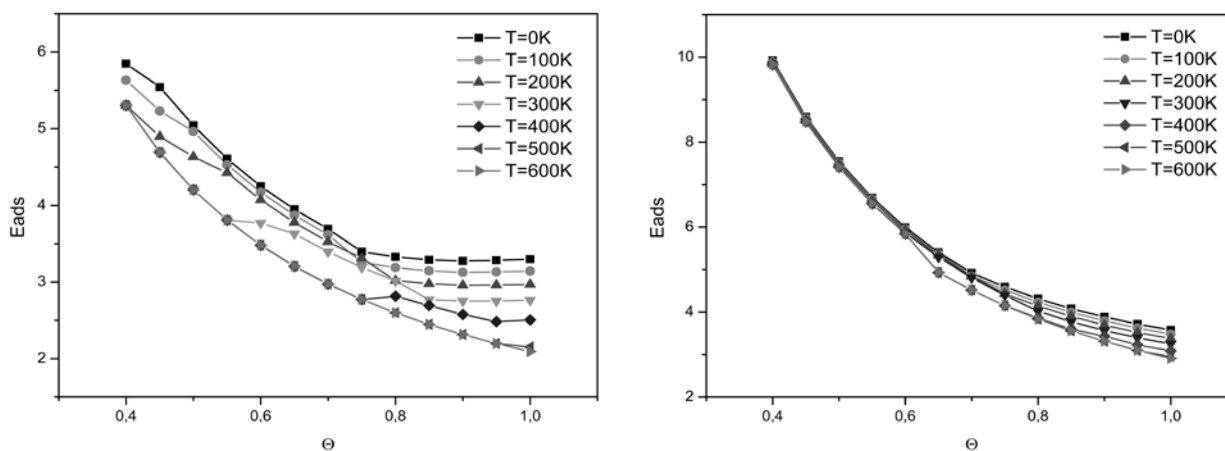


Рис. 1. Зависимость энергии адсорбции E_{ads} эВ/ат от параметра покрытия Θ на грани (111) и (110) для системы Fe/Au при различных температурах

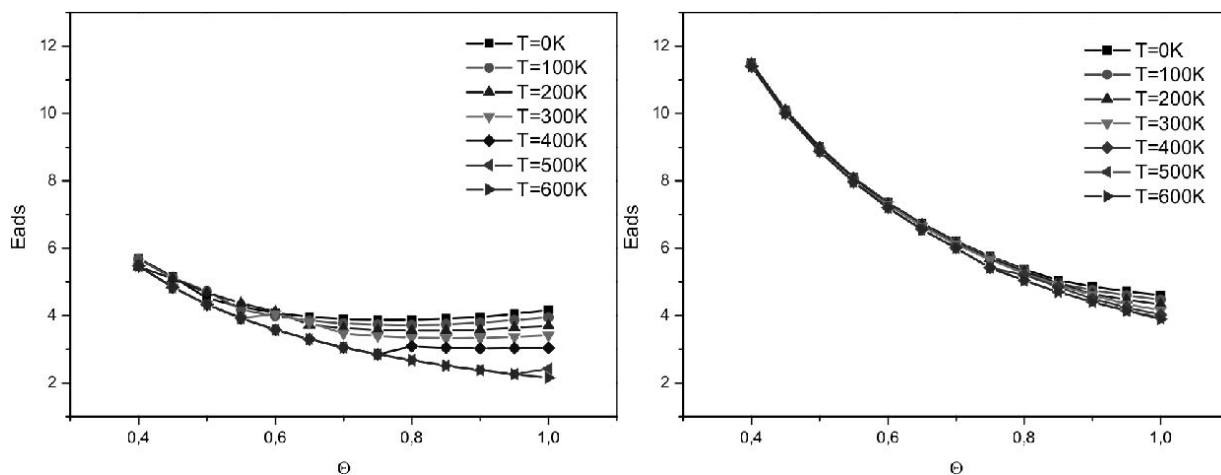


Рис. 2. Зависимость энергии адсорбции E_{ads} эВ/ат от параметра покрытия Θ на грани (111) и (110) для системы Fe/Pt при различных температурах

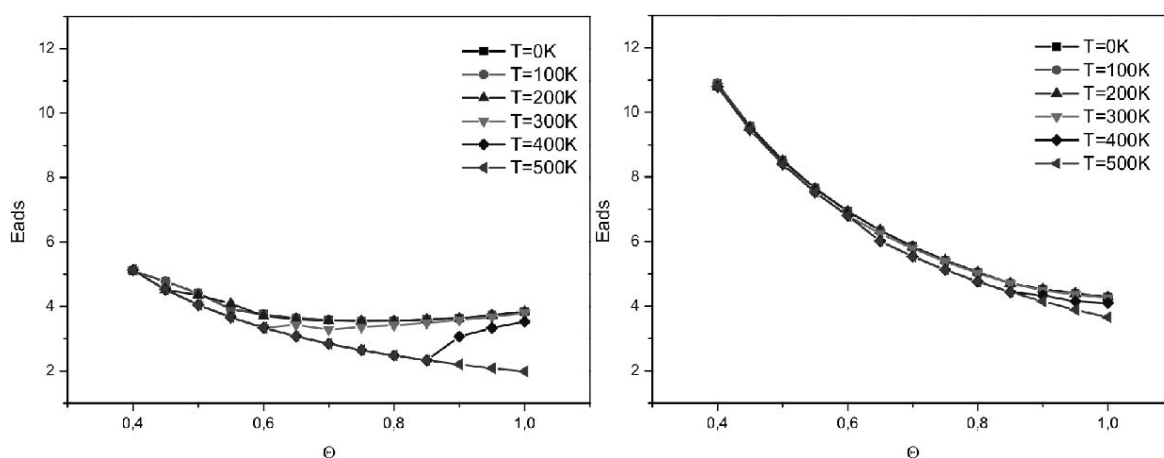


Рис. 3. Зависимость энергии адсорбции E_{ads} эВ/ат от параметра покрытия Θ на грани (111) и (110) для системы Co/Pt при различных температурах

Проведенные расчеты энергии адсорбции (рис. 1-3) показали, что E_{ads} для грани (110) больше, чем для грани (111). При малых значениях параметра покрытия Θ , в зависимости от материала, разница составляет примерно 50%. Разница между парамагнитной и ферромагнитной фазой имеет обратную зависимость и максимальна для грани (111), а минимальна для грани (110) для всех рассматриваемых систем.

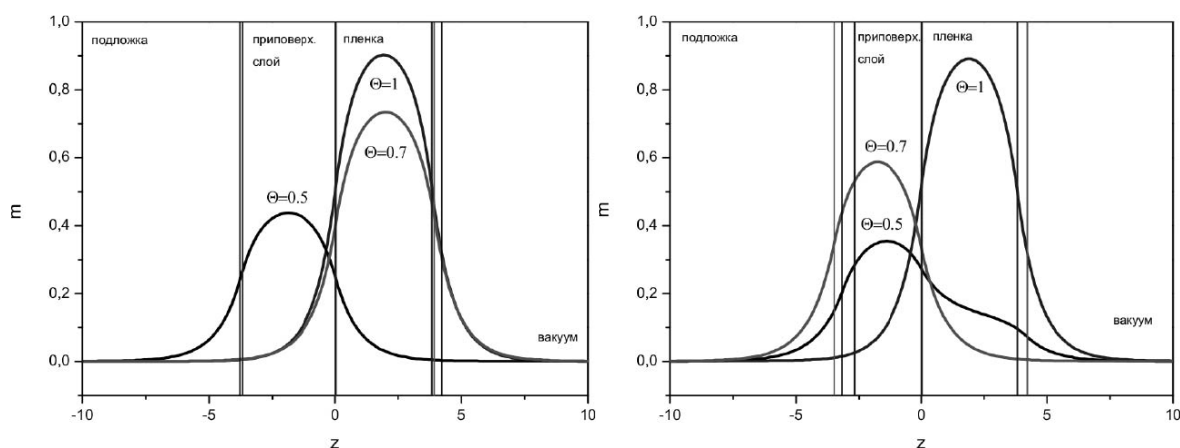


Рис. 4. Пространственное распределение намагниченности при $T=100K$ для граней (100) и (110) для системы Co/Pt при различных параметрах покрытия

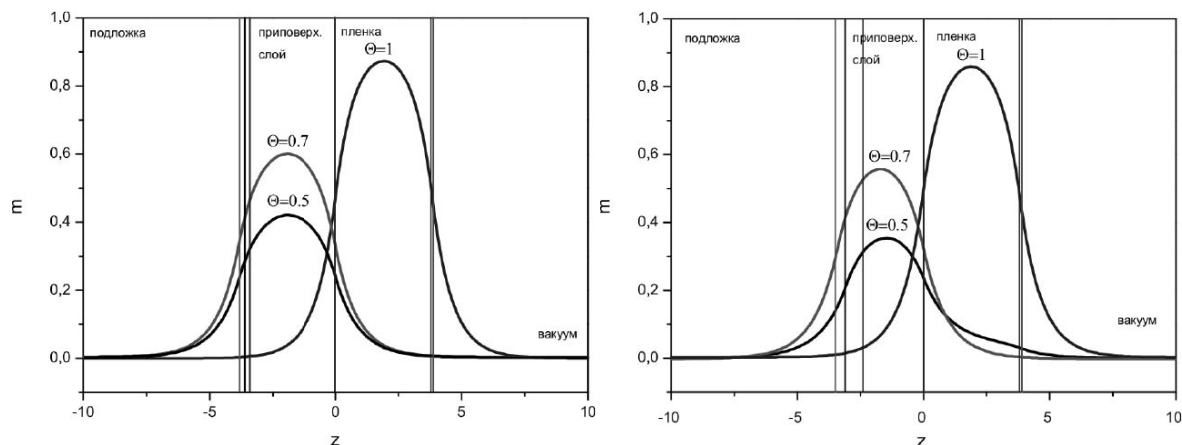


Рис. 5. Пространственное распределение намагниченности при $T=100\text{K}$ для граней (100) и (110) для системы Co/Cu при различных параметрах покрытия

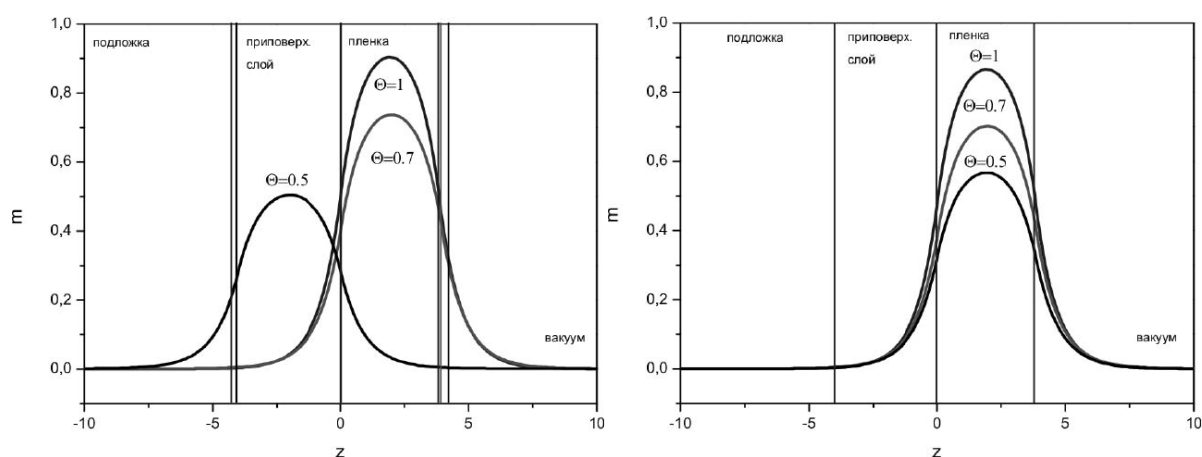


Рис. 6. Пространственное распределение намагниченности при $T=100\text{K}$ для граней (111) и для систем Co/Pt и Co/Cu при различных параметрах покрытия

Анализ результатов расчета пространственного распределения намагниченности (рис. 4-9) позволит определить условия образования стабильной непрерывной пленки. Так для системы Co/Pt при температуре $T=100\text{ K}$ (рис. 4) пик распределения намагниченности находится в области пленки для грани (100) только при $\Theta = 1$, для грани (110) для значений $\Theta = 0.7$ и $\Theta = 1$, а для грани (111) (рис. 6, слева) при всех значениях параметра покрытия. С повышением температуры до $T=300\text{ K}$ меняется поведение только для грани (100), при этой температуре пики распределения намагниченности находятся в области пленки при всех значениях параметра покрытия. Для системы Co/Cu (рис.5) при температуре $T=100\text{ K}$ для грани (100) и (110) пик распределения намагниченности находится в области пленки только при значениях параметра покрытия $\Theta = 1$. На грани (111) (рис. 6, справа) пик распределения намагниченности находится в области пленки при всех исследуемых значениях температуры и параметра покрытия.

Пики намагниченности для системы Fe/Pt (рис.7) для грани (111) находятся в пленке при $T=100\text{K}$ при $\Theta = 0.7$ и $\Theta = 1$, а для грани (110) только при $\Theta = 1$. Для грани (111) при $T=300\text{K}$ (рис. 9, слева) пик в пленке при всех значениях параметра покрытия. Температура $T=300\text{ K}$ больше критической температуры при значении параметра покрытия $\Theta = 0.5$, поэтому намагниченность в системе отсутствует. Для системы Fe/Au пространственное распределение намагниченности имеет аналогичный вид. Для системы Fe/Ag (рис.8) образуется структура типа "сэндвич" для значений параметра покрытия $\Theta < 0.8$, с ростом Θ происходит формирование монослойной пленки.

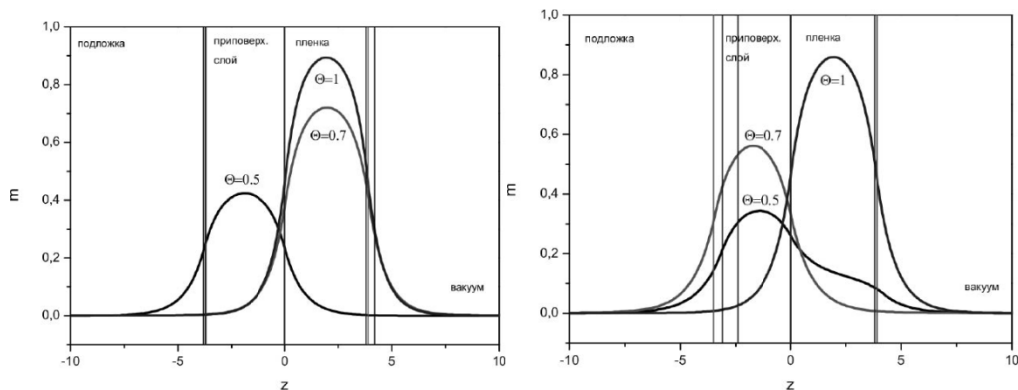


Рис. 7. Пространственное распределение намагниченности при $T=100\text{K}$ для граней (111) и (110) для системы Fe/Pt при различных параметрах покрытия

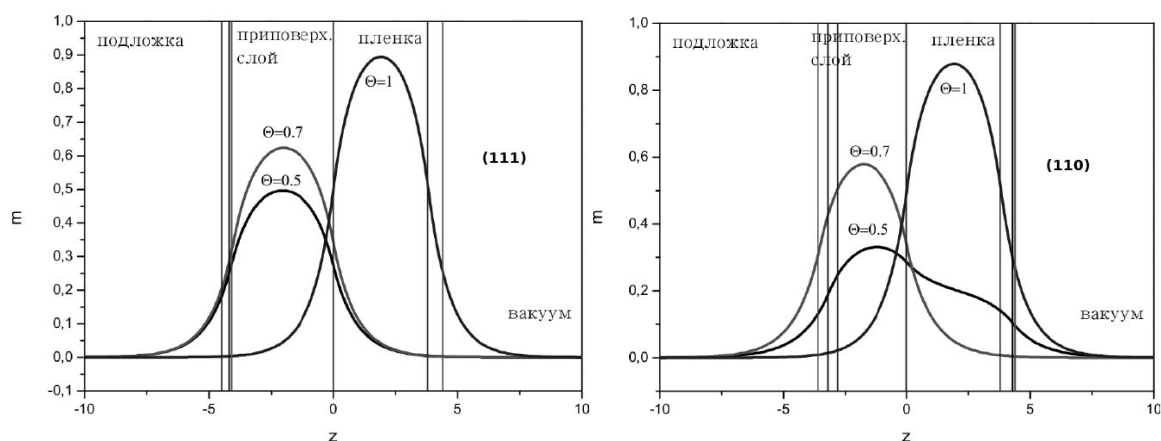


Рис. 8. Пространственное распределение намагниченности при $T=100\text{K}$ для граней (111) и (110) для системы Fe/Ag при различных параметрах покрытия

Для систем Fe/Ag и Fe/Au были выявлены сильные процессы перемешивания, характеризующиеся вытеснением ионами железа ионов серебра и золота на поверхность и образованием плоскости из ионов железа в первом приповерхностном слое с наружной пленкой из атомов серебра или золота. Такое поведение обусловлено тем, что золото и серебро кристаллизуются в виде ГЦК-структур, т.е. симметрия их решетки отличается от ОЦК-структуры для железа, характеризующейся основным ферромагнитным состоянием. При этом поверхностные энергии для рыхлых и плотноупакованных граней Au и Ag характеризуются меньшими значениями, чем поверхностная энергия для железа, так, например: $\sigma_{\text{Fe}}(111)=2170 \pm 330 \text{ мДж/м}^2$, $\sigma_{\text{Ag}}(111)=1205 \pm 90 \text{ мДж/м}^2$, $\sigma_{\text{Au}}(111)=1410 \pm 80 \text{ мДж/м}^2$, причем различия в поверхностных энергиях железа и серебра являются наибольшими.

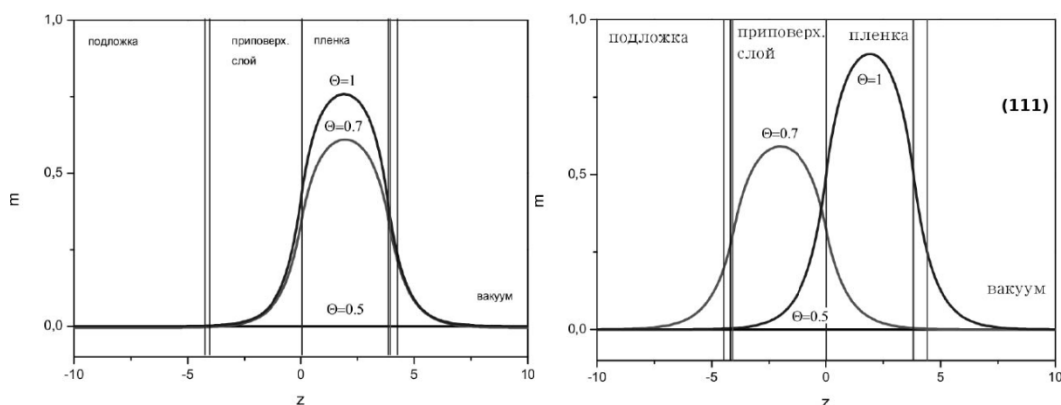


Рис. 9. Пространственное распределение намагниченности при $T=300\text{K}$ для граней (111) для систем Fe/Pt и Fe/Ag при различных параметрах покрытия

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Для всех исследованных систем на грани (110) при малых значениях параметра покрытия Θ наблюдалось сильное перемешивание атомов адсорбата и субстрата, при увеличении параметра покрытия $\Theta \approx 1$ атомы адсорбата формируют монослойную пленку при значениях температуры $T < T_c$. Для грани (100) при малых значениях параметра покрытия формируются структуры типа "сэндвич", а с ростом Θ происходит формирование монослойной пленки. Для грани (111) для всех систем, за исключением системы Fe/Ag, происходит постепенное формирование пленки с ростом параметра покрытия и температуры, при этом с увеличением температуры происходит увеличение значения Θ для формирования монослойной пленки. Для системы Fe/Ag пики распределения намагниченности преимущественно находятся в приповерхностном слое. Результаты наших исследований демонстрируют хорошее согласие с полученными экспериментально СТМ изображениями при осаждении пленки Co на поверхностях подложек Cu(100) [5] и Pt(100) [6].

Библиографический список

1. Vaz C.A. F., Bland A.C., Lauhoff G. Magnetism in ultrathin film structures // Reports on Progress in Physics. 2008. Vol. 71. P. 056501.
2. Мамонова М. В., Прудников В. В., Прудникова И. А. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы. Москва: Физматлит, 2011. 400 с.
3. Прудникова И. А., Мамонова М. В., Стогова М. О. Влияние ориентации поверхностной грани на энергетические и магнитные характеристики активированной адсорбции монослойной пленки железа // Вестник ОмГАУ. 2015. №2. С. 60-70.
4. He K., Zhang L.J., Ma X.C. [et al.] Growth and magnetism of ultrathin Fe films on Pt(100)//Physical Review Letters. 2005. Vol. 72, P.155432.
5. Ney A. A New Design of an UHV-High-Tc-SQUID Magnetometer: Absolute Determination of Magnetic Moments of 3d-Transition Metal Films// Homburg: dissertation.de, 2001. 128p
6. Valvidares S.M., Schroeder T., Robach O. [et al.] Structural and magnetic properties of bcc Co films on Pt(001) studied by magnetic resonant surface x-ray diffraction, STM, and magneto-optical Kerr effect // Physical Review Letters. 2004. Vol. 70. P. 224413.

УДК 539.2

А.Н. Пуртов, В.В. Прудников, П.В. Прудников

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

МОНТЕ-КАРЛО ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ СТАРЕНИЯ В ТРЕХПЛЕНОЧНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ

Аннотация. Рассмотрены результаты численного исследования методом Монте-Карло особенностей неравновесного поведения в мультислойной магнитной структуре с магнитными пленками различных толщин, описываемыми анизотропной моделью Гейзенберга. Анализ полученной двухвременной зависимости автокорреляционной функции при эволюции системы из высокотемпературного начального состояния с $m_0 = 0,05$ позволил выявить эффекты старения, характеризующиеся замедлением релаксации системы с ростом времени ожидания. Продемонстрировано, что, в отличие от объемных магнитных систем, эффекты старения возникают в магнитных сверхструктурах не только вблизи критической температуры T_c ферромагнитного упорядочения в пленках, но и при температуре $T_s = T_c/2$.

Для магнитной мультислойной структуры установлено ослабление эффектов старения с ростом толщины ферромагнитных пленок N .

Ключевые слова: метод Монте-Карло, анизотропная модель Гейзенберга, мультислойные магнитные структуры, эффекты старения.

Исследование макроскопических статистических систем, характеризующихся медленной динамикой, и изучение свойств ультратонких магнитных пленок вызывают в настоящее время повышенный интерес. При медленной эволюции данных систем из неравновесного начального состояния в них наблюдаются свойства старения и нарушение флуктуационно-диссипативной теоремы [1]. Известно, что в окрестности температуры T_c фазового перехода второго рода время релаксации системы является аномально большой величиной $t_{rel} \sim |T - T_c|^{-z\nu}$, вследствие чего статистическая система в критической точке T_c не достигает равновесия в течение всего процесса релаксации. В таких условиях система демонстрирует ряд особенностей своего неравновесного поведения, такие как явления старения и памяти о начальных состояниях. Эффекты старения проявляются на временах $t \ll t_{rel}$ и выражаются в осуществлении двухвременных зависимостей для корреляционной функции от времени ожидания t_w и времени наблюдения $t - t_w$.

$$C(t, t_w) = \frac{1}{V} \int d^d x [\langle S(x, t) S(x, t_w) \rangle - \langle S(x, t) \rangle \langle S(x, t_w) \rangle], \quad (1)$$

Время ожидания t_w характеризует время, прошедшее с момента приготовления образца до начала измерения его характеристик. В течение $t - t_w$, $t_w \ll t_{rel}$ во временном поведении системы проявляется влияние начальных состояний системы.

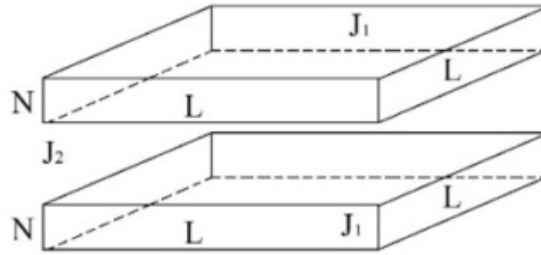


Рис. 1. Модель мультислойной структуры, состоящей из двух ферромагнитных пленок, разделенных пленкой немагнитного металла. N, L – линейные размеры пленок

В данной работе моделирование мультислойных структур (рис. 1) выполнялось методом Монте-Карло для магнитных пленок с размерами $L \times L \times N$ с наложенными периодическими граничными условиями в плоскости пленки.

Магнитные свойства ультратонких пленок на основе Fe, Co и Ni при контакте с подложкой из немагнитного металла наиболее правильно описываются анизотропной моделью Гейзенберга [2, 3], задаваемой гамильтонианом:

$$H = - \sum_{\langle i, j \rangle} J_{ij} \{ (S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) + (1 - \Delta(N)) S_i^z S_j^z \} - h \sum_i S_{ix}, \quad (2)$$

где $S_i = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$ – трехмерный единичный вектор в узле i ; Δ – параметр анизотропии; $h = 0,005 J_1$ – малое внешнее магнитное поле.

Рассматривалась структура из магнитных пленок с толщинами $N = 3, 5, 7$ в единицах атомных слоев. Значение обменного интеграла J_1 , определяющего взаимодействие соседних спинов внутри ферромагнитной пленки, бралось $J_1/k_B T = 1$, а для взаимодействия между пленками $J_2 = -0,3 J_1$. Зависимость параметра анизотропии $\Delta(N)$ от толщины пленок структуры Co/Cu(001) была определена в работе [4] на основе экспериментальных данных по зависимости критической температуры T_c в пленке Co от ее толщины N [5, 6]. Значения

$\Delta(N)$ для магнитных пленок с толщинами $N=3,5,7$, используемые нами для моделирования мультислойных структур представлены в таблице 1.

На первом этапе было проведено исследование температурной зависимости таких равновесных термодинамических величин как намагниченность, магнитная восприимчивость, внутренняя энергия и теплоемкость магнитных мультислойных структур. Критическая температура ферромагнитного упорядочения T_c в пленках была определена по пикам магнитной восприимчивости и теплоемкости для пленок с различными толщинами N . Полученные значения $T_c(N)$ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения параметра анизотропии $\Delta(N)$ и критической температуры T_c для пленок с толщинами $N=3,5,7$

Толщина, N	Параметр анизотропии, $\Delta(N)$	Критическая температура, T_c
3	0,432	1,30
5	0,785	1,45
7	0,997	1,55

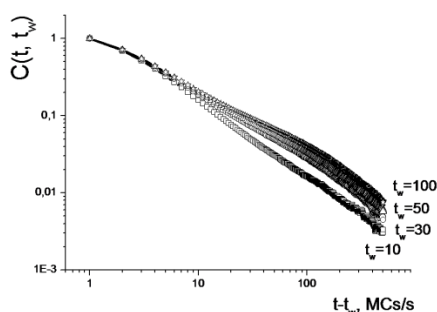
На следующем этапе было проведено исследование неравновесного поведения мультислойной магнитной структуры и расчет двухвременной зависимости автокорреляционной функции $C(t, t_w)$ при эволюции системы из высокотемпературного начального состояния с намагниченностью $m_0=0,05$ с температурами замораживания $T_s=T_c$ и $T_s=0.5J_1<T_c$. При расчете $C(t, t_w)$ применялось выражение

$$C(t, t_w) = \left\langle \frac{1}{NL^2} \sum_{i=1}^{NL^2} S_i(t) S_i(t_w) \right\rangle - \left\langle \frac{1}{NL^2} \sum_{i=1}^{NL^2} S_i(t) \right\rangle \left\langle \frac{1}{NL^2} \sum_{i=1}^{NL^2} S_i(t_w) \right\rangle \quad (3)$$

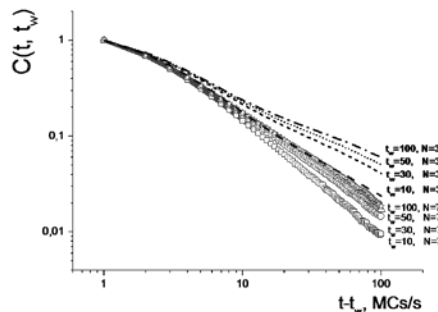
где скобки $\langle \dots \rangle$ обозначают статистическое усреднение.

При расчетах использовался линейный размер пленки $L=64$ и усреднение проводилось по 500 прогонкам, а время моделирования составляло 10^4 MCs/s. В качестве единицы времени динамического процесса используется шаг Монте-Карло на спин MCs/s, который обозначает $N_s = NL^2$ последовательных переворотов спинов в узлах решетки.

На рис. 2 представлена рассчитанная зависимость автокорреляционной функции $C(t, t_w)$ от времени наблюдения $t-t_w$ для различных времен ожиданий $t_w = 10, 30, 50, 100$, вычисленная при критической температуре T_c и различных толщинах ферромагнитных пленок N . Неравновесное поведение мультислойной магнитной структуры наглядно демонстрирует проявление в системе эффектов старения, т.е. замедление временного спада корреляционных эффектов с ростом времени ожидания t_w .



а) толщина пленки $N=5$



б) толщина пленок $N=3, 7$

Рис. 2. Зависимость автокорреляционной функции $C(t, t_w)$ от времени наблюдения $t-t_w$ для различных времен ожиданий $t_w = 10, 30, 50, 100$, вычисленная при критической температуре T_c , для различных толщин ферромагнитных пленок N

Результаты, представленные на рис. 2б, указывают на ослабление эффектов старения с ростом толщины ферромагнитных пленок N , т.к. кривые $C(t, t_w)$ для структур с $N=7$ лежат ниже кривых для $N=3$ при одинаковых значениях времен ожидания t_w . Это связано с ослаблением корреляции при переходе от низкоразмерных квазидвумерных систем к объемным трехмерным системам.

Экспериментальные исследования неравновесного поведения структур Co/Cr [7] и результаты их численного моделирования, проведенные нами в работе [8], показали, что, в отличие от объемных систем, эффекты старения возникают в мультислойных структурах не только при $T_s = T_c$, но и при температурах замораживания $T_s < T_c$. В данной работе для выявления эффектов старения в низкотемпературной фазе был проведен расчет двухвременной зависимости автокорреляционной функции $C(t, t_w)$ для температур замораживания $T_s = 0.5 J_1/k_B = T_c/2$, с результатами, представленными на рис. 3 для структур с различными толщинами ферромагнитных пленок N .

Результаты вычисления двухвременной зависимости автокорреляционной функции $C(t, t_w)$, представленные на рис. 3а,б, указывают на наличие эффектов старения в низкотемпературной фазе мультислойной магнитной структуры, т.е. на замедление временного спада корреляционных эффектов с ростом времени ожидания t_w . При сопоставлении поведения автокорреляционной функции $C(t, t_w)$ для структуры с $N=5$ при температурах T_c (рис. 2а) и $T_c/2$ (рис. 3а) видно, что происходит усиление эффектов старения с уменьшением температуры замораживания системы T_s . Так же как и для случая с $T_s = T_c$, результаты расчета для $T_s = T_c/2$, представленные на рис. 3б, указывают на ослабление эффектов старения с ростом толщины ферромагнитных пленок N , однако влияние толщины пленок на эффекты старения в низкотемпературной фазе оказывается слабее, чем в критической точке. В данных наноструктурах это явление связано с увеличением характеристической корреляционной длины поперечных спин-спиновых корреляций при понижении температуры, приводящим к увеличению времен корреляции и релаксации структуры.

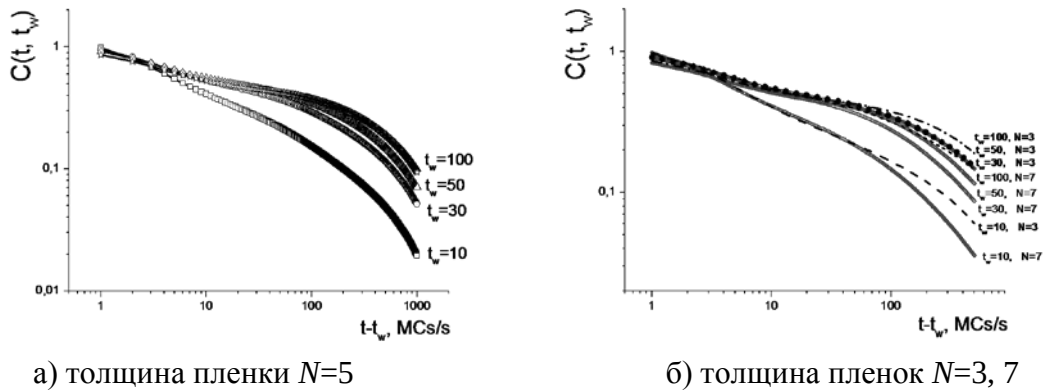


Рис. 3. Зависимость автокорреляционной функции $C(t, t_w)$ от времени наблюдения $t - t_w$ – для различных времен ожиданий $t_w = 10, 30, 50, 100$, вычисленная при температуре $T_s = T_c/2$ для различных толщин ферромагнитных пленок N

Известно [9], что в режиме старения при $t - t_w \sim t_w \gg 1$ двухвременная зависимость автокорреляционной функции характеризуется следующей скейлинговой формой:

$$C(t, t_w) \sim (t_w)^{-2\beta/vz} F_C(t/t_w), (4)$$

где $F_C(t/t_w)$, так называемая скейлинговая функция, является однородной функцией своего аргумента t/t_w и характеризуется на долговременном этапе эволюции $ct - t_w \gg t_w \gg 1$ степенным законом затухания

$$F_C(t/t_w) \sim (t/t_w)^{-c_a} \quad (5)$$

с показателем $c_a = d/z - \theta'$ при эволюции из высокотемпературного начального состояния при $T_s = T_c$, где β , v , z и θ' – известные статические и динамические критические индексы, d – размерность системы.

С целью проверки справедливости скейлинговой формы (4) для автокорреляционной функции были построены зависимости $t_w^{2\beta/vz} C(t, t_w) = F_C(t/t_w)$ от t/t_w при подборе значений показателя $2\beta/vz$ таким образом, чтобы данные для различных t_w ложились по возможности на одну кривую при $t/t_w \geq 1$.

На примере автокорреляционной функции, полученной при эволюции из высокотемпературного начального состояния для структур с $N=3, 5, 7$ (рис. 4а,б,в), видно осуществление «коллапса» данных для $t_w^{2\beta/vz} C(t, t_w)$ и различных t_w при фиксированном значении N на универсальной кривой, соответствующей скейлинговой функции $F_C(t/t_w)$. Выявлен рост значений критического показателя $2\beta/vz$ в скейлинговой форме (4) при увеличении толщины N ферромагнитных пленок в структурах, что соответствует увеличению эффективной размерности пленок при переходе от квазидвумерных систем с $N=3$ к квазитрехмерным с $N=7$. Экспериментальные [5, 6] и численные Монте-Карло [2, 3] исследования критического поведения тонких магнитных пленок показывают, что двумерные поверхностные значения критические показатели принимают для пленок с толщинами $N \leq 4-6$ монослоев, а объемные трехмерные значения для пленок с толщинами $N \geq 20$ монослоев.

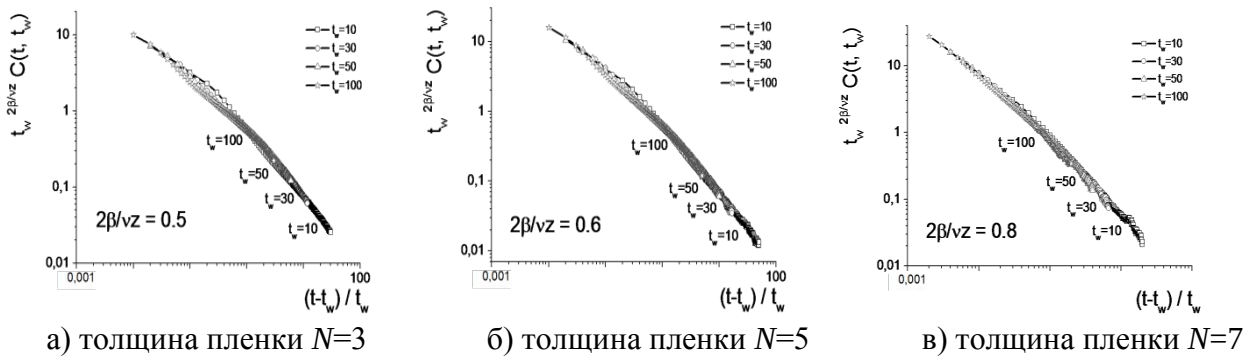


Рис. 4. Скейлинговые зависимости корреляционной функции $t_w^{2\beta/vz} C(t, t_w)$ от $(t-t_w)/t_w$ при эволюции из высокотемпературного состояния для различных толщин ферромагнитной пленки N

Подводя итоги, отметим, что в данной работе в результате расчета двухвременных зависимостей автокорреляционной функции $C(t, t_w)$ методами Монте-Карло было подтверждено осуществление неравновесных эффектов старения в мультислойных магнитных структурах не только при критической температуре $T_s = T_c$, но и в низкотемпературной фазе при температуре замораживания $T_s = T_c/2$. Выявлено ослабление эффектов старения с ростом толщины ферромагнитных пленок N магнитной мультислойной структуры. Существование данных неравновесных эффектов, несомненно, надо учитывать при практическом использовании мультислойных магнитных структур в качестве приборов спинтроники с эффектом гигантского магнитного сопротивления.

Исследования поддержаны грантами РФФИ № 17-02-00279 и Президента РФ № МД-6024.2016.2.

Библиографический список

1. Bouchaud J. P., Vincent E., Hammann J. [et al.] Complex behavior of glassy systems // Lect. Notes Phys. 1997. Vol. 492. P. 184.
2. Прудников П. В., Прудников В. В., Медведева М. А. Размерные эффекты в ультратонких магнитных пленках // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. С. 501-505.
3. Prudnikov P. V., Prudnikov V. V., Menshikova M. A., Piskunova N. I. Dimensionality crossover in critical behaviour of ultrathin ferromagnetic films // JMMM. 2015. Vol. 387. P. 77-82.
4. Romanovskiy D. E., Mamonova M. V., Prudnikov V. V., Prudnikov P. V. Monte Carlo simulation of magnetic multilayered structures with the effects of giant magnetoresistance // J. SibFU. Mathematics & Physics. 2017. Vol.10, No. 1. P. 65–70.
5. Huang F., Kief M. T., Mankey G. J., Willis R. F. Magnetism in the few-monolayers limit // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49, No. 6. P. 3962-3971.
6. Vaz C. A. F., Bland J. A. C., Lauhoff G. Magnetism in ultrathin film structures // Rep. Prog. Phys. 2008. Vol. 71. P. 056501-056578.
7. Mukherjee T., Pleimling M., Binek Ch. Probing equilibrium by nonequilibrium dynamics: aging in Co/Cr superlattices // Phys. Rev. B. 2010. Vol.82. 134425.
8. Прудников В. В., Прудников П. В., Пуртов А. Н., Мамонова М. В. Эффекты старения в неравновесном поведении мультислойных магнитных структур // Письма в ЖЭТФ. Т. 104, Вып. 11. С. 797–805.
9. Prudnikov P. V., Prudnikov V. V., Pospelov E. A. [etal.] Aging and non-equilibrium critical phenomena in Monte Carlo simulations of 3D pure and diluted Ising models // Prog. Theor. Exp. Phys. 2015. 053A01. P.1–20.

УДК 669.017.15

М.В. Рашковец, А.А. Никулина

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ, СФОРМИРОВАННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПРЯМЫМ ЛАЗЕРНЫМ ВЫРАЩИВАНИЕМ

Аннотация. Высокоскоростное прямое лазерное выращивание является наиболее молодым и развивающимся видом аддитивного производства. Сочетание никелевых сплавов, обладающих высокими антикоррозионными свойствами в широком диапазоне агрессивных сред и при повышенных температурах, а также жаропрочностью, с преимуществами аддитивного производства позволяет получать детали сложной геометрической формы для авиа- и ракетостроения с минимальными затратами материала при безотходности производства. Целью исследования является изучение структуры и фазового состава образцов, полученных при различных режимах. Структура исходных порошков и образцов в различных сечениях была изучена с помощью растровой электронной микроскопии. Фазовый состав был оценен методом рентгенофазового анализа. Практически все параметры установки производят бездефектные образцы, за исключением образцов, полученных при мощности 250 Вт. Толщина стенки выращенных образцов имеет линейную зависимость от применяемого диапазона параметров. Исходный порошок и основа сформированного материала являются твердым раствором на основе никеля.

Ключевые слова: высокоскоростное прямое лазерное выращивание, никелевые сплавы, структура, фазовый состав.

Снижение времени производства, сокращение оснастки и экономичность являются основными критериями в современной промышленности. Аддитивные технологии представляют наиболее перспективный кластер промышленности, удовлетворяющий данным потребностям. Они позволяют обрабатывать материал с минимальными потерями и высоким качеством поверхности, производя детали со сложной геометрией, которые сложно либо невозможно получить стандартными методами обработки материалов. Высокоскоростное прямое лазерное выращивание является аддитивной технологией, формирующей слой по методу «directdeposition», когда исходный материал подается одновременно с лазерной энергией на рабочую платформу для послойного формирования детали, в отличие от метода «bed deposition», когда обработка материала идет в сформированном слое исходного материала. Процесс формообразования детали происходит следующим образом: луч лазера фокусируется на подложку для образования зоны расплавленного металла, металлический порошок по каналам подводится из подающего лотка при помощи инертного газа в коаксиальное сопло и струей подается в рабочую область для наращивания объема. Лазер перемещается по траектории движения, созданной по CAD файлам, экспортированным в САМ систему, и плавит металлический порошок [1–3].

Сплавы на основе никеля обладают высокой механической прочностью, коррозионной стойкостью в широком диапазоне агрессивных сред, жаростойкостью, жаропрочностью, а также хорошей обрабатываемостью. Коррозионностойкими сплавами на основе никеля являются системы Ni-Mo с содержанием молибдена от 25 до 30 %, а также системы Ni-Cr с процентным содержанием хрома в диапазоне 35–50 %. При увеличении содержания легирующих элементов обрабатываемость сплавов давлением ухудшается, поэтому сплавы данного типа используют в литом состоянии [4]. Основным направлением применения таких сплавов является авиационная промышленность.

Формирование образцов методом высокоскоростного прямого лазерного выращивания было осуществлено в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, кафедра «Сварка и лазерные технологии», на установке ErlaserWeld. Скорость сканирования составляла 1,2 мм/с, скорость подачи порошка – 45г/мин, мощность лазера изменялась в диапазоне от 250 до 1500 Вт. В работе применялся волоконный лазер с постоянным лазерным пятном 1,2 мм. Выращивание производилось при использовании коаксиального сопла.

Исследование структуры исходных порошков на растровом электронном микроскопе CarlZeissEVO 50 XVP не выявило дефектов, частицы порошков имеют шаровидную форму (рис. 1). В таблице 1 представлены химические составы исходных порошков, которые были оценены на энергодисперсионном анализаторе EDAX. Фазовый состав порошков, выявленный на рентгеновском дифрактометре, в обоих случаях показал наличие твердого раствора на основе никеля (рис. 2).

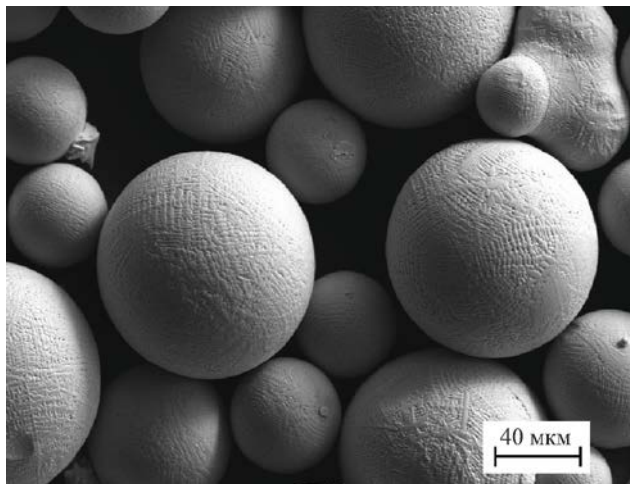


Рис. 1. Микрофотография исходного порошка системы Ni-Co-Cr

Химический состав исходных порошков

Хим. элемент, содержание, вес %	Ni	Cr	Mo	Nb	Si	Co	Ti	Al
система Ni-Cr-Mo	58,5	21,78	10,88	3,87	0,51	-	-	-
система Ni-Co-Cr	51,8	9,96	3,9	2,6	-	13,8	3,14	3,9

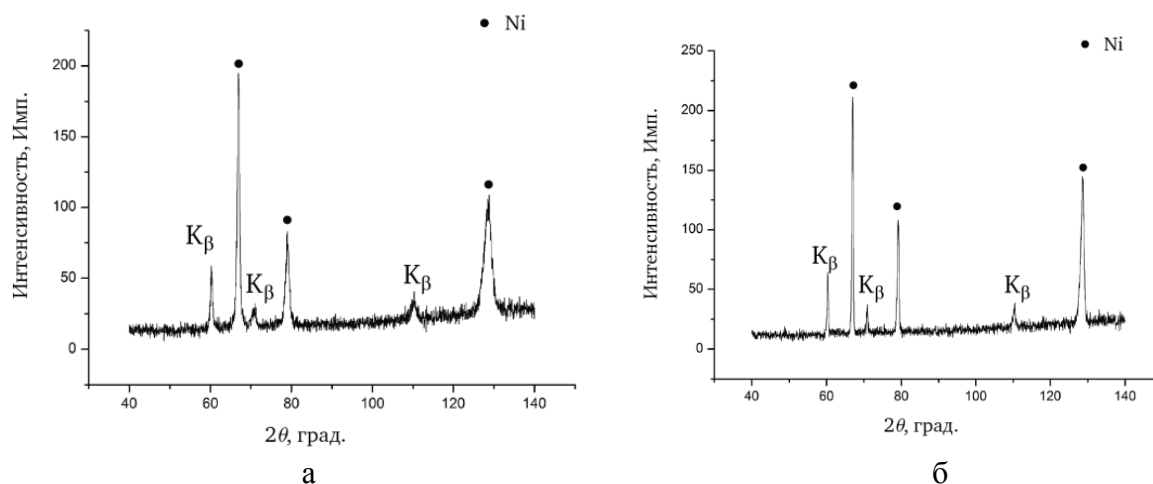


Рис. 2. Рентгенограммы исходных материалов: система Ni-Cr-Mo (а); система Ni-Co-Cr (б)

Структура образцов изучалась в различных сечениях – вдоль и поперек выращивания слоев. В продольном сечении была выявлена дендритная структура, поперечное сечение имело сетчатое строение. В продольном сечении в пределах одного слоя выделяются две зоны: зона столбчатых кристаллов и зона с дисперсной структурой, наличие которой обеспечивается повторным влиянием лазерного излучения вследствие послойного выращивания (рис. 3). Сечения рассматривались относительно направления лазерного луча. При мощности в 250 Вт наблюдались не полностью расплавленные частицы исходного материала [5]. В таблице 2 представлены значения толщины стенки образцов и отдельно выращенного слоя в зависимости от мощности лазерного излучения.

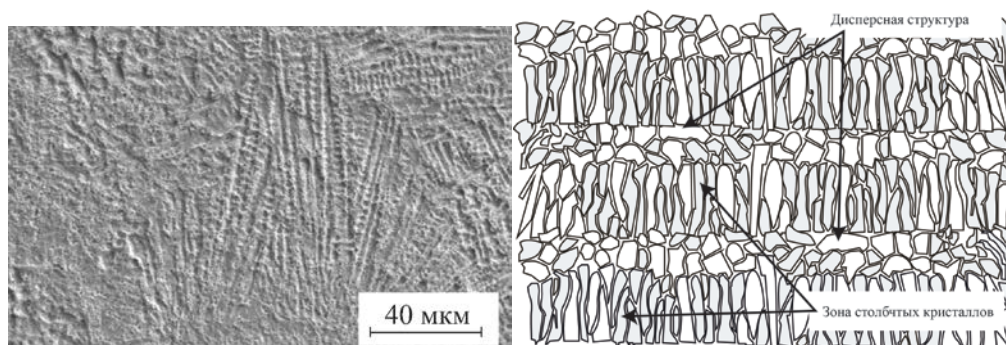


Рис. 3. Продольное сечение выращенного образца

Таблица 2

Влияние мощности лазерного излучения на толщину стенки образцов

Мощность, Вт		250	450	500	600	750	900	1000	1200	1500
Средняя толщина, μ	Ni-Cr-Mo	860	-	970	-	1100	-	1640	-	1890
	Ni-Co-Cr	800	890	-	1160	-	1270	-	1530	-

Анализ фазового состава полученных лазерным выращиванием материалов показал наличие твердого раствора на основе никеля, также как и в исходных порошках. При обработке рентгенограмм было замечено изменение базиса кристаллической решетки, что свидетельствует о наличии текстуры, сформированной в результате направленного роста кристаллов.

Результаты исследования тонкой структуры полученных материалов на просвечивающем электронном микроскопе свидетельствуют о зеренном строении дендритов (рис. 4). Также были зафиксированы скопления дислокаций и частиц (рис. 5 а, б).

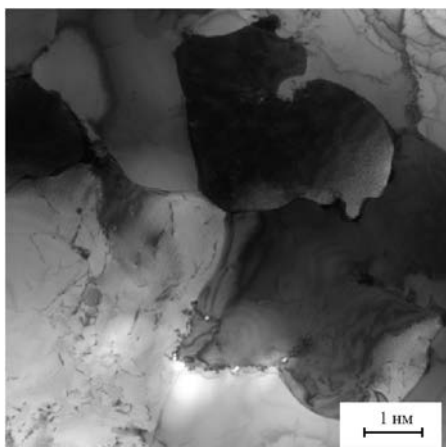


Рис. 4. Тонкое строение выращенного материала

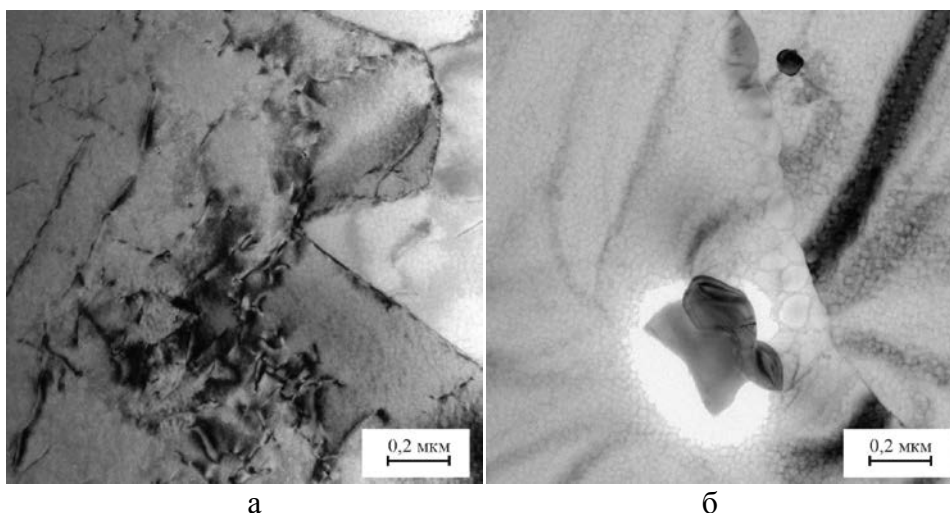


Рис. 5. Дислокации (а) и частица (б) в материале, полученном лазерным выращиванием порошка сплава Ni-Cr-Mo

В дальнейшем планируется провести исследования фазового состава сформированных материалов с использованием методов дифракции электронов.

Библиографический список

1. Khaing M. W., Fuh J. Y. H., Lu L. Direct Metal Laser Sintering for Rapid Tooling: Processing and Characterisation of EOS Parts // J. Mater. Process. Technol. 2001. P. 269–272. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00584-2
2. Dindaa G. P., Dasguptaa A. K., Mazumderb J. Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability // Materials Science and Engineering A 509. 2009. P. 98–104. DOI: 10.1016/j.msea.2009.01.009

3. Dwivedi R., Zekovic S., Kovacevic R. A novel approach to fabricate unidirectional and branching slender structures using laser-based direct metal deposition // International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47. Issues 7-8. 2007. P. 1246-1256. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.012

4. Фетисов Г. П., Карпман М. Г., Матюнин В. М. [и др.] Материаловедение и технология металлов: Учебник для студентов машиностроит. спец. вузов / Под ред. Г. П. Фетисова. 5-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2007. 862 с.

5. Рашковец М. В., Никулина А. А., Климова О. Г. Особенности материала, полученного высокоскоростным прямым лазерным выращиванием сплава на основе никеля // Актуальные проблемы машиностроения: материалы 3-й Международной научно-практической конференции АПМ-2016 / НГТУ, Новосибирск, 2016. В 3ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. С. 384-388.

УДК 620.1:62-971+539.26+548.1

Н.А. Семенюк, Ю.В. Кузнецова¹, Вад. И. Суриков

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹ОАО «Сургутнефтегаз», г. Сургут, Россия

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОМ НА СТРУКТУРУ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ

Аннотация. Диоксид ванадия обладает весьма уникальным свойством – фазовым переходом металл-диэлектрик (ФПМД). При температуре $T_{MD} \sim 340$ К у соединения скачком изменяется почти на 7 порядков электросопротивление (ниже T_{MD} VO_2 диэлектрик). Это обстоятельство используется в приборах автоматизации технологических процессов. С целью стабилизации свойств диоксида ванадия его легируют некоторыми переходными металлами.

Ключевые слова: диоксид ванадия, кристаллическая решетка, рентгеноструктурные параметры, пикнометрическая плотность, рентгеновская плотность.

Как известно [1], одновременно с электрическими свойствами происходит структурный фазовый переход (низкотемпературная моноклинная фаза переходит в тетрагональную), а с этим связано изменение других физических свойств (магнитных, теплофизических и пр.).

Цель настоящей работы – исследовать рентгеноструктурные параметры твердых растворов диоксида ванадия с железом, проследить за изменением параметров кристаллической решетки с изменением состава образцов, а также определить их пикнометрическую плотность и сравнить ее с рентгеновской.

Образцы для исследования были приготовлены И.И.Миллером в институте химии УрО РАН.

Рентгеноструктурные исследования выполнялись на дифрактометрах Shimadzu Maxima_X XRD-7000 и ДРОН 4М (высокотемпературной приставке).

Для определения пикнометрической плотности исследуемых образцов был использован метод гидростатического взвешивания. Поскольку исследуемые соединения порошкообразные, то для них была изготовлена специальная мельхиоровая ампула размерами 8x20x20 мм, которая фиксировалась на плече аналитических весов.

Т.к. выталкивающая сила в жидкости действует и на порошок, и на ампулу, можно записать:

$$(P_{\Pi} + P_A)_{\text{в}} - (P_{\Pi} + P_A)_{\text{ж}} = F_{\text{АП}} + F_{\text{АА}}, \quad (1)$$

где $(P_{\Pi} + P_A)_{\text{в}}$ – вес порошка и ампулы в воздухе; $(P_{\Pi} + P_A)_{\text{ж}}$ – вес порошка и ампулы в жидкости; $F_{\text{АА}}$ – сила Архимеда, действующая на ампулу; $F_{\text{АП}}$ – сила Архимеда, действующая на порошок.

Легко показать, что сила Архимеда, действующая на порошок, может быть определена:

$$F_{\text{АП}} = \rho_{\text{ж}}(P_{\Pi} / \rho_{\Pi}), \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, P_{Π} – вес порошка в воздухе, ρ_{Π} – плотность порошка.

Решая совместно (1) и (2), легко показать, что плотность порошкового материала может быть определена:

$$\rho_{\Pi} = \rho_{\text{ж}} \cdot P_{\Pi} / \{(P_{\Pi} + P_A)_{\text{в}} - (P_{\Pi} + P_A)_{\text{ж}} - F_{\text{АА}}\} \quad (3)$$

В качестве жидкости при измерении плотности порошкообразных образцов твердых растворов $V_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_2$ использовался этиловый спирт, хорошо смачивающий исследуемые порошки. Плотность этилового спирта контролировалась с помощью пикнометра. Величина плотности этилового спирта оставалась постоянной в течение всего эксперимента и равной $\rho_{\text{ж}} = 0,813 \text{ г/см}^3$.

Величина выталкивающей силы, действующей на ампулу, определялась как разница между весом ампулы в воздухе и в спирте.

Ускорение свободного падения в расчетах принималось равным $9,8150 \text{ м/с}^2$ (для Омска, alfarascal.ru). Измерения проводились при комнатной температуре (20°C) в условиях термостатирования ($\pm 0,1^\circ\text{C}$).

Относительная погрешность измерения, оцененная по методике для косвенных измерений, не превышала 2%.

На рисунке 1 приведены рентгенограммы, перестроенные в штрихдиаграммы, для моноклинной и тетрагональной структуры двуокиси ванадия.

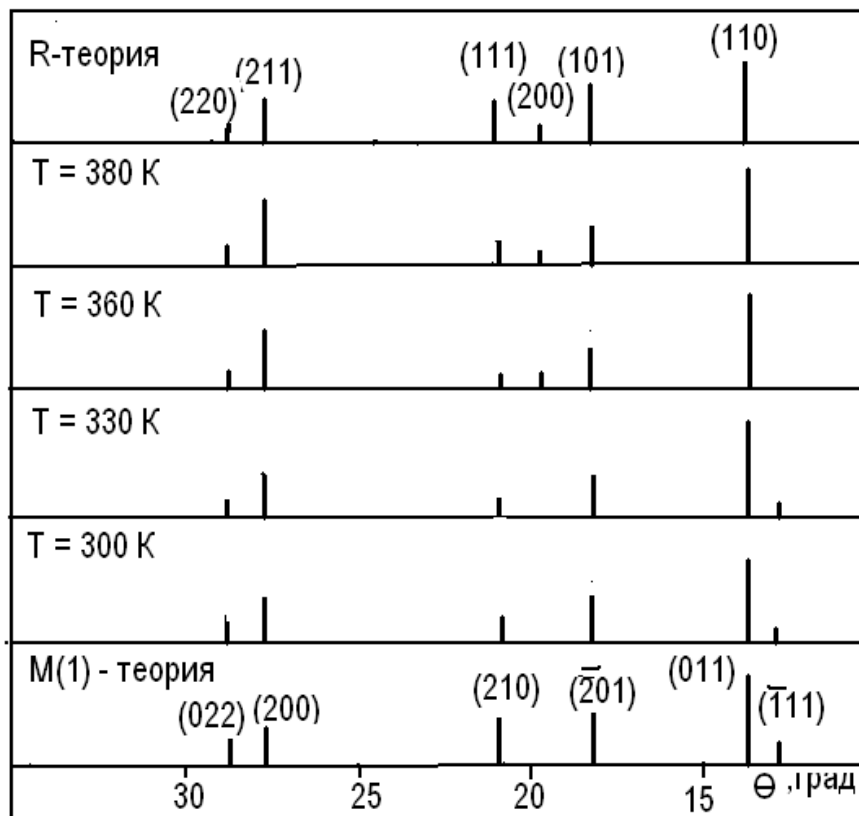


Рис.1 Штрихдиаграмма двуокиси ванадия

Рентгеноструктурные исследования показали, что все исследованные нами образцы являются однофазными, а характер рентгеновских рефлексов позволяет сделать вывод о гомогенности образцов. Параметры кристаллической решетки, определенные нами для этой серии образцов, приведены в таблице 1 и хорошо согласуются с данными работы [2]. Как видно из полученных результатов, все параметры кристаллической решетки испытывают изменения при легировании диоксида ванадия железом. Наименьшее изменение претерпевает параметр «b», больше изменяются «a» и «c». Сведения о параметрах решетки, а также об элементном составе образцов позволили рассчитать объемы элементарных ячеек V_p и рентгеновскую плотность материалов ρ_p :

$$\rho_p = M/V_p = M/a \cdot b \cdot c \cdot \sin \beta, \quad (4)$$

Таблица 1

Параметры кристаллической решетки
твердых растворов $V_{1-x}Fe_xO_2$ при температуре 20 °C

Образец	a, Å	b, Å	c, Å	β , °
VO ₂	6,071	4,525	5,675	126,7
V _{0,99} Fe _{0,01} O ₂	5,711	4,513	5,341	122,4
V _{0,97} Fe _{0,03} O ₂	5,613	4,501	5,222	121,3
V _{0,93} Fe _{0,07} O ₂	5,702	4,462	5,204	120,6

Масса элементарных ячеек M рассчитывалась в предположении, что твердые растворы $V_{1-x}Fe_xO_2$ являются твердыми растворами замещения. Способ расчета масс элементарной ячейки в этом случае предложил Гинье [3]. В случае, если соединение $V_{1-x}Fe_xO_2$ является твердым раствором замещения, то все атомы V, Fe и O должны располагаться в узлах кристаллической решетки и тогда, согласно [3]:

$$M = (4 C_{Fe} \cdot M_{Fe} + 4 C_{VO_2} \cdot M_{VO_2}) / 100 \cdot N_A, \quad (5)$$

где

$$C_{Fe} = \{x / M_{Fe}\} / \{x / M_{Fe} + (100 - x) / M_{VO_2}\} \quad (6)$$

$$C_{VO_2} = \{(100 - x) / M_{VO_2}\} / \{x / M_{Fe} + (100 - x) / M_{VO_2}\} \quad (7)$$

Здесь M – масса элементарной ячейки, C_{Fe} и C_{VO_2} – расчетные параметры, определяемые из (6) и (7), M_{Fe} – масса атома Fe, M_{VO_2} – молярная масса VO₂, N_A – число Авогадро, x – концентрация примесей железа.

Результаты расчетов рентгеновской плотности ρ_p , а также значения пикнометрической плотности $\rho_{п}$, определенные экспериментально, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты определения рентгеновской и пикнометрической плотностей $V_{1-x}Fe_xO_2$

Образец	V, Å ³	M, г/моль	ρ_p , г/см ³	$\rho_{п}$, г/см ³	$\Delta\rho$, г/см ³	$n \cdot 10^{21}$, см ⁻³
VO ₂	125,0	55,26	4,42	4,64	0,22	2,3
V _{0,99} Fe _{0,01} O ₂	116,2	54,50	4,69	4,76	0,07	0,4
V _{0,97} Fe _{0,03} O ₂	112,7	54,30	4,82	4,88	0,06	0,3
V _{0,93} Fe _{0,07} O ₂	114,0	53,32	4,68	4,70	0,02	0,1

Как видно из полученных результатов, рентгеновские и пикнометрические плотности материалов различаются. Наибольшее различие плотностей наблюдается для чистого диоксида ванадия ($\Delta\rho = 0,22 \text{ г/см}^3$). С увеличением содержания железа в образце $\Delta\rho$ уменьшается и для $V_{0,93}Fe_{0,07}O_2$ разница составляет $0,02 \text{ г/см}^3$. На наш взгляд, различие рентгеновской и пикнометрической плотностей может быть связано с искажениями кристаллической решетки, обусловленными наличием дефектов в материалах. Концентрация дефектов может быть оценена:

$$n = (\Delta\rho/M) \cdot N_A \quad (8)$$

Результаты соответствующих расчетов приведены в таблице 2. Анализируя полученные результаты, можно предположить, что легирование железом упорядочивает кристаллическую решетку $V_{1-x}Fe_xO_2$, что ведет к заметному уменьшению дефектов.

Библиографический список

1. Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. М.: Наука, 1979. 133 с.
2. Кузнецова Ю. В., Лях О. В., Меркушев Е. Н., Суриков В. И. Диоксид ванадия и твердые растворы на его основе. Фазовые переходы, структура и свойства. М.: Физматлит, 2013. 104 с.
3. Гинье А. Рентгенография кристаллов. М.: Физматлит, 1961. 322 с.

УДК 678.074: 678.01

Е.П. Целых, С.Я. Ходакова, В.И. Суриков¹

Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

СВОЙСТВА РЕЗИНЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОЛЫМИ КОРУНДОВЫМИ МИКРОСФЕРАМИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Аннотация. Объемное модифицирование существующих каучуков и резин является современным направлением получения эластомерных композиций с требуемыми свойствами. Проведено модифицирование полыми корундовыми микросферами Al_2O_3 с размером частиц 100-180 мкм резины на основе комбинации полихлоропренового и бутадиен-нитрильного каучуков с целью снижения коэффициента трения и интенсивности износа. В работе исследовано изменение физико-механических и антифрикционных свойств модифицированных резин. Получено значительное снижение истираемости резины при сохранении удовлетворительных физико-механических свойств.

Ключевые слова: объемное модифицирование, антифрикционные материалы, истираемость, коэффициент трения, износ.

Современное машиностроение широко использует различные эластомерные композиции, в основном это резины, работающие в широком интервале скоростей скольжения, температур и давлений. Для использования резин в антифрикционных целях наиболее важна их высокая износостойкость, характеризующаяся низкими истираемостью и коэффициентом трения [1].

Объемное модифицирование существующих эластомерных композиций является современным направлением получения резин с требуемыми свойствами. С целью снижения

коэффициента трения и интенсивности износа в полимерную основу вводят различного рода антифрикционные материалы, модификаторы–наполнители. Анализ литературных данных по исследованию триботехнических свойств полимерных композиций, объемно модифицированных антифрикционными материалами, показал, что введение их приводит к значительному повышению износостойкости [2–4]. Так, например, в опубликованной работе [5] представлены результаты испытаний композита с политетрафторэтиленом (ПТФЭ) и модифицированными оксидами металлов с различным содержанием простых (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2) и сложных (шпинелей CoAl_2O_4 и MgAl_2O_4 , и кордиерита $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) оксидных нанопорошков [6]. Показаны результаты исследования механических и трибологических свойств композиционных материалов на основе ПТФЭ и указанных материалов, сделан вывод о том, что относительное удлинение и прочность их практически остались на одном уровне по сравнению с исходным материалом, но получено значительное снижение (в 15–100 раз) скорости изнашивания композита.

В качестве объектов данного исследования были выбраны эластомерная композиция на основе комбинации хлоропренового и бутадиен-нитрильного каучуков – 70 и 30 мас.ч. соответственно, применяемая для изготовления резинотехнических изделий.

В качестве модификатора-наполнителя были использованы полые корундовые микросферы Hollow Corundum Microspheres размером частиц HCM-L - 100-180 мкм в составе указанных композиций с массовым содержанием 3, 5, 10, 15 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука для повышения износоустойчивости, а именно снижения истираемости и коэффициента трения по абразивной и металлической поверхностям, а также изучение влияния на физико-механические свойства модифицированных резин.

Принципиальные составы базовых и опытных резиновых смесей представлены в таблице 1. Микросферы вводили в каучуковую матрицу. При изготовлении резиновых смесей трудностей технологического характера не наблюдалось. Вулканизацию образцов осуществляли в прессе вулканизационном гидравлическом в оптимальных режимах.

Таблица 1

Принципиальный состав базовой и опытных резиновых смесей

Ингредиенты, показатели	Принципиальный состав резиновых смесей, мас.ч. на 100 мас.ч. каучука				
	1 база	2	3	4	5
Хлоропреновый каучук	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0
БНКС-28АМН	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Микросферы HCM-L 100-180	-	3,0	5,0	10,0	15,0
Оптимальный режим вулканизации, °С x мин	153x30				

Для проведения испытаний резины на сопротивление истиранию и определения коэффициента трения использовали прибор типа МИ-2 с абразивной поверхностью (ГОСТ 426-77) с числом оборотов вращения 200; с металлической поверхностью (сталь Ст25) и числом оборотов вращения 3000. На образцы действовала нормальная сила 2,6 кгс. Результаты по истираемости и коэффициенту трения базовых и опытных эластомерных композиций представлены в таблице 2 и на диаграммах рис. 1 и рис. 2.

Триботехнические свойства и физико-механические показатели резин

Наименование показателей	1 база	Резина №			
		2	3	4	5
Триботехнические свойства					
Истираемость по абразиву (ГОСТ 426-77), м³/ТДж	107,0	79,2	82,1	66,5	71,1
Коэффициент трения по абразиву (ГОСТ 426-77)	1,10	1,10	1,14	1,07	1,03
Истираемость по металлическому диску, см³/кВ·ч	0,54	0,24	0,29	0,19	0,17
Коэффициент трения по металлическому диску	0,60	0,58	0,61	0,62	0,64
Физико-механические показатели					
Усл. прочность при растяжении, МПа	10,27	8,99	8,78	9,16	8,90
Относительное удлинение при разрыве, %	510	510	510	510	480
Относительная остаточная деформация после разрыва, %	12	10	10	9	7



Рис. 1. Истираемость резин по абразиву



Рис. 2. Истираемость резин по металлическому диску

Из анализа полученных данных по истираемости и коэффициенту трения резин выявлено, что у опытных резин на основе комбинации хлоропренового и бутадиен-нитрильного каучуков, содержащих микросферы, имеет место снижение истираемости на 23–37 % по абразивной поверхности (с 107 до 66,5 м³/ТДж) без изменения коэффициента трения, снижение истираемости на 47–68 % по металлическому диску (с 0,54 до 0,17 см³/кВ·ч). Оптимальное количество микросфер в составе резины составляет 5–10 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука. Необходимо отметить, что введение микросфер практически не оказало существенного влияния на коэффициент трения как по абразивной, так и по металлической поверхности.

По результатам определения физико-механических показателей (табл. 2) можно считать, что для опытных резин, содержащих в своем составе полые корундовые микросферы, значения показателей находятся практически на одном уровне с базовой

резиной, за исключением незначительного снижения условной прочности при растяжении с 10,27 (значение исходной резины) до 9,16–8,78 МПа опытных резин (образцы № 2-5).

Поверхность полых корундовых микросфер неровная (рис. 3), что делает ее активной в поверхностно-адсорбционных процессах при механическом заклинивании и сцеплении с молекулярной основой эластомерной композиции. За счет структурной шероховатой поверхности микросферы удерживаются в резиновом массиве. Можно предположить, что прочность связи микросферы с резиновой матрицей недостаточная в связи с отсутствием на поверхности микросферы функциональных групп или свободных связей, способных участвовать в образовании сетчатой трехмерной структуры и образовывать химические связи с макромолекулами каучука. Капсулы микросфер в резиновом массиве выступают в роли «шипов» (рис. 4) антифрикционных составляющих резины, которые обеспечивают контакт с абразивным материалом и обеспечивают меньшее истирание эластомерной матрицы. Полые корундовые микросферы являются сверхпрочным материалом, поэтому введение их в состав эластомерной композиции способствует более длительному сопротивлению к истиранию, что приводит к меньшей потере массы резины.

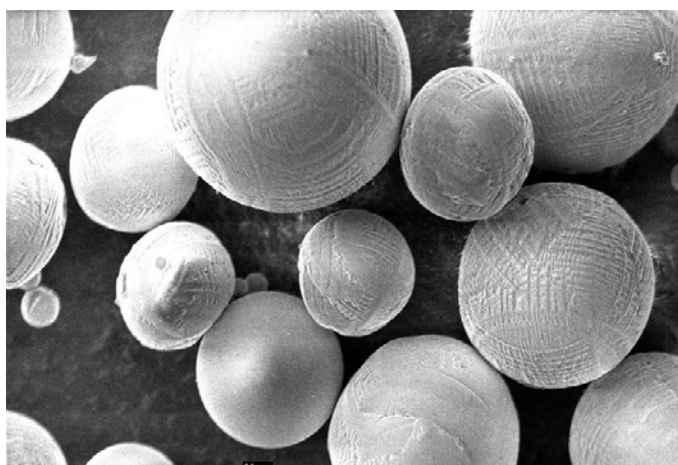
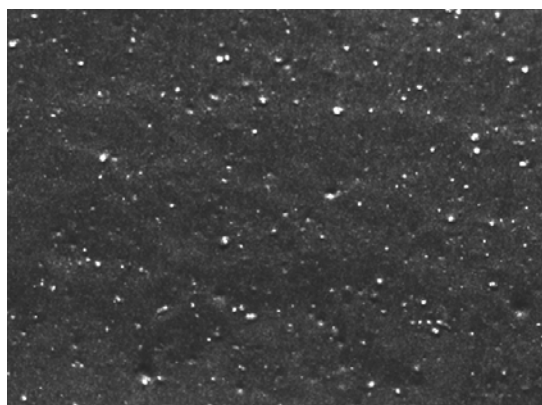
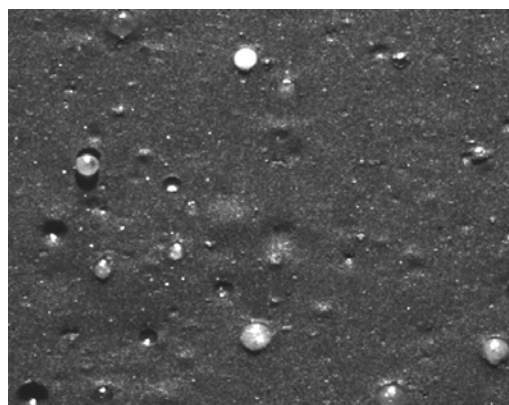


Рис. 3. Внешний вид полых корундовой микросферы



А



Б

Рис. 4. Микрофотографии поверхности резины: А – базовая; Б – опытная резина с добавлением полых корундовых микросфер HCM-L (100-180 мкм) в количестве 5 мас.ч.

ВЫВОДЫ

1. Проведено объемное модифицирование резины на основе комбинации хлоропренового и бутадиен-нитрильного каучуков посредством введения в ее состав микросфер с размером частиц 100–180 мкм.

2. Отмечено значительное снижение истираемости резин на 23–37 % по абразивной поверхности и на 75–85 % по металлическому диску по сравнению с базовой резиной в зависимости от массового содержания микросфер в ее составе. Отмечено, что при этом введение микросфер в маслостойкий композит на коэффициент трения практически не оказало существенного влияния.

3. Выявлено, что оптимальное содержание в резине полых корундовых микросфер составляет от 5 до 10 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука.

4. Отмечено незначительное изменение условной прочности при растяжении эластомерных композиций с введением в рецептуру полых корундовых микросфер.

Библиографический список

1 Аксаков И. С., Анисимов А. В., Антипов В. С. [и др.] Материалы для судостроения и морской техники: Справ.: В 2 т. Т. 2. / под ред. И. В. Горынина. СПб.: НПО «Профессионал», 2009, 2010. 664 с.

2 Кестельман В. Н. Физические методы модификации полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 224 с.

3 Керча Ю. Ю. Структурно-химическая модификация эластомеров. Киев: Наукова Думка, 1989. 232 с.

4 Химическая модификация резин. М., ЦНИИТЭНефтехим, 1985. 160 с.

5 Лякишев Н. П., Алымов М. И. Наноматериалы конструкционного назначения // Российские нанотехнологии. 2006, Т. 1, № 1–2. С.71–81.

6 Бузник В. М., Фомин В. М., Алхимов А. П. [и др.] // Металлополимерные нанокompозиты (получение, свойства, применение). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.

УДК 678.4:678.01

А.В. Шеина, Е.П. Целых¹, Е.А. Рогачев, Вал. И. Суриков

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹ФГУП «Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», г. Омск, Россия

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЛЬФРАМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА РЕЗИНЕ

Аннотация. В работе рассматриваются структурные особенности покрытия на основе вольфрама на резиновой подложке, полученного методом магнетронного распыления. Показано, что характер профиля поверхности и структурные образования для одних и тех же параметров напыления зависят от времени напыления. Экспериментально определен размер зерен, входящих в структурные образования, в зависимости от времени напыления.

Ключевые слова: резина, вольфрам, магнетронное распыление, покрытие, структура, зерно.

Существуют различные методы улучшения физико-механических, триботехнических и других свойств полимерных композиционных материалов, в том числе и резин. Одними из перспективных методов являются методы, связанные с модифицированием свойств поверхности изделий путем нанесения на их поверхность покрытий на основе различных материалов. «Преимуществом поверхностного модифицирования является возможность обрабатывать уже готовые РТИ без изменения технологии их производства» [1]. Одним из

распространенных подходов в этом направлении является ионно-плазменный метод напыления на поверхность изделий нанодисперсных материалов [2]. Этот подход в особенности применим к резинотехническим изделиям (РТИ), так как процесс нанесения покрытий возможен при невысоких температурах поверхности изделий. В ряде работ [3,4] показано, что нанесение покрытий на основе тугоплавких металлов путем магнетронного распыления позволяет существенно улучшить эксплуатационные свойства РТИ, такие как износостойкость, физико-механические показатели, стойкость к агрессивным средам и высоким температурам и т.д.

Объектами исследования в данной работе являлись образцы на основе каучуков бутадиен-нитрильного БНКС-28 АМН и хлоропренового Денка PS-40А. Модифицирование образцов осуществлялось путем нанесения вольфрама на их поверхность методом магнетронного распыления на установке «ADVAVAC VSM-200». «Ионную чистку поверхности образцов перед нанесением покрытия производили непосредственно в рабочей камере в среде аргона в течение 10 мин при мощности 100 Вт. Сам процесс напыления проводили также в аргоновой среде при давлении $(3,3 \div 3,4) \cdot 10^{-1}$ Па. Оптимальное значение температуры подложки (80°C) были определены эмпирически» [3].

Детальное изучение структуры покрытий осуществляли методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на установке «JEOL JSM 6610-LV».

Структуру поверхности модифицированной резины изучали при одних и тех же параметрах напыления, за исключением времени напыления. Результаты изучения структуры приведены на соответствующих рисунках. РЭМ-изображение поверхности образца исходной резины приведено на рис. 1. Для сравнения на рис. 2 показаны РЭМ-изображения поверхности покрытий вольфрамом при времени напыления 55 мин. Анализ РЭМ-изображений показывает, что структура модифицированного образца заметным образом отличается от структуры исходного образца.

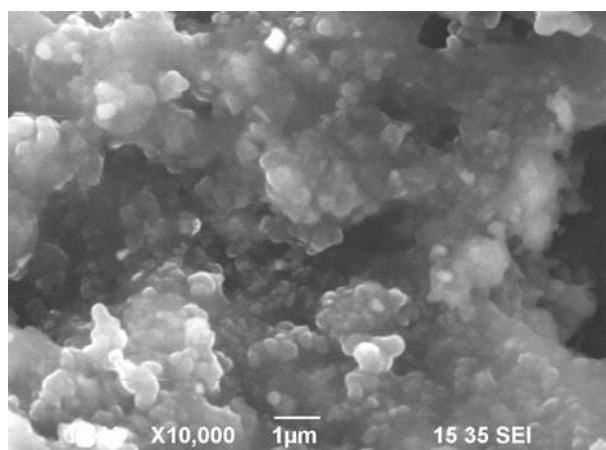


Рис. 1. РЭМ-изображение поверхности исходного образца

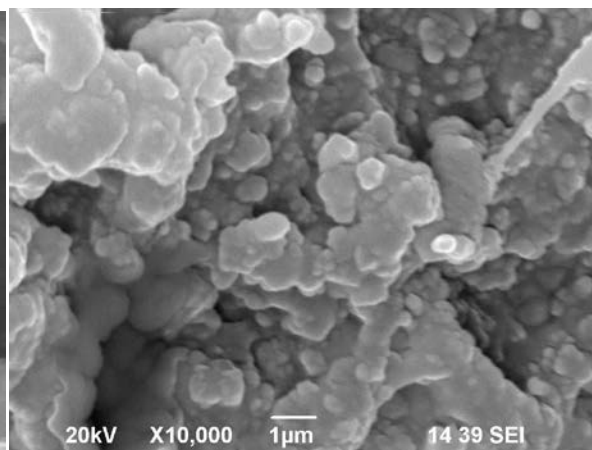


Рис. 2. РЭМ-изображение поверхности образца после напыления вольфрамом (время напыления – 55 мин.)

РЭМ-изображения поверхности покрытия на основе вольфрама для разного времени напыления представлены на рис. 3.

Как следует из рис. 3, время магнетронного распыления вольфрама заметным образом влияет на характер структурных образований, формирующихся на поверхности резиновой подложки. Распыление металла в течение 10 минут (рис. 3а) приводит к образованию разрыхленной структуры, состоящей в основном из относительно крупных фракций. С увеличением времени распыления до 35–55 минут (рис. 2, 3б) наблюдается образование заметного числа мелких структурных образований – зерен, часть из которых входит в состав

крупных фракций. Важной особенностью структурного покрытия является нарушение его сплошности – появление трещин (рис. 3б). Для сравнения структурных особенностей вольфрамового покрытия с покрытиями на основе других тугоплавких металлов на рис. 4 и 5 приведены РЭМ-изображения покрытий, полученные распылением на резиновой подложке молибдена и тантала.

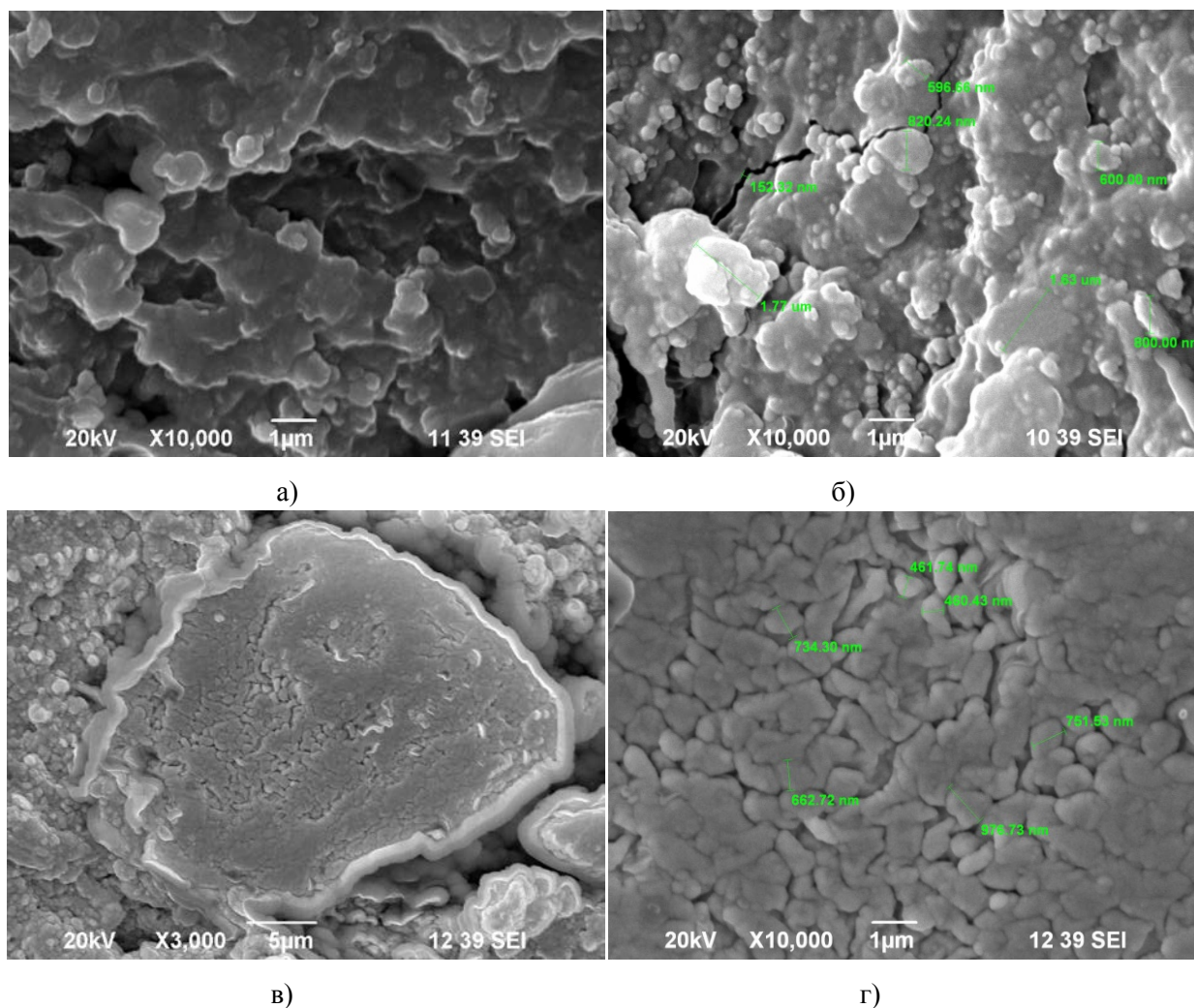


Рис. 3. РЭМ-изображение поверхности резинового образца после напыления вольфрамом:
а) 10 мин., б) 35 мин., в) 80 мин., (x3000), г) 80 мин., (x10000)

Из сравнения РЭМ-изображений видно существенное отличие структуры вольфрамового покрытия от танталового и молибденового покрытий.

Исследования на износостойкость покрытий на основе тугоплавких металлов, проведенные в указанных выше работах [3,4], показывают, что наиболее эффективными являются покрытия с мелкозернистой структурой. На рис. 6 показана зависимость среднего размера зерна (для образца с покрытием, полученным в течение 10 минут – среднего размера крупных фракций) в зависимости от времени напыления. На рис. 7 для сравнения приведены зависимости средних размеров зерен от толщины напыления относительно стандартной химически не активной подложки в молибденовом и танталовом покрытиях (толщина напыления прямо пропорциональна времени напыления) [5].

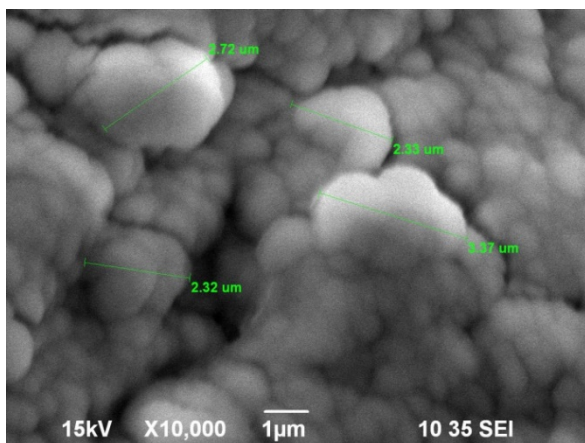


Рис. 4. РЭМ-изображение поверхности резинового образца после напыления танталом, время напыления – 34 мин

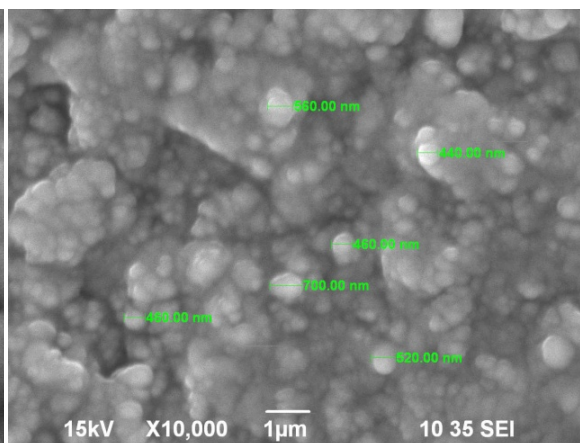


Рис. 5. РЭМ-изображение поверхности резинового образца после напыления молибденом, время напыления – 45 мин

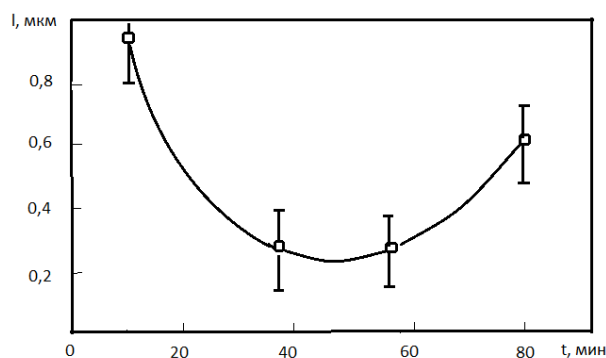


Рис. 6. Зависимость среднего размера зерна вольфрамового покрытия в зависимости от времени напыления

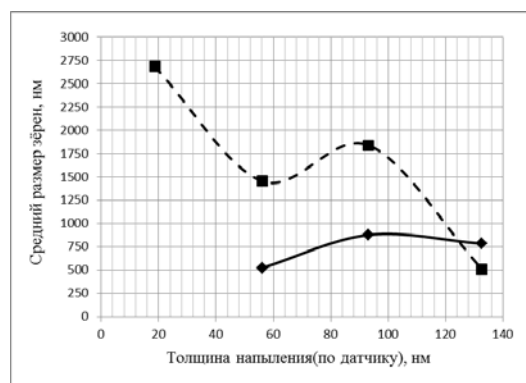


Рис. 7. Зависимость среднего размера зерен покрытий на основе молибдена (сплошная) и тантала (пунктирная) от толщины напыления относительно стандартной поверхности

Как следует из рис. 6, наименьшие размеры зерен имеют покрытия, полученные распылением вольфрама в течение 35 и 55 минут. Поэтому следует ожидать, что наиболее оптимальными с точки зрения триботехнических свойств будут покрытия на основе вольфрама, полученные магнетронным распылением в течение интервала времени от 30 до 50 минут. Сравнение зависимостей, приведенных на рис. 6 и 7, показывает, что характер изменений размеров зерен со временем напыления для вольфрамового покрытия существенным образом отличается от аналогичных зависимостей для молибденового и танталового покрытий.

Библиографический список

1. Поляков П. В., Душко А. А. Методы повышения работоспособности РТИ узлов трения, работающих в условиях эксплуатации, близких к экстремальным // Межвузовский сборник науч. трудов. Волгоград: ВолгГАСА, 2000. 10 с.
2. Витязь П. А., Ильющенко А.Ф., Хейфец М.А. [и др.] Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий: моногр. Минск : Беларус. навука, 2011. 283 с.
3. Целых Е. П., Полонянкин Д. А., Рогачев Е. А., Суриков В. И. Улучшение триботехнических свойств резин путем поверхностного модифицирования тугоплавкими

металлами // Омский научный вестник. Серия Приборы, машины и технологии. 2015. № 1 (137). С. 97–100.

4. Surikov V. I., Polonyankin D. A., Tselykh E. P., Rogachev E. A. Study the effect of surface magnetron sputtering modification on operating properties of rubber // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2014. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005696. Publication Year: 2014. P. 1–6. IEEE Conference publications.

УДК 621.77.09

В.Р. Эдигаров, Б.Ш. Алимбаева, П.С. Перков

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ НАПЫЛЕНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Аннотация. В работе представлены результаты исследования технологии комбинированной обработки поверхностных слоев деталей, полученных методами напыления с последующей электромеханической обработкой. Анализируется влияние технологических режимов электромеханической обработки на прочность сцепления покрытия, полученного напылением порошковых проволок, со стальной основой. Показаны оптимальные режимы обработки цилиндрических деталей с напыленным покрытием толщиной до 3 мм: сила тока 700–900 А, давление рабочего инструмента в пределах 50–70 МПа.

Ключевые слова: напыление, электромеханическая обработка, прочностные и триботехнические характеристики.

Одним из путей повышения ресурса техники и снижения расходов на запасные части является внедрение в производство технологий восстановления и упрочнения деталей с использованием, например, методов газотермического напыления (газопламенное, плазменное, детонационное напыление, электродуговая металлизация и др.) [1–3]. Напыление получило достаточно широкое применение для упрочнения и восстановления деталей машин и имеет ряд преимуществ в сравнении с другими способами поверхностной обработки.

Однако, наряду с преимуществами (простота метода, компактность, относительно низкая стоимость оборудования, достаточная степень экологичности) газопламенное и другие виды напыления обладают рядом недостатков, которые ограничивают его область применения: низкие физико-механические свойства покрытия (прочность сцепления с основой, износостойкость, плотность), высокая пористость, а также уровень остаточных напряжений в покрытии [1–3].

Прочность сцепления покрытия с подложкой является одним из основных параметров, позволяющих определить возможность применения напыления при восстановлении деталей. В зависимости от метода подготовки поверхности детали к напылению, способа напыления и состава напыляемого материала прочность сцепления покрытия с подложкой на отрыв составляет 15–50 МПа. Проведенными ранее исследованиями установлено, что прочность сцепления покрытия на отрыв находится в пределах 9,5–12 МПа при электродуговом и газопламенном напылении стальными проволоками 65Г, Св-08Г2С, У7 [1, 2]. Использование подслоя из молибдена, никель-алюминиевых сплавов повышает прочность сцепления до 24–28 МПа. Однако стоимость таких покрытий резко возрастает из-за дороговизны применяемых для напыления материалов, а также ввиду усложнения технологии

осуществления процесса. Нанесение покрытия из стали 45 на стальной образец позволяет получить поверхность с прочностью сцепления на отрыв при газопламенном напылении 15–16 МПа, при электродуговом до 30 МПа. При плазменном напылении покрытия из порошкового сплава ПГ-С1 на образец из стали 45 с последующей дробеструйной обработкой прочность сцепления на отрыве выше и составляет 40–45 МПа [1-4].

Различные виды напыления позволяют получить поверхностные слои с высокими эксплуатационными свойствами, однако данный вид обработки не всегда позволяет обеспечить требуемый уровень работоспособности деталей в условиях высоких удельных нагрузок, особенно при их знакопеременном характере [3]. Это объясняется сложностью получения напылением покрытий высокой плотности со значительными прочностными показателями, вследствие образования в них микротрещин, пустот, пор и окислых включений. Вышесказанное объясняет необходимость последующей обработки поверхностных слоев, полученных напылением, другими видами высокоэнергетического воздействия с целью их упрочнения. Перспективным методом упрочнения покрытий, получаемых методами газотермического напыления (газопламенное, плазменное, детонационное напыление, электродуговая металлизация и др.) является их последующая электромеханическая обработка [3-5]. Электромеханическая обработка (ЭМО) покрытий позволяет существенно увеличить их прочностные и триботехнические характеристики, в том числе и при наличии высоких эксплуатационных нагрузок (динамических, знакопеременных), подверженных абразивному, коррозионному, высокотемпературному или иному воздействию [3, 4].

Электромеханическая обработка реализуется при пропускании электрического тока большой плотности ($108\text{--}109\text{ А/м}^2$) и низкого (2–6 В) напряжения через зону контакта детали и деформирующего электрода-инструмента (ролика или пластины) [5]. Технологические характеристики, посредством которых регулируется интенсивность температурно-силового воздействия на материал детали при ЭМО, обеспечивают заданные параметры упрочненного поверхностного слоя. Их можно разделить на механические и электрические (энергетические) режимы обработки (параметры упрочнения). Наиболее важными механическими характеристиками режима упрочнения являются скоростные и силовые факторы: относительное перемещение инструмента и обрабатываемой поверхности (скорость обработки (V), подача инструмента (S)), усилие прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности – деформирующее усилие (P). К электрическим параметрам режимов ЭМО относят: напряжение (U) и сила тока (I) во вторичной цепи силового трансформатора. От величины этих характеристик зависит количество джоулевого тепла (удельная мощность теплового потока), выделяющегося при обработке в зоне контакта электрода-инструмента с поверхностью детали, и, как следствие, все основные (геометрические, физико-механические) характеристики упрочненного ЭМО поверхностного слоя. При этом для электромеханической обработки характерна локальность области высокотемпературного воздействия, так как площадь зоны контакта составляет лишь несколько квадратных миллиметров [5,6].

Исследование поверхностных слоев, полученных напылением, осуществлялось оценкой качества сцепления нанесенного слоя с основным металлом до и после электромеханической обработки, при этом применялся метод отрыва штифтов.

На поверхности образцов из сталей 45, 38ХС, 40Х наносились порошковые проволоки различного химического состава. Анализ экспериментальных зависимостей средних значений прочности сцепления покрытия с основой от величины силы тока при значениях удельной нагрузки инструмента на обрабатываемый поверхностный слой в пределах 80 МПа (рис. 1) показывает характерное для всех исследуемых сталей увеличение прочности сцепления обработанного напыленного слоя с подложкой с увеличением силы тока, однако увеличение силы тока свыше 1100 А приводит к существенному снижению качества поверхностного слоя, прочности сцепления и даже к его разрушению в результате перегрева и наличия значительных деформирующих усилий в зоне обработки.

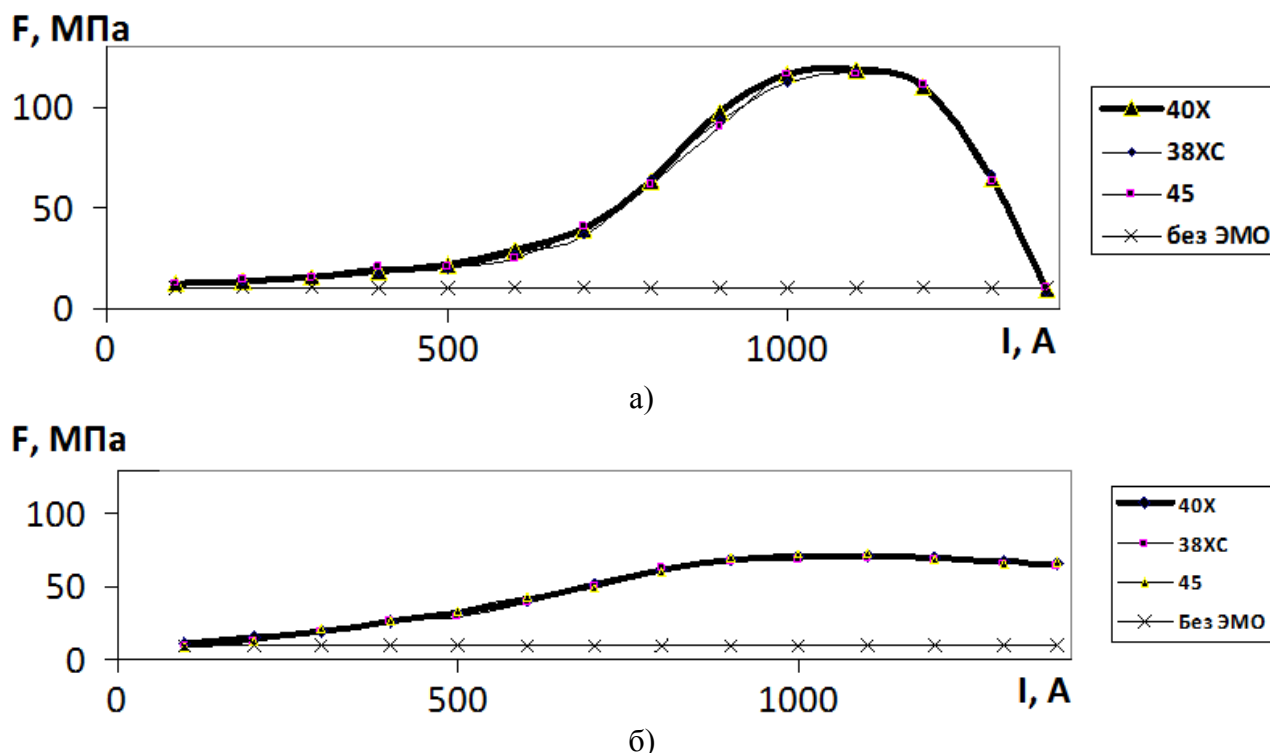


Рис. 1. Зависимость средних значений прочности сцепления покрытия с основой поверхностных слоев, полученных методами газотермического напыления, от величины силы тока при последующей ЭМО для сталей 38ХС, 40Х и 45 при различных удельных давлениях: а) $P=80$ МПа, б) $P=30$ МПа

Обработка напыленных поверхностных слоев с незначительными деформирующими усилиями в зоне обработки рабочим инструментом, в пределах 30 МПа, приводит к плавному увеличению прочности сцепления с увеличением силы тока примерно до 900А, это связано с возможным увеличением площади контакта напыленного поверхностного слоя и подложки. Дальнейшее увеличение силы тока до 1100А приводит к незначительному увеличению прочности сцепления по причине выдавливания или хрупкого разрушения окислов, что зависит от температуры плавления окислов в сравнении с температурой плавления металла. Последующее увеличение силы тока приводит к плавному снижению прочности сцепления.

Анализ технологических режимов обработки поверхностных слоев, полученных напылением, показывает неэффективность электромеханической обработки с давлением рабочего инструмента на обрабатываемую поверхность менее 10 МПа. В процессе такой обработки происходит значительное искрение между обрабатываемым поверхностным слоем и рабочим инструментом, что, в свою очередь, приводит к электроэрозионному разрушению поверхности детали и обрабатывающего инструмента, снижению качества поверхности.

Приведенный в работах [3, 4, 7, 8] макроструктурный анализ напыленных поверхностных слоев после электромеханической обработки подтверждает выдвинутые выше предположения о характере происходящих под влиянием ЭМО процессов в поверхностном слое детали, прочность сцепления существенным образом зависит от величины удельного давления инструмента при оптимальных значениях тока и напряжения.

По результатам проведенных исследований получены зависимости прочности сцепления покрытия с основой от технологических режимов ЭМО, позволяющие оценить получаемую прочность сцепления покрытия с основным металлом для выбираемых режимов электромеханической обработки, назначать или корректировать степень термодеформационного воздействия на обрабатываемую поверхность с целью обеспечить

требуемые параметры качества поверхностного слоя деталей машин, полученных напылением. Оптимальный режим электромеханической обработки цилиндрических деталей с толщиной напыленного слоя до 3 мм: сила тока 700–900А, давление рабочего инструмента 50–70 МПа.

Испытания на прочность сцепления покрытий толщиной до 3 мм, нанесенных порошковыми проволоками на исследуемые стали с последующей электромеханической обработкой, показали увеличение прочности сцепления в несколько раз, в зависимости от технологических режимов ЭМО.

Комбинированная технология обработки поверхностных слоев, сочетающая напыление с последующей электромеханической обработкой, позволяет расширить номенклатуру восстанавливаемых деталей, при этом повысить параметры качества обрабатываемых поверхностных слоев.

Библиографический список

1. Балдаев Л. Х. Проблема качества газотермических покрытий // Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. 2001. №3. С. 18–20.
2. Марченко Г. В. Оценка прочности сцепления металлизационных покрытий с основным металлом // Сб. трудов Белорусской СХА. 1984. Вып. 123. С. 83–85.
3. Кадырметов А. М., Никонов В. О., Бухтояров В. Н. [и др.]. Перспективы упрочнения покрытий методом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: материалы 14-й междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2012. С. 75–79.
4. Слинко Д. Б., Мурзаев В. П. Повышение качества покрытий с использованием последующей электромеханической обработки // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2014. №2. С. 28–31.
5. Эдигаров В. Р. Технологии и оборудование комбинированных способов электромеханической обработки: моногр. Омск: ОАБИИ, 2014. 280 с.
6. Edigarov V. R., Litau E. V., Morgunov A. P. The influence of process parameters of the electromechanical handling on its features // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2014. DOI: 10.1109/Dynamics. 2014. 7005647 PublicationYear: 2014. P. 1–4.
7. Никонов В. О. Разработка автоматизированного процесса упрочнения и восстановления деталей машин плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Vol.2 issue: 4 part: 3.
8. Иваночкин П. Г., Мясникова Н. А., Мантуров Д. С. [и др.] Использование электромеханической обработки для модифицирования поверхностей, нанесённых методом электродуговой металлизации // Новые материалы и технологии в машиностроении: Сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф. / Брянск: Изд-во БГИТА, 2014. №12. 172 с.

УДК 621.313.17

Е.Г. Андреева, А.В. Березовский¹

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹Гипермаркет "Лента" (Омск), г. Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА И РАЗМЕРОВ НА СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

Аннотация. В данной статье была рассмотрена модель одновиткового трансформатора тока (ТТЭ 150/5А) и проведен численный эксперимент для исследования и расчета магнитных процессов, протекающих в нем. Целью исследования является оценка влияния магнитных свойств электротехнической стали на силовые характеристики магнитного поля (магнитная индукция B и напряженность магнитного поля H) и габаритные размеры трансформатора тока (ТТ). Задача – это проведение численного расчета моделей магнитопровода ТТ из электротехнической стали с различными магнитными характеристиками (магнитными проницаемостями), в ходе эксперимента был представлен также расчет магнитопровода из аморфного железа. Численные эксперименты проводились с помощью программного пакета ELCUT на основе метода конечных элементов. Вывод: в ТТ с магнитопроводом из аморфной стали, благодаря его высокой магнитной проницаемости ($\mu = 60000$), насыщение происходит гораздо быстрее за счет примеси монооксида углерода (СО) и возможно использование трансформатора тока меньших габаритов, что удобнее и практичнее в эксплуатации.

Ключевые слова: трансформатор тока, численный эксперимент, программный пакет, вектор магнитной индукции B , напряженность магнитного поля H , магнитная проницаемость, силовые характеристики.

Решается задача расчета магнитного поля переменных токов трансформатора тока [1]. Использование магнитопроводов в трансформаторе из магнитомягких электротехнических сталей, особенно аморфных, повышает их энергоэффективность, снижает потери, уменьшает габариты устройства [2]. Численные эксперименты (расчеты) проводились на основе метода конечных элементов [3] с помощью программного пакета ELCUT, профессиональная версия [4]. В данном случае была взята модель одновиткового трансформатора тока (ТТЭ 150/5А) (рис. 1) и проведен расчет магнитных процессов, протекающих в нем. В ходе эксперимента рассматривались различные габаритные размеры магнитопровода и его магнитные характеристики.

Решалось несколько задач расчета магнитного поля ТТ и характеристик поля с различными относительными магнитными проницаемостями стали μ и размерами магнитопровода ТТ шириной $L = 12$ мм и $L = 22$ мм (рис.2, 3). Во всех задачах использовались токи со следующими значениями: $i = -5$ А (внутренняя сторона катушки); $i = 5$ А (внешняя сторона катушки); $I = 150$ А (токопровод). Принимались следующие условия:

- токопровод медного исполнения с $\mu=1$;
- магнитопровод из электротехнической стали или аморфной стали;
- относительная магнитная проницаемость воздуха $\mu=1$.



а)



б)

Рис. 1. Трансформатор тока типа ТТЭ -150/5 А: вид сбоку (а) и вид сверху (б)

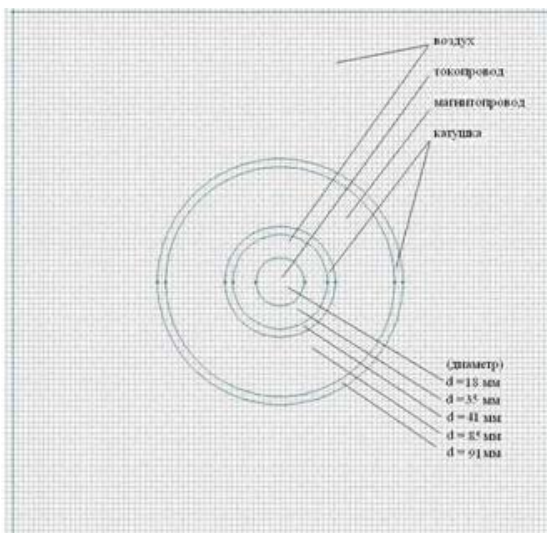


Рис.2. Магнитопровод – L=22 мм, $\mu=1000$

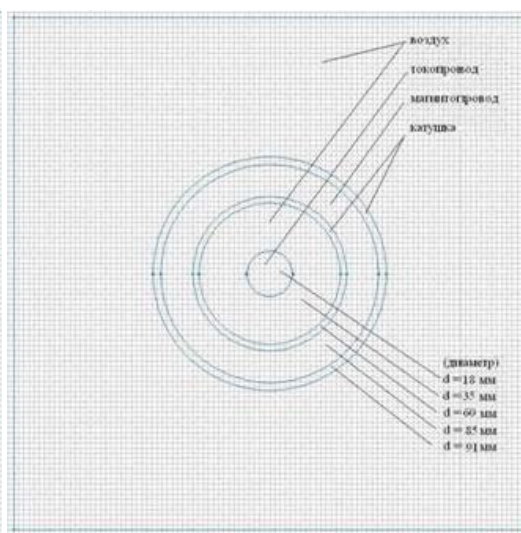
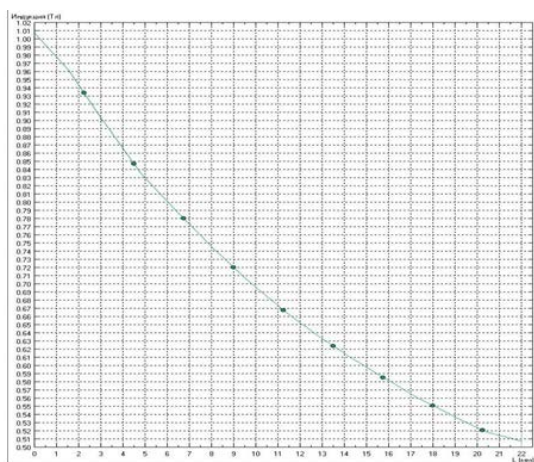
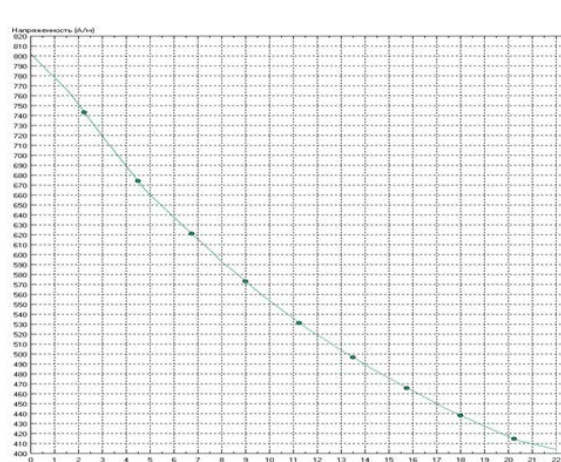


Рис. 3. Магнитопровод – L=12 мм, $\mu=1000$



а)



б)

Рис.4. Вектор магнитной индукции (а) и напряженность магнитного поля (б) ТТ с параметрами: L=22 мм, $\mu=1000$

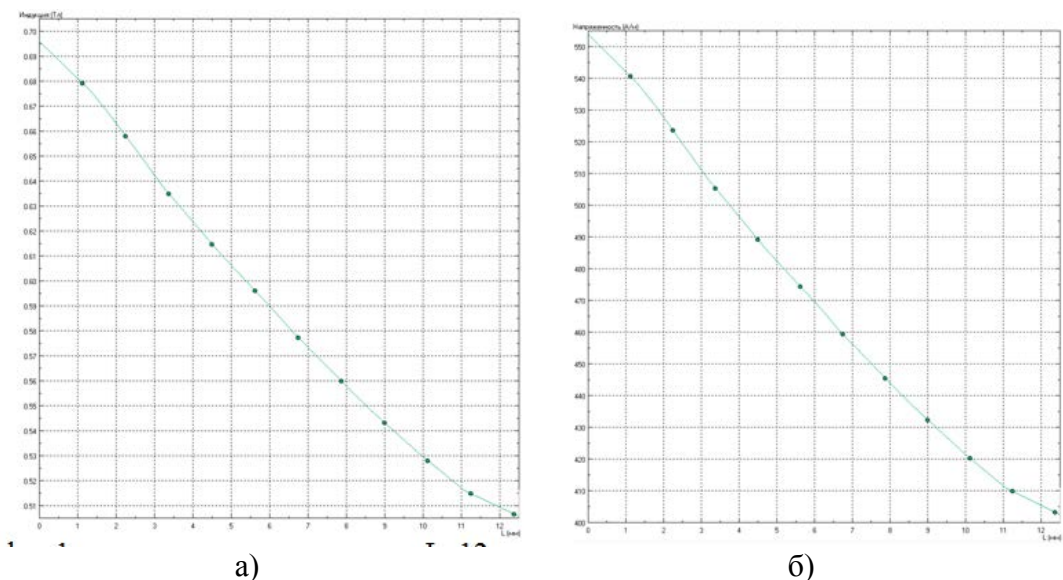


Рис.5. Вектор магнитной индукции (а) и напряженность магнитного поля (б) ТТ с параметрами: $L = 12$ мм, $\mu = 1000$

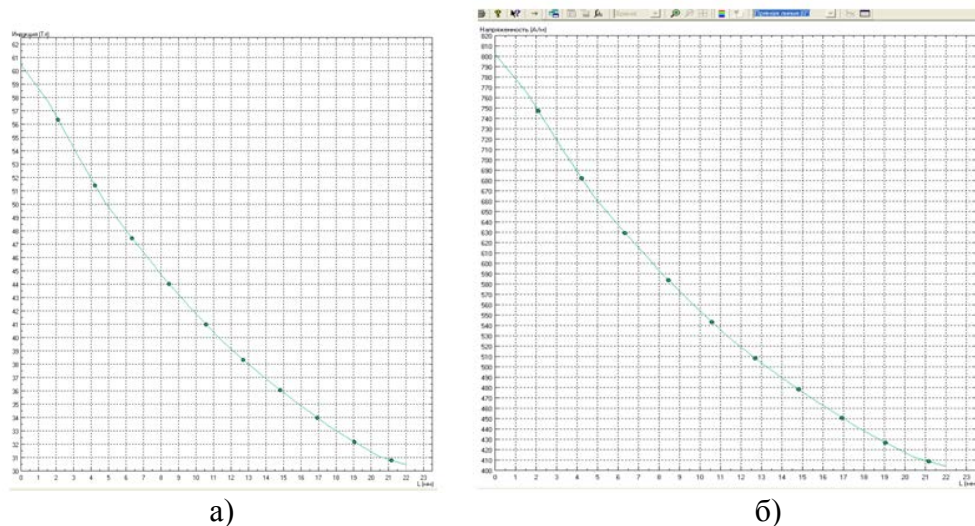


Рис.6. Вектор магнитной индукции (а) и напряженности магнитного поля (б) с параметрами: $L = 12$ мм, аморфная сталь магнитопровода с $\mu = 60000$

После решения задач можно сделать следующие выводы:

1. При изменении габаритов магнитопровода, при прочих равных условиях ($\mu = 1000$), а именно при уменьшении размера магнитопровода с $L = 22$ мм до $L = 12$ мм произойдет уменьшение индукции магнитного поля (рис. 4, 5) с $B_{\max} = 1,01$ Тл до 0,695 Тл.

2. При изменении свойств магнитопровода, а именно магнитной проницаемости (с 1000 до 3000) индукция возрастает в 3 раза, модель трансформатора тока является линейной.

3. Использование аморфного железа с магнитной проницаемостью $\mu = 60000$ приводит к усилению магнитной индукции при тех же габаритах трансформатора тока, то есть магнитопровод из аморфного железа позволяет уменьшить габариты трансформатора (рис.6), $B_{\max} = 61$ Тл при $L = 12$ мм.

4. Однако стоит обратить внимание, что при различных габаритах и магнитных свойствах стали магнитопровода ТТ напряженность H магнитного поля практически не меняется, т.е. она находится для исследуемых образцов в пределах 600–800 А/м.

5. В ТТ с магнитопроводом из аморфной стали, благодаря его высокой магнитной проницаемости ($\mu = 60000$), насыщение происходит гораздо быстрее за счет примеси

монооксида углерода (CO) и возможно использование трансформатора тока меньших габаритов, что удобнее и практичнее в эксплуатации, повышает его энергоэффективность.

Библиографический список

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. М.: Высш. шк., 1978. 231 с.
2. Павленко Т.П., Токарь М.Н. Определение возможности применения аморфной стали в магнитных системах электрических аппаратов. Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина. 2013.
URL:http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/6684/1/2013_Pavlenko_Definition_of_possibility.pdf (Дата обращения: апрель 2016).
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: пер. с англ. М.: Мир, 1979. 392 с.
4. Попов А.П., Татевосян А. С., Андреева Е. Г.[и др.] Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2010. 84 с.

УДК 621.317.3

А.В. Горнова, Н.Ф. Зацепилин, А.А. Кабанов, Г.С. Локисов, А.И. Щелканов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ФАРТУКА ТОКАРНОГО СТАНКА НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ХОЛЛА

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы использования сенсорных элементов Холла в целях минимизации погрешностей технологического металлообрабатывающего оборудования. Проведен анализ параметров существующих датчиков линейных перемещений.

Ключевые слова: погрешность, линейное перемещение, датчик, измерения.

Отечественная машиностроительная отрасль располагает огромным парком универсальных металлообрабатывающих станков, метрологические характеристики которых оставляют желать лучшего. Если на машиностроительном заводе провести глубокую модернизацию устаревшего токарного парка, то получается, что можно затратить мало денег на модернизацию парка и получить продукцию с высокими метрологическими характеристиками.

Одним из путей решения поставленной задачи применительно к универсальным токарным станкам является введение в структуру станка программно-аппаратных средств измерения линейного перемещения фартука с целью минимизации погрешностей и существенного расширения функциональных возможностей.

Фартук токарного станка перемещается посредством воздействия вращающегося ходового винта на разжимную гайку, закрепленную на фартуке. Пара «ходовой винт-гайка» имеет погрешности, вызванные как естественным износом, так и некачественным изготовлением. Кроме того, при перемещении фартука в ручном режиме путем обкатывания размещенной на станине зубчатой рейки шестерней маховика имеет место погрешность, обусловленная несоответствием профиля зубов рейки и шестерни эвольвентному профилю, следствием чего являются аддитивные и мультипликативные погрешности, делающие

практически невозможной их коррекцию в процессе работы. Чтобы добиться минимизации погрешностей, следует обеспечить точное измерение линейного перемещения, для чего существует множество датчиков.

Анализ датчиков линейного перемещения – оптических, магнитоstrictionных, магниторезистивных, индуктивных, емкостных и потенциометрических – выявил их недостатки, препятствующие достижению поставленных целей. Появление в последние годы прецизионных датчиков линейных и угловых перемещений на основе сенсорных элементов Холла позволило по-новому подойти к созданию измерительных преобразователей перемещения, обладающих такими весьма важными преимуществами как нечувствительность к механическим воздействиям, изменениям климатических параметров, загрязнению оборудования, обеспечивая высокие технико-экономические показатели такого технического решения [1].

Современные ЛДХ (линейные датчики Холла) представляют собой монолитную интегральную схему, где в одном кристалле интегрированы элемент Холла, линейный усилитель и оконечный каскад усиления мощности класса А (рис. 1).

Для повышения метрологических параметров в микросхеме реализованы аппаратные средства системы автоматической коррекции аддитивных погрешностей и элементы фильтрации сигнала, обеспечивающие корректное функционирование схемы в условиях высокого уровня промышленных помех [2].

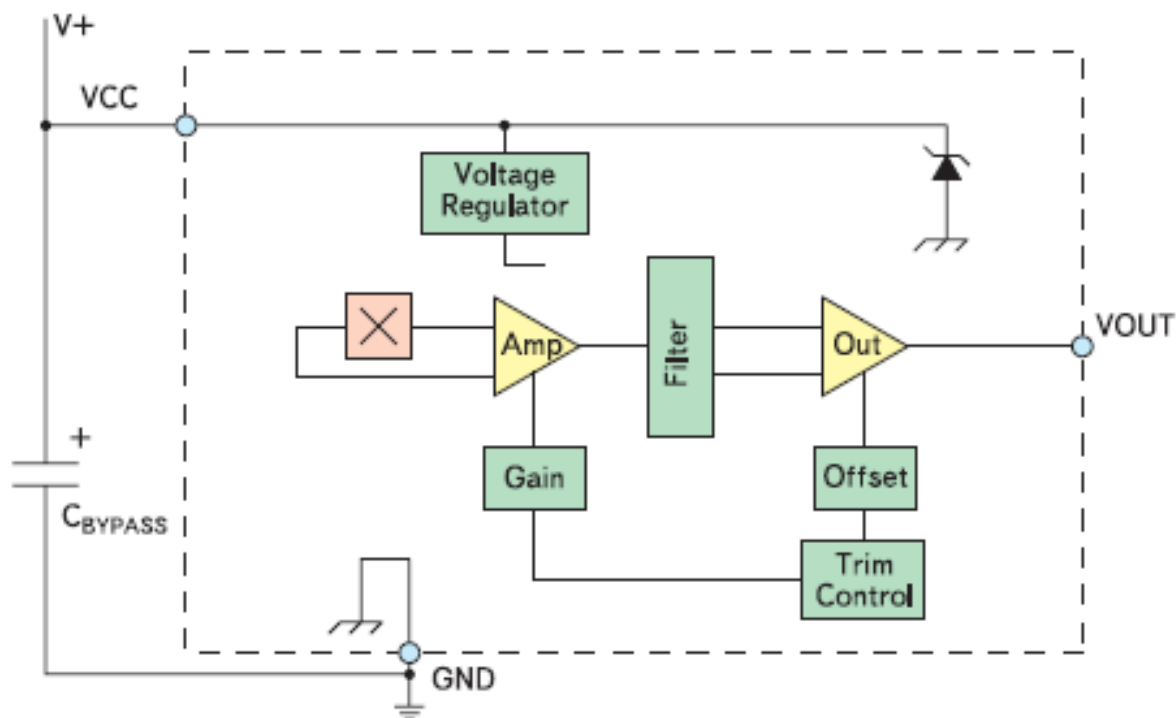


Рис.1. Структурная схема ЛДХ

В таблице 1 приведена номенклатура линейных датчиков Холла, пригодных для организации измерительной структуры [3]. Датчики A1301, A1302 имеют весьма высокие метрологические характеристики и могут быть использованы в устройствах преобразования угловых или линейных перемещений объектов. К сожалению, параметры точности и стабильности ЛДХ с одним элементом Холла подвержены влиянию таких факторов, как несбалансированность градиентных резистивных составляющих, зависящих от направления питающего тока, неоднородность топологии кристалла, наличие паразитных пьезорезистивных эффектов и склонность к искажениям передаточной функции, вызванным внешними механическими воздействиями на выводы и корпус микросхемы.

Номенклатура линейных датчиков Холла компании AllegroMicrosystems

Параметр	A1301	A1302	A1321	A1322	A1323	A1391	A1392
ЛДХ с пропорциональным выходом	+	+	+	+	+	-	-
Напряжение питания, В	4,5-6,0	4,5-6,0	4,5-5,5	4,5-5,5	4,5-5,5	2,5-3,5	2,5-3,5
Чувствительность, мВ/Гаусс	2,5	1,3	5,000	3,125	2,500	1,25	2,50
Полоса частот, кГц	20	20	30	30	30	10	10
Отклонение от линейности, %	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	0	0
Отклонение от имметрии, %	3,0	3,0	1,5	1,5	1,5	0	0
Типы корпусов	SOP3, SOT-23	SOP3, SOT-23	SOP3, SOT-23	SOP3, SOT-23	SOP3, SOT-23	MLP-6	MLP-6

Для практически полной коррекции указанных факторов может быть применен алгоритм динамической квадратурной компенсации смещения, основанный на поочередной коммутации токов элемента Холла с осей 0^0 и 90^0 на входах дифференциального усилителя, обеспечивая тем самым виртуальный поворот чувствительного элемента на 90^0 [4].

Практическое решение поставленной задачи сводится к разработке алгоритма и программного кода управляющего микроконтроллера, выбору и размещению прецизионного многополюсного магнита на станине станка, установке элементов датчика перемещения на фартуке токарного станка. Дальнейшая конструкторско-технологическая проработка в сочетании с оценкой погрешности позволит получить модернизированный токарный станок с прецизионными метрологическими характеристиками, обеспечивающий широкую номенклатуру металлообрабатывающих операций с минимальными финансовыми затратами.

Библиографический список

1. For Automotive Systems. Holland W. E. Automotive Market Specialist, Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Inc. EPN Magazine Suppl., Dec 2004 www.taosinc.com
2. New magnetic angle and position sensor with tangent output. Schott Ch., Sentron AG, a Melexis Company. Материалы конференции Sensor 2005.
3. Throttle position sensor that heats the throttle shaft. United States Patent 6 467 468. Опубликовано 22.10.2002.
4. Potentiometer. United States Patent 6 838 973. Опубл. 4.01.2005. (Robert Bosch GmbH.)

УДК 664.34

А.А. Егорова, Э.В. Логанова

Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Аннотация. Основными физическими показателями растительных масел являются плотность, динамическая вязкость, показатель преломления. Знание физических показателей необходимо для углубления представлений о природе растительных масел и их свойствах. В данной работе приведены экспериментальные сведения о плотности, вязкости и показатели преломления различных растительных масел, предложены зависимости для расчета плотности и вязкости от температуры.

Ключевые слова: растительное масло, плотность, динамическая вязкость, показатель преломления, температура.

Масло растительное – смесь триглицеридов жирных кислот и сопутствующих им веществ, извлекаемая из семян и плодов различных растений [1]. Подсолнечное масло изготавливают из семян подсолнечника, кукурузное масло – из кукурузных зародышей, горчичное масло – из семян горчицы, оливковое масло – из мякоти оливок, льняное масло – из семян льна, рыжиковое масло – из семян рыжика. По степени очистки растительные масла классифицируются на: нерафинированное– прошедшее только механическую очистку; рафинированное–прошедшее нейтрализацию щёлочью после механической очистки, гидратированное–прошедшее очистку распылённой горячей водой; дезодорированное – обработанное горячим сухим паром в условиях вакуума.

Объектом исследования являются растительные масла: подсолнечное (рафинированное дезодорированное "Благо"), кукурузное (рафинированное дезодорированное "Селяночка"), горчичное (нерафинированное холодного отжима "Царь"), оливковое (нерафинированное высшего качества "Renieris"), льняное (нерафинированное холодного отжима первого сорта "Царь"), рыжиковое (нерафинированное "Юг Руси").

Цель данной работы: определение физических показателей растительных масел и установление их зависимости от температуры. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: измерение плотности и динамической вязкости при различных температурах, построение графиков и нахождение уравнений зависимостей этих показателей от температуры масел, измерение показателя преломления масел при 20°C, сравнение плотности, динамической вязкости и показателя преломления, измеренных при 20°C, со справочными данными.

В работах [2,3] рассмотрены физические показатели соевого, рапсового масел и масла редьки.

Определение плотности проводилось с помощью ареометра по ГОСТ 3900. Сущность метода заключается в погружении ареометра в растительное масло и снятии показания по шкале ареометра. Используемые приборы и оборудование: стеклянный цилиндр 3-39/250, ареометр АОН-1 с погрешностью ± 1 кг/м³. Для измерения температуры использовали мультиметр ДТ-836 (термопара типа К). Обработка опытных данных проведена с помощью пакета MS Excel: построение экспериментального графика, линии тренда и нахождение уравнения, показывающего зависимость плотности ρ от температуры t . Результаты обработки данных для различных масел показаны на рис.1.

Вязкость растительных масел обычно определяют с помощью капиллярных вискозиметров. Принцип действия данных вискозиметров основан на истечении жидкости из резервуара через капилляр. В нашей работе определение вязкости проводилось по методу Стокса. Сущность метода заключается в измерении времени падения шарика при его равномерном движении в вязкой жидкости. Величина динамической вязкости рассчитывалась по формуле:

$$\eta = \frac{d^2 t g (\rho_1 - \rho_2)}{18 \ell}, \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость (Па·с), d – диаметр шарика (м), t – время падения шарика (с), g – ускорение свободного падения, ρ_1 – плотность шарика (кг/м³), ρ_2 – плотность растительного масла (кг/м³), ℓ – расстояние, пройденное шариком (м).

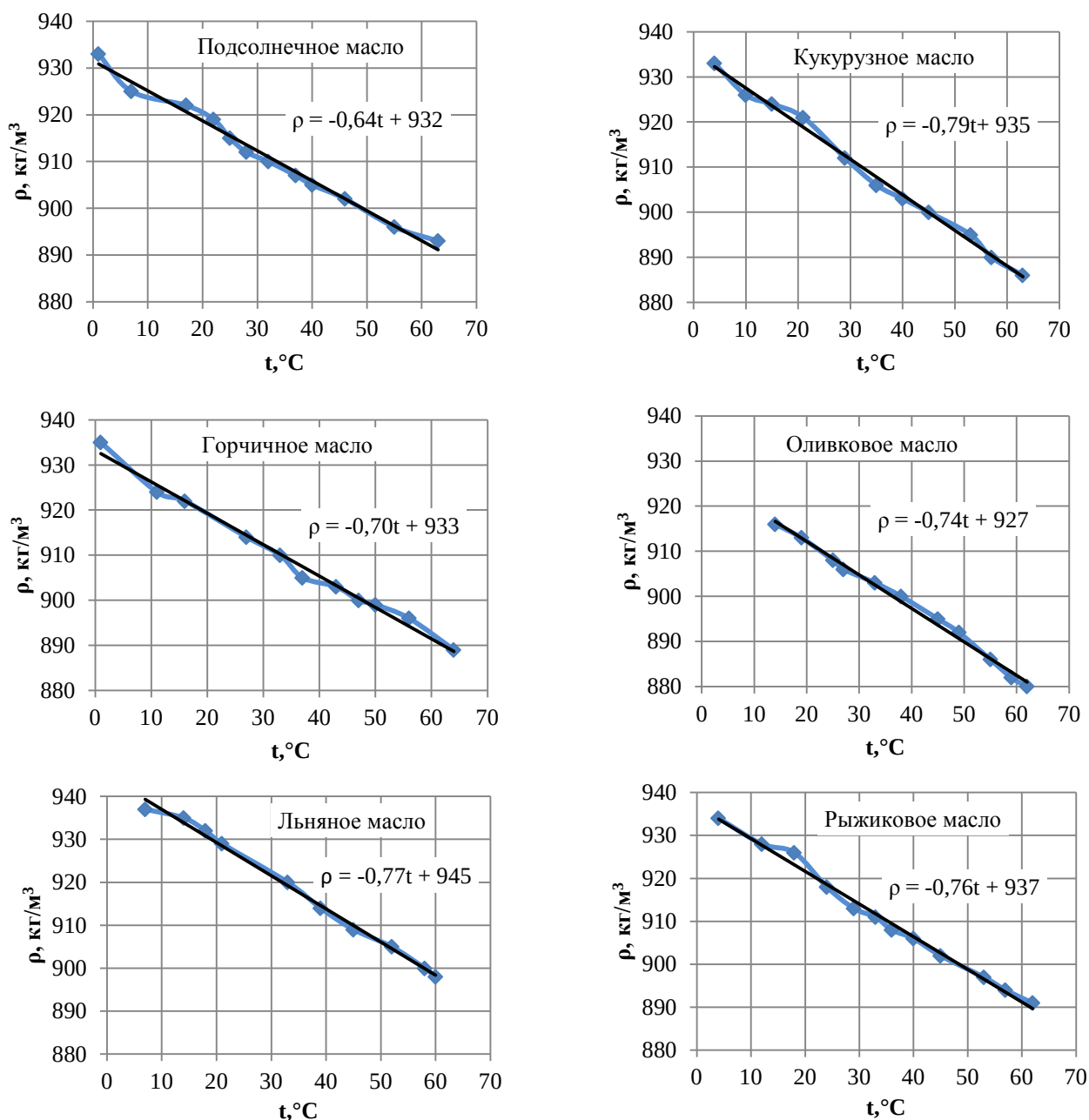


Рис.1. Зависимость плотности растительных масел от температуры

Формула (1) справедлива лишь тогда, когда шарик падает в безграничной среде. Если шарик падает вдоль оси цилиндра, то сказывается влияние боковых стенок цилиндра. В нашей работе растительное масло помещали в стеклянный цилиндр 3-39/250. Использовали стальной шарик, диаметр которого измеряли с помощью микрометра окулярного винтового МОВ-1-16 и микроскопа Микмед-1 с увеличением объектива 4. Для измерения времени падения шарика использовали часы-секундомер электронные ЧСЭ-02 с дискретностью счёта времени 0,01с. Плотность растительного масла определяли ареометром АОН-1. Расстояние, пройденное шариком в цилиндре, измеряли линейкой. Для измерения температуры использовали мультиметр ДТ-836. Обработка опытных данных проведена с помощью пакета MS Excel. Экспериментальные графики, линии тренда и уравнения, показывающие зависимость динамической вязкости η от температуры t для различных масел показаны на рис.2.

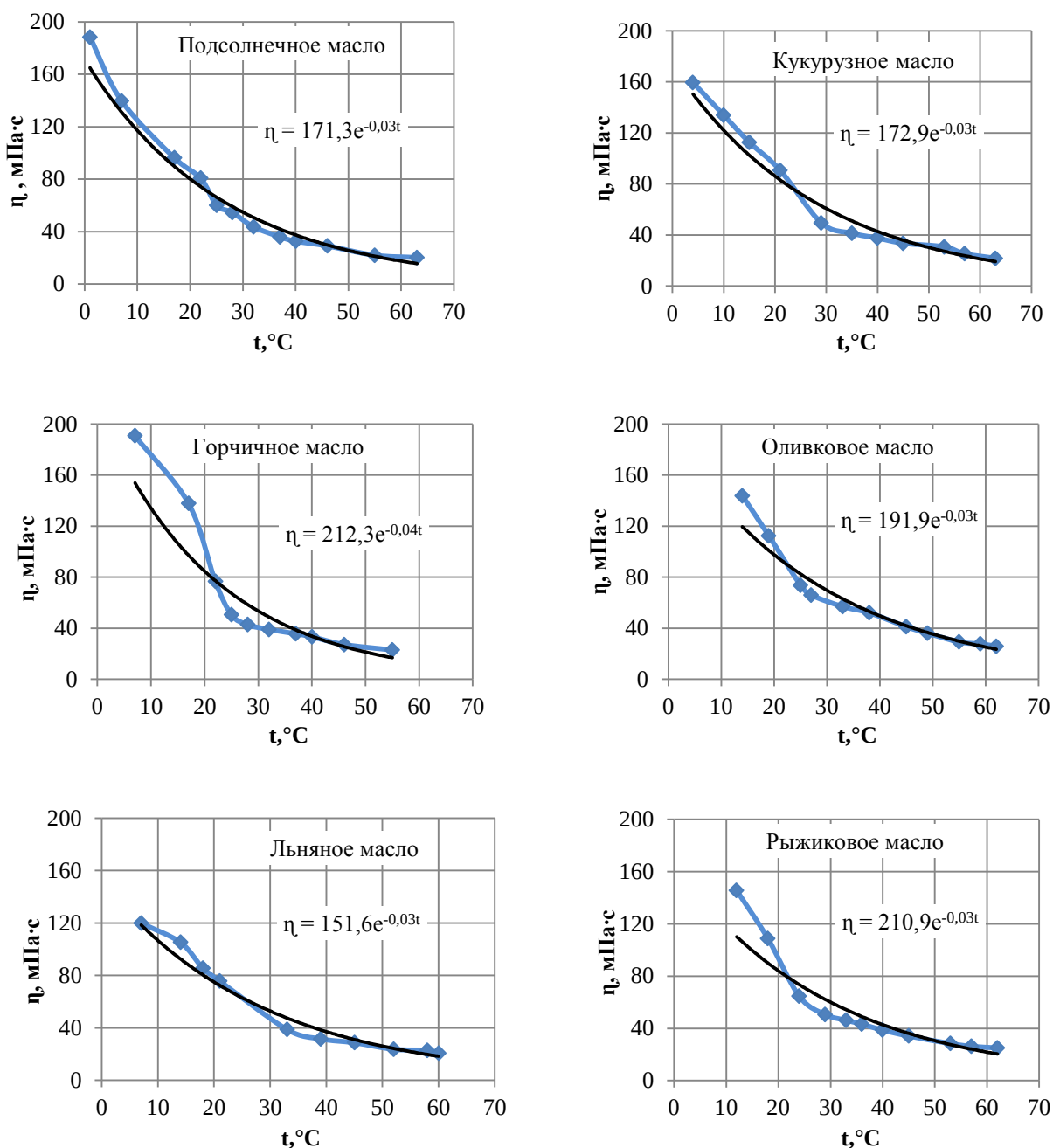


Рис.2. Зависимость динамической вязкости растительных масел от температуры

Определение показателя преломления проводилось с помощью рефрактометра по ГОСТ 5482-90. Использовали рефрактометр ИРФ-454 с погрешностью измерения $\pm 10^{-4}$.

Экспериментальные значения показателя преломления, плотности и динамической вязкости растительных масел при температуре 20°C, а также справочные значения этих показателей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физические показатели растительных масел при 20°C

Растительное масло	Плотность ρ , кг/м ³		Динамическая вязкость η , мПа·с		Показатель преломления n	
	справочная	экспериментальная	справочная	экспериментальная	справочный	экспериментальный
Подсолнечное	917-920	919	54,6-59,8	94,0	1,473-1,475	1,4755
Кукурузное	914-921	920	65,7-72,3	94,9	1,471-1,474	1,4750

Окончание табл. 1

Растительное масло	Плотность ρ , кг/м ³		Динамическая вязкость η , мПа·с		Показатель преломления n	
Горчичное	913-923	919	117,0	95,4	1,470-1,474	1,4755
Оливковое	914-918	912	71,3-89,9	105,3	1,466-1,471	1,4695
Льняное	926-936	929	52,7-53,0	83,2	1,480-1,487	1,4855
Рыжиковое	920-925	922	74-120	115,7	1,4760	1,4765

Закключение. При нагревании растительных масел их плотность линейно уменьшается. Полученные экспериментальные значения плотности различных растительных масел при 20°C совпадают со справочными, наименьшую плотность имеет оливковое масло, наибольшую – льняное масло. Динамическая вязкость растительных масел при их нагревании уменьшается по экспоненциальному закону. Экспериментальные значения динамической вязкости масел при 20 °С в основном получились выше справочных, наименьшую динамическую вязкость имеет льняное масло, наибольшую – рыжиковое масло. Полученные значения показателя преломления масел при 20 °С совпадают со справочными, наименьший показатель преломления у оливкового масла, наибольший – у льняного масла.

Библиографический список

1. Технический регламент на масложировую продукцию: федеральный закон Российской Федерации от 24 июня 2008 г. N 90-ФЗ // «Консультант Плюс»: Версия Проф.
2. Харченко Г. М. Физико-механические свойства растительных масел // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2008. № 4. С.54-58.
3. Ляшков В. И., Мохов Д. О. Исследование корреляции между плотностью и вязкостью растительных масел // Известия вузов. Пищевая технология. 2010. № 2–3. С. 98-100.

УДК 539.1

А.А. Еременко¹, И.И. Гончар^{1,2}, М.В. Чушнякова²

¹Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

²Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ: ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ

Аннотация. На сегодняшний день известно 37 радиоактивных элементов. Немногие из них существуют в природе; большая часть была получена искусственно в ядерно-физических лабораториях. В данной работе проведён систематический анализ истории открытия всех известных радиоактивных элементов; выделены несколько периодов этой истории.

Ключевые слова: радиоактивные элементы, реакции с тяжёлыми ионами, история науки.

Введение

Трудно найти такую страницу (одну страницу!) естественнонаучного текста, где плотность информации была бы такой же, как в Периодической таблице Д. И. Менделеева (рис. 1). Почему в Периодической таблице примерно сто элементов, а не 50 или, например, 200? Число элементов определяется группой физических процессов, которые объединяются словом «радиоактивность».

Радиоактивность – превращение атомных ядер в ядра других элементов, сопровождающееся испусканием различных частиц и электромагнитного излучения. Основными видами радиоактивности являются альфа-распад, бета-минус-распад, бета-плюс-распад (К-захват) и спонтанное деление.

																	2 He 4.0026 гелий
1 H 1.0080 водород																	
3 Li 6.941 литий	4 Be 9.0122 бериллий																10 Ne 20.179 неон
11 Na 22.9898 натрий	12 Mg 24.305 магний																18 Ar 39.948 аргон
19 K 39.0983 калий	20 Ca 40.078 кальций	21 Sc 44.9559 скандий	22 Ti 47.867 титан	23 V 50.9415 ванадий	24 Cr 51.9961 хром	25 Mn 54.9380 марганец	26 Fe 55.845 железо	27 Co 58.9332 кобальт	28 Ni 58.6934 никель	29 Cu 63.546 медь	30 Zn 65.39 цинк	31 Ga 69.723 галлий	32 Ge 72.61 германий	33 As 74.9216 мышьяк	34 Se 78.96 селен	35 Br 79.904 бром	36 Kr 83.80 криптон
37 Rb 85.4678 рубидий	38 Sr 87.62 стронций	39 Y 88.9059 иттрий	40 Zr 91.224 цирконий	41 Nb 92.9064 ниобий	42 Mo 95.94 молибден	43 Tc 97.9072 технеций	44 Ru 101.07 рубиний	45 Rh 102.9055 родий	46 Pd 106.42 палладий	47 Ag 107.8682 серебро	48 Cd 112.411 кадмий	49 In 114.818 индий	50 Sn 118.710 олово	51 Sb 121.760 сурьма	52 Te 127.60 теллур	53 I 126.9045 йод	54 Xe 131.29 ксенон
55 Cs 132.9055 цезий	56 Ba 137.327 барий	57 La* 138.9055 лантан	58 Ce 140.127 церий	59 Pr 144.9127 прометий	60 Nd 144.24 неймий	61 Pm 144.9127 прометий	62 Sm 150.36 самарий	63 Eu 151.964 европий	64 Gd 157.25 гадолиний	65 Tb 158.9253 тербий	66 Dy 162.50 диспрозий	67 Ho 164.9303 голландий	68 Er 167.26 эрбий	69 Tm 168.9342 тулий	70 Yb 173.04 иттербий	71 Lu 174.967 лютеций	
87 Fr (223) франций	88 Ra (226) радий	89 Ac* (227.0278) актиний	104 Rf (261) реверфорций	105 Db (262) дубний	106 Sg (263) сиборгий	107 Bh (262) борий	108 Hs (265) хассий	109 Mt (266) мейтнерий	110 Ds (271) дармштадтий	111 Rg (272) рейгенбий	112 Cn (285) колумбия	113 Nh (284) нихоний	114 Fl (289) флеровий	115 Mc (288) московий	116 Lv (292) лутеций	117 Ts (310) теннессин	118 Og (314) оганесон
57 La* 138.9055 лантан	58 Ce 140.127 церий	59 Pr 140.9077 прометий	60 Nd 144.24 неймий	61 Pm 144.9127 прометий	62 Sm 150.36 самарий	63 Eu 151.964 европий	64 Gd 157.25 гадолиний	65 Tb 158.9253 тербий	66 Dy 162.50 диспрозий	67 Ho 164.9303 голландий	68 Er 167.26 эрбий	69 Tm 168.9342 тулий	70 Yb 173.04 иттербий	71 Lu 174.967 лютеций			
89 Ac*	90 Th 232.0381 торий	91 Pa 231.0369 protactinium	92 U 238.0289 уран	93 Np 237.048 neptunium	94 Pu 244.064 плутоний	95 Am 243.0614 americium	96 Cm 247.073 curium	97 Bk 247.073 berkelium	98 Cf 251.0796 californium	99 Es 252.083 einsteinium	100 Fm 257.085 fermium	101 Md 258.1 mendelevium	102 No 259.1009 nobelium	103 Lr 262.1 lawrencium			

Радиоактивные элементы входили в состав Земли с самого начала её существования и продолжают присутствовать до настоящего времени. Например, у U-238 и Th-232 периоды полураспада равны $4,47 \cdot 10^9$ и $1,4 \cdot 10^{10}$ лет соответственно. Поэтому Th и U сохранились на нашей планете со времен её формирования и являются первичными радиоактивными элементами.

Первым открытым радиоактивным элементом является уран. Природная окись урана была известна людям с глубокой древности, а использовали ее древние мастера для изготовления глазури, которой покрывали различную керамику для водонепроницаемости сосудов и других изделий, а также их украшения. В 1789 г. немецкий химик Мартин Генрих Клапрот восстановил извлечённую из саксонской смоляной руды золотисто-жёлтую «землю» до чёрного металлоподобного вещества. Уран (U, $Z = 92$) получил свое название в честь открытой восемью годами ранее планеты.

Правда, о том, что уран и торий принадлежат к новому классу элементов – радиоактивным – тогда никто не подозревал. Радиоактивность была открыта только в 1896 году французским физиком Анри Антуаном Беккерелем. Почти сразу в исследования радиоактивности включились Мария и Пьер Кюри.

«Доурановые» радиоактивные элементы («довоенный» период)

В 1898 г. объектом исследований Марии и Пьера Кюри стала урановая смоляная руда. Она заинтересовала ученых потому, что ее радиоактивность была гораздо выше, чем у соединений урана. В результате, после нескольких лет интенсивной работы супруги Кюри выделили два новых радиоактивных элемента: полоний (Po, $Z = 84$) и радий (Ra, $Z = 88$).

Радон (Rn, $Z = 86$) стал пятым радиоактивным элементом после открытия U, Th, Po и Ra. Его обнаружили Эрнест Резерфорд и Р. Б. Оуэнс в 1899 г. В этом же году был открыт актиний (Ac, $Z = 89$) А. Дебьерном в отходах от переработки урановой смолки, из которой удалили полоний и радий.

В 1917 г. две группы ученых Отто Ган и Лиза Мейтнер в Германии и Ф. Содди и Д. Крэнстон в Великобритании, независимо друг от друга, выделили долгоживущий α -радиоактивный нуклид Pa-231, период полураспада которого равен 32 000 лет. Этот изотоп постоянно образуется в урановой руде в результате радиоактивного распада урана и его продуктов. Обе группы первых исследователей протактиния обнаружили изотоп, который, испуская альфа-частицы, превращался в актиний. Отсюда и название элемента №91. Протактиний (Pa, $Z = 91$) значит «предшествующий актинию».

Открытие технеция (Tc, $Z = 43$) было окончательно подтверждено в 1937 г. экспериментом в университете Палермо (Сицилия) учеными К. Перрье и Э. Сегрэ. Элемент 43 отсутствует в природе, поэтому учёные предложили назвать его технецием от греческого «искусственный, приготовленный руками человека».

Франций (Fr, $Z = 87$) был обнаружен в 1939 г. М. Перей из Института Кюри в Париже, когда она занималась очисткой препарата актиния (Ac-227) от разнообразных продуктов радиоактивного распада. В 1946 г. М. Перей предложила назвать новый элемент францием (Francium) в честь ее родины.

Трансурановые элементы («американский» период) [1]

С 1939 г. начался «американский» период, который длился четверть века. В этот период монополия на открытие радиоактивных элементов принадлежала учёным из США.

В 1940 г. Д. Корсоном, К. Р. Маккензи и Э. Сегрэ (Калифорнийский университет в Беркли) был впервые синтезирован аstat (At, $Z = 85$). Для получения изотопа At-211 они облучали висмут альфа-частицами $^{209}_{83}\text{Bi} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{211}_{85}\text{At} + 2{}_0^1n$. Период полураспада At-211 составляет всего 7,2 часа. Название произведено от греческого "неустойчивый, шаткий", так как все изотопы астата оказались короткоживущими.

В 1939 г. Э. М. Мак-Миллан в продуктах облучения урана нейтронами открыл радиоактивный изотоп нептуния (Np, $Z = 93$). Название "нептуний" дано новому элементу потому, что он следует за ураном в соответствии с расположением планет в Солнечной системе.

Открытие плутония (Pu, $Z = 94$) группой сотрудников Калифорнийского университета в Беркли под руководством Г. Т. Сиборга было совершено с помощью 60-дюймового циклотрона. Первая бомбардировка октаоксида триурана-238 ($^{238}\text{U}_3\text{O}_8$) дейтронами, разогнанными в циклотроне до 14-22 МэВ и проходящими через алюминиевую фольгу толщиной 0,002 дюйма, была произведена 14 декабря 1940 г.

Америций (Am, $Z = 95$) был получен в конце 1944 г. в Металлургической лаборатории Чикагского университета Г. Сиборгом путем облучения плутония нейтронами: $^{239}_{94}\text{Pu} + {}^1_0n - (\gamma) \rightarrow {}^{240}_{94}\text{Pu} + {}^1_0n - (\gamma, \beta^-) \rightarrow {}^{241}_{95}\text{Am}$. Название происходит от названия страны Америки, где он был открыт.

Кюрий (Cm, $Z = 96$) был получен в Металлургической лаборатории Чикагского университета Г. Сиборгом, А. Гиорсо, Р. Джеймсом и Л. Морганом в 1944 г. в ядерной реакции $^{239}_{94}\text{Pu} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{242}_{96}\text{Cm} + {}^1_0n$. Название новому элементу дано в честь супругов Кюри.

Элемент 61 открыли в 1945 г. в Окриджской национальной лаборатории (тогда она называлась лаборатория Клинтон) американские исследователи Дж. Маринский, Л. Гленденин и Ч. Кориэлл. Он был назван прометием (Pm, $Z = 61$) по имени мифического героя Прометея, защитника людей, похитившего у Зевса огонь и передавшего его людям.

Берклий (Bk, $Z = 97$) был открыт в 1949 г. Д. Томпсоном, А. Гиорсо и Г. Сиборгом в Калифорнийском университете в Беркли. При облучении Am-241 альфа-частицами они получили изотоп берклия с массовым числом 243. Происхождение названия этого элемента очевидно: к этому времени в Беркли было получено уже три новых радиоактивных элемента.

Калифорний (Cf, $Z = 98$) был получен искусственно в 1950 г. группой Г. Сиборга в Калифорнийском университете в Беркли в реакции бомбардировки 242-го изотопа кюрия альфа-частицами: ${}^{242}_{96}\text{Cm} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{245}_{98}\text{Cf} + {}^1_0\text{n}$. Итак, в штате Калифорния было получено уже 4 новых радиоактивных элемента.

Следующие два радиоактивных элемента были выделены из пыли, собранной после термоядерного взрыва, произведенного американцами в Тихом океане (операция "Майк") в 1952 г. Работа проводилась с участием сотрудников Радиационной лаборатории Калифорнийского университета, Аргоннской национальной лаборатории и Лос-Аламосской национальной лаборатории (США). Поскольку вся география получения радиоактивных элементов в США уже была отражена в их названиях (америций, берклий, калифорний), первооткрыватели стали называть элементы по именам великих учёных. Так были получены и названы эйнштейний (Es, $Z = 99$, 1952 г.) и фермий (Fm, $Z = 100$, 1953 г.). Первооткрывателями этих элементов были всё те же А. Гиорсо и Г. Сиборг.

Все последующие радиоактивные элементы, начиная с менделевия и кончая оганесомом, были получены искусственно в ходе ядерных реакций с использованием ускорителей.

Менделевий (Md, $Z = 101$) впервые был синтезирован Г. Сиборгом и С. Томпсоном в 1955 г. в Калифорнийском университете, Беркли. Они облучали ядра эйнштейния-253 сильно разогнанными α -частицами. Так был получен Md-256.

В 1961 г. в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли группа под руководством А. Гиорсо впервые получила лоуренсий (Lr, $Z = 103$).

Трансфермиевые элементы (период конкуренции) [2, 3]

Одна из наиболее драматических историй, связанных с синтезом радиоактивных элементов, относится к резерфордию (Rf, $Z = 104$). О его получении сообщили в 1964 г. советские учёные Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) в Дубне. Группа под руководством Г. Н. Флёрова облучала мишень из плутония-242 ядрами неона-22 с энергией около 115 МэВ. Образовавшийся радиоактивный элемент с $Z = 104$ идентифицировался по его спонтанному делению. Долгое время американские учёные подвергали сомнению выводы советской группы. В 1969 г. группа А. Гиорсо (Калифорнийский университет, Беркли), несомненно, получила элемент $Z = 104$ в другой реакции. В настоящее время считается, что наиболее вероятными первооткрывателями являются всё-таки советские учёные из ЛЯР ОИЯИ. Таким образом, начинается следующий период в истории открытия радиоактивных элементов – период конкуренции между советскими и американскими учёными.

В 1963-1967 гг. в ЛЯР ОИЯИ и Калифорнийском университете Беркли независимо проводились эксперименты, в результате которых был синтезирован нобелий (No, $Z=102$).

В 1970 г. в ЛЯР ОИЯИ и в Беркли был открыт дубний (Db, $Z = 105$). Для этого использовались разные реакции: в Дубне путём бомбардировки ядер ${}^{243}_{95}\text{Am}$ ионами ${}^{22}_{10}\text{Ne}$, а в Беркли – в реакции ${}^{249}_{98}\text{Cf} + {}^{15}_7\text{N} \rightarrow {}^{260}_{105}\text{Db} + 4{}^1_0\text{n}$. Приоритет советских учёных в открытии этого элемента отражён в его названии.

В 1974 г. в Лаборатории им. Лоуренса Калифорнийского университета Беркли группой Г. Сиборга был синтезирован элемент с $Z = 106$. Впоследствии он был назван сиборгием (Sg). Так Гленн Сиборг стал первым учёным, при жизни которого химический элемент был назван его именем.

В 1976 году о синтезе 107-го элемента бомбардировкой атомов висмута-209 ядрами атомов хрома-54 сообщила дубненская группа Г. Н. Флёрова и Ю. Ц. Оганесяна. Трансфермиевая рабочая группа Международного союза чистой и прикладной химии (TWGIUPAC) сочла, что результаты эксперимента были недостаточно убедительны.

Тем временем в Федеративной Республике Германии (в то время было две Германии) в г. Дармштадте в Институте тяжёлых ионов (GSI) был построен ускоритель UNILAC. С помощью этого ускорителя в 1981 г. группа германских учёных под руководством

П. Армбрустера и Г. Мюнценберга синтезировала 107-й элемент. Реакция, в которой он был получен, была подобна использованной в 1976 г. советскими учёными. В 1992 г. TWG IUPAC отдала приоритет открытия бория (Bh, $Z = 107$) германской группе. Этот элемент назван в честь одного из величайших учёных датчанина Нильса Бора. Таким образом, в синтезе новых радиоактивных элементов принимали участие теперь три крупных научных группы (института) из СССР, США и ФРГ.

В 1982 г. в GSI был впервые синтезирован мейтнерий (Mt, $Z = 109$). Команда Армбрустера и Мюнценберга бомбардировала мишень из висмута-209 ускоренными ядрами железа-58 и обнаружила один атом мейтнерия-266. Этот элемент назван в честь германской женщины-физика Лизы Мейтнер, которая внесла большой вклад в открытие реакции деления атомных ядер.

Через два года, в 1984 г., в GSI той же группой был получен хассий (Hs, $Z = 108$) в результате слияния свинца-208 с ускоренными ядрами железа-58. В названии этого элемента отражено латинское название немецкой земли Гессен (Hassia), в которой расположен Дармштадт.

Дармштадтий (Ds, $Z = 110$) получил название по месту открытия. Впервые он был синтезирован в 1994 г. К этому времени группу возглавляли уже П. Армбрустер и С. Хофманн.

В том же году в GSI был синтезирован элемент №110. Поскольку вся германская география уже была отражена в названиях предыдущих элементов: германий (Ge, $Z = 32$), хассий (Hs, $Z = 108$) и дармштадтий (Ds, $Z = 110$), первооткрыватели назвали новый элемент рентгением (Rg, $Z = 111$) в честь выдающегося немецкого физика Вильгельма Конрада Рентгена. Трудно переоценить практическое значение открытого им излучения, которое применяется как в медицине, так и в фундаментальных исследованиях.

Последний элемент в данной «германской» серии, открытый в GSI в 1996 г., - это коперниций (Cn, $Z = 112$). Два ядра ^{277}Cn были получены путём реакций ускоренных атомных ядер цинка-70 на мишени из свинца-208 в ускорителе тяжёлых ионов.

Следующая, на сегодня последняя, серия новых радиоактивных элементов синтезирована в Дубне в ЛЯР ОИЯИ с участием американских учёных из Ливерморской национальной лаборатории. Первым из этих элементов стал флёровий (Fl, $Z = 114$), синтезированный в 1998 г. Он был получен при слиянии ядер плутония-244 с ускоренными ядрами кальция-48. Этот элемент назван в честь Г.Н. Флёрова, который в течение долгого времени руководил Лабораторией ядерных реакций ОИЯИ и работами по синтезу радиоактивных элементов.

В 2000 г. был синтезирован элемент 116: $^{248}_{96}\text{Cm} + ^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow ^{293}_{116}\text{Lv} + 3^1_0n$. Его название – ливерморий (Lv, $Z = 116$) – отражает участие американских учёных в открытиях этой серии.

Вскоре был открыт элемент 118. Первые успешные эксперименты по его синтезу были проведены в ОИЯИ в 2002 г. После многократных проверок в 2006 г. российские и американские физики-ядерщики официально сообщили о получении 118-го элемента. Он назван оганесоном (Og, $Z = 118$) в честь нынешнего научного руководителя ЛЯР им. Флёрова и руководителя работ по синтезу элементов с $Z = 113$ –118 – Ю. Ц. Оганесяна.

В 2004 г. две группы объявили о синтезе элемента №113: российско-американская (Дубна-Ливермор) [4] и японская (RIKEN) [5]. Элемент было решено назвать нихонием (Nh, $Z = 113$) в честь одного из двух японских вариантов самоназвания страны — Нихон, что переводится как «страна восходящего солнца».

В том же году российско-американская группа сообщила о синтезе элемента 115, который в дальнейшем был назван москovieм (Mc, $Z = 115$) [4, 6, 7]. Реакция, в которой был получен этот элемент, имеет вид: $^{243}_{95}\text{Am} + ^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow ^{288}_{115}\text{Mc} + 3^1_0n$.

Последним в этой серии был получен элемент 117 – теннессин (Ts, $Z = 117$): $^{48}_{20}\text{Ca} + ^{249}_{97}\text{Bk} \rightarrow ^{297}_{117}\text{Ts}^* \rightarrow ^{294}_{117}\text{Ts} + 3^1_0n$ [8, 9]. Этот элемент удалось получить с использованием сильно радиоактивного изотопа берклия-249, который был наработан в

уникальном ядерном реакторе в Окриджской национальной лаборатории (США, штат Теннесси), откуда и название этого элемента.

О важности обсуждаемой тематики говорит количество Нобелевских премий, присуждённых учёным за работы в области радиоактивности: Мария Склодовская-Кюри (две премии), Гленн Сиборг, Ирен и Фредерик Жолио-Кюри.

На сегодняшний день теннессин официально является последним открытым радиоактивным элементом. Однако поиски новых элементов не прекращаются, наука не стоит на месте и уже ведутся исследования о возможности синтеза элементов с $Z = 120$ и 122 [2, 3, 10, 11].

Библиографический список

1. Seaborg G. T., Loveland W. D. Transuranium nuclei // Treatise on Heavy-Ion Science. Vol. 4. Extreme Nuclear States / ed. D. A. Bromley. New York: Plenum Press, 1985. 503 p. Doi: 10.1007/978-1-4615-8097-3_2
2. Loveland W. D. An experimentalist's view of the uncertainties in understanding heavy element synthesis // Eur. Phys. J. A. 2015. Vol. 51. P. 120. Doi: 10.1140/epja/i2015-15120-2
3. Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K. Super-heavy element research // Rep. Prog. Phys. 2015. Vol. 78. P. 036301. Doi:10.1088/0034-4885/78/3/036301
4. Oganessian Yu. Ts. [et al.] Synthesis of elements 115 and 113 in the reaction $^{243}\text{Am}+^{48}\text{Ca}$ // Physical Review C. 2005. Vol. 72. P. 034611. Doi: 10.1103/PhysRevC.72.034611
5. Morita K. [et al.] Experiment on the Synthesis of Element 113 in the Reaction $^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn}, n)^{278}\text{113}$ // J. of the Physical Society of Japan. 2004. Vol. 73. P. 2593-2596. Doi: 10.1143/JPSJ.73.2593
6. Oganessian Yu. Ts. [et al.] Experiments on the synthesis of element 115 in the reaction $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, xn)^{291-x}\text{115}$ // Physical Review C. 2004. V. 69. P. 021601. Doi: 10.1103/PhysRevC.69.021601
7. Stoyer N. J. [et al.] Chemical Identification of a Long-Lived Isotope of Dubnium, a Descendant of Element 115 // Nuclear Physics A. 2007. Vol. 787. P. 388-395. Doi: 10.1016/j.nuclphysa.2006.12.060
8. Oganessian Yu. Ts. [et al.] Synthesis of a New Element with Atomic Number $Z=117$ // Physical Review Letters. 2011. Vol. 104 P. 142502. Doi:10.1103/PhysRevLett.104.142502.
9. Meija J. et al. Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry. 2016. Vol. 88. P. 265–291. Doi:10.1515/pac-2015-0305
10. Fréreau M. O. [et al.] X-Ray Fluorescence from the Element with Atomic Number $Z=120$ // Physical Review Letters. 2012. Vol. 108. P. 122701. Doi: 10.1103/PhysRevLett.108.122701
11. Santhosh K. P., Safoora V. Systematic study of probable projectile-target combinations for the synthesis of the superheavy nucleus $^{302}\text{120}$ // Physical Review C. 2016. Vol. 94. P. 024623. Doi: 10.1103/PhysRevC.94.024623

УДК 681.518.5

А.Е. Исаченко, А.А. Кабанов, Г.В. Никонова, А.С. Рахманова, А.О. Савиди, Л.В. Щапова
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗА

Аннотация. В статье рассматривается система, предназначенная для решения задач, связанных с безопасностью человека при возникновении утечки газа. Система мониторинга работает в режиме реального времени, обеспечена автономным питанием и устройством

передачи и хранения полученных с датчиков данных. Предусмотрена обратная связь и интерфейсное обеспечение связи с существующими организациями по контролю газа и управляющими компаниями, в частности, возможность передачи полученных данных абоненту и/или аварийно-диспетчерской службе, службам спасения, используя, в том числе, беспроводные средства связи.

Ключевые слова: микроконтроллер, газоанализатор, метрологические характеристики, интерфейс, коммуникационный модуль.

В настоящее время в связи с большими объемами использования бытового газа беспроводной мониторинг его концентрации является весьма актуальной задачей. Зачастую в быту происходят критические ситуации, связанные с утечкой газа, вследствие чего происходят несчастные случаи и учащаются пожары.

Использование существующих на рынке систем не представляется возможным по ряду причин: некоторые системы требуют непосредственного участия человека, другие системы не имеют связи с организациями по контролю газа и управляющими компаниями, что делает абсолютно ненадежными такие системы.

Необходимо создать систему мониторинга, независимую от влияния человеческого фактора, оснащенную надежными средствами контроля, связи и устройствами автоматики.

В данном направлении наиболее актуальным видится использование информационно-измерительных систем, применимых в производстве и быту, а также получивших повсеместное развитие таких технологий, как «Умные измерения» (Smart Metering), «Умный дом» (Smart Home), и других подобных в рамках технологии Internet of Things (IoT) (Интернет вещей) [1].

Предлагается техническое решение проблемы контроля и обеспечения безопасности при пользовании бытовыми газовыми приборами, т.е. предотвращение критической утечки газа и оповещение контрольно-спасательных служб.

Спроектированная система беспроводного мониторинга концентрации газа предназначена для повсеместного использования, как в производственных, так и бытовых помещениях [2]. Система обеспечивает:

- сбор количественных данных с определенного набора датчиков концентрации газа, расположенных в разных точках;
- дальнейшую обработку полученной информации с датчиков посредством микроконтроллера (МК);
- возможность передачи полученных данных абоненту и/или аварийно-диспетчерской службе, управляющей компании, включая беспроводную систему передачи;
- наличие обратной связи, с помощью которой система могла бы прекращать подачу газа в помещение, где произошла утечка.

Дополнительные возможности системы контроля концентрации газа:

- наличие часов, предназначенных для временной регистрации превышения концентрации газа;
- приложение на смартфон или веб-интерфейс для мониторинга и управления из любой точки мира;
- вывод информации, полученной с датчиков, на дисплей системы;
- контроль расхода газа при последующей модернизации и монтажа счетчика.

В качестве основного датчика концентрации газа используется стационарный газоанализатор «СЕНСИС 500», предназначен для непрерывного автоматического измерения содержания кислорода, токсичных и горючих газов. Датчик имеет устройство подачи звукового и светового сигналов при достижении порогового уровня концентрации, а также подает сигналы управления внешними устройствами либо включением реле, либо передачей сигнала на внешние исполнительные устройства автоматики [3].

Схема стационарного газоанализатора «СЕНСИС 500» представлена на рис. 1.

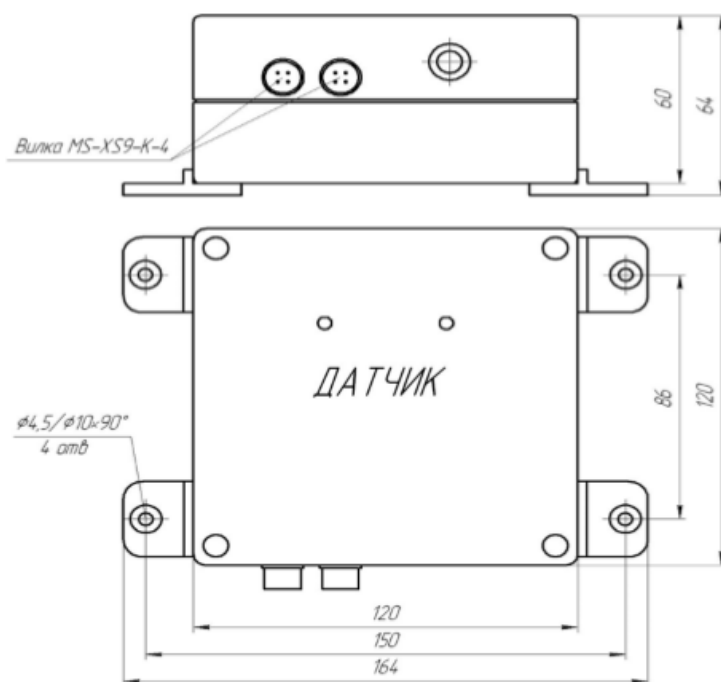


Рис. 1. Схема стационарного газоанализатора «СЕНСИС 500»

Известно, что природный газ в больших количествах, примерно 80–97%, содержит метан CH_4 . Рассмотрим характеристики представленного газоанализатора для метана CH_4 :

- Диапазон индикации: 0...5% об.;
- Диапазон измерения: 0...2,5% об.;
- Чувствительность: 0,01% об.

Газоанализатор «СЕНСИС 500» обладает приемлемыми метрологическими характеристиками для контроля концентрации газа, а именно:

- Относительная погрешность измерения по горючим и токсичным газам в нормальных условиях (н.у.) $\delta = 10\%$;
- Погрешность измерения по кислороду при н. у. в диапазоне 1 – 30 % об., абсолютная погрешность $\Delta = \pm 0,3\%$ об.;
- Погрешность измерения по кислороду при н. у. в диапазоне 0,1 – 1 % об., относительная погрешность $\delta = 10\%$
- Относительная погрешность установки уровня порога сигнализации менее $\pm 1\%$;
- Дополнительная погрешность от изменения температуры окружающей среды на каждые 10 °C не более 0,2 δ ;
- Дополнительная погрешность от изменения влажности окружающей среды на каждые 10 % не более 0,2 δ .

Условия эксплуатации газоанализатора «СЕНСИС 500»:

- Температура окружающей среды: от -40 до +50 °C;
- Относительная влажность: 30...95%;
- Атмосферное давление: 84...120 кПа.

Подключение данного датчика осуществляется по интерфейсу RS-485, также корпус датчика защищен от влаги и пыли по стандарту IP 65.

В качестве программируемого устройства в данной системе мониторинга концентрации газа используется ArduinoUnoR3, которое базируется на микроконтроллере ATmega 328P [4, 5].

Основные характеристики ArduinoUnoR3:

- Рабочее напряжение: 5 В;
- Напряжение питания (рекомендуемое): 7–12 В;

- Напряжение питания (предельное): 6–20 В;
- Максимальный ток одного вывода: 40 мА;
- Flash-память: 32 КБ
- Тактовая частота: 16 МГц.

Структурная схема беспроводной системы мониторинга концентрации газа представлена на рис. 2.

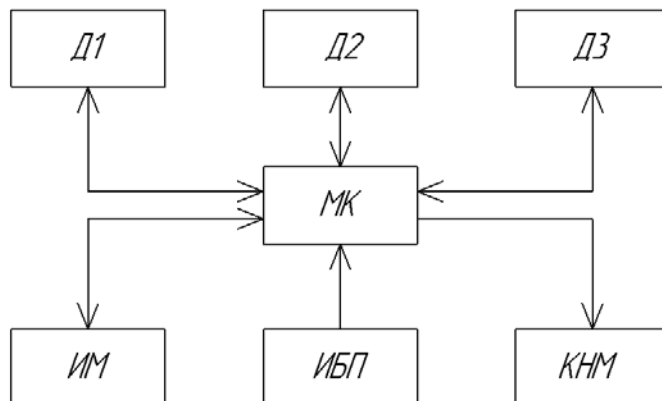


Рис. 2. Структурная схема беспроводной системы мониторинга концентрации газа

Разработанное устройство содержит набор датчиков – Д1, Д2, Д3; микроконтроллер на платформе ArduinoUno с дополнительным модулем памяти, управляющий системой – МК; источник бесперебойного питания – ИБС; коммуникационный модуль с набором стандартных интерфейсов – КНМ; исполнительный механизм – ИМ.

При разработке системы учитывалось, что для различных помещений, оснащенных традиционными сетями и средствами связи, а также не имеющими их, необходимо предусмотреть модуль, имеющий весь набор интерфейсов, для подключения устройств передачи сигналов оповещения и связи [6].

В качестве источника бесперебойного питания используется сетевой адаптер с резервированием (аккумуляторная батарея). В случае полного отключения питания устройство подает аварийный сигнал за счет энергии специального "накопительного" конденсатора.

Таким образом, уникальность системы заключается в наличии автономности и способности передачи и хранения полученных с датчиков данных. Представленный вариант беспроводной системы мониторинга концентрации газа показал свои высокие метрологические характеристики, возможную эффективность использования и коммерческую новизну. Дальнейшее развитие системы мониторинга предусматривает контроль расхода газа при последующей модернизации и монтажа счетчика газа.

Библиографический список

1. Попов А. А. Анализ возможности использования устройств интернета вещей для формирования единого информационного пространства жилищно-коммунального хозяйства // Креативная экономика. 2017. Том 11, № 2. С. 223-240. doi: 10.18334/ce.11.2.37530
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / 7-е издание. М.: Мир, 2014. 704 с.
3. Стационарный газоанализатор серии «Сенсис». Руководство по эксплуатации. URL: http://www.gazoanalizators.ru/tech/sensis-500_re_mp.pdf (дата обращения: 11.04.2017).
4. ArduinoUno. URL: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno> (дата обращения: 10.04.17)
5. Керниган Брайан У., Ритчи Деннис М. Язык программирования Си / 3-е издание. М.: Издательский дом "Вильямс", 2016. 288 с.
6. Гук М. Шины PCI, USB и FireWire. СПб.: Питер, 2005. 544 с.

А.Е. Исаченко, А.В. Симаков, А.И. Шафеев, А.И. Щелканов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

БЛОК КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. Настоящая работа посвящена разработке блока контроля параметров энергопотребления электрических машин постоянного тока. Проведены обзор существующих методов решения задачи контроля параметров машин постоянного тока, выбор направления работы, выбор элементной базы, разработка схемы электрической структурной, разработка схемы электрической принципиальной. Проведенные экспериментальные исследования изготовленного макетного образца подтвердили корректность теоретических предпосылок выбранного направления разработки.

Ключевые слова: микроконвертер, аналого-цифровой преобразователь, электрические машины постоянного тока.

Для эффективной работы электрической машины необходим контроль ее состояния, отслеживание изменения параметров, таких как ток и напряжение, внесение корректив в режим работы машины, исходя из наблюдаемых данных. Такой подход позволит продлить срок службы машины и обеспечить наиболее энергоэффективную работу в ходе технологического процесса [1].

Блок контроля параметров энергопотребления электрических машин, в частности, машин постоянного тока, может способствовать определению действительных энергетических характеристик исследуемой машины, вынесению заключения об экономической обоснованности дальнейшего использования наблюдаемой машины. Кроме того, использование данного блока может упростить процедуру присвоения класса энергоэффективности исследуемому агрегату [2].

В качестве датчиков постоянного тока нашли применение шунты, элементы Холла и комбинированные ферромагнитные измерительные преобразователи тока с вспомогательной модуляцией.

Наиболее подходящим является манганиновый шунт постоянного тока, изготовленный из хорошо «состаренного» манганина [3].

Структурная схема разрабатываемого блока приведена на рис. 1.

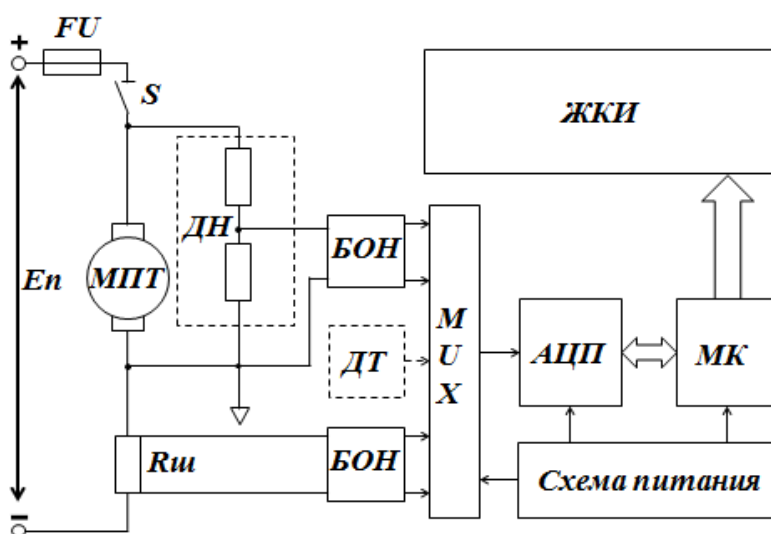


Рис.1. Схема электрическая структурная

Схема состоит из следующих частей: FU – предохранитель, S – элемент коммутации, МПТ – машина постоянного тока, Rш – шунт, ДН – делитель напряжения, БОН – блок ограничения напряжения, ДТ – датчик температуры, ЖКИ – жидкокристаллический индикатор (LCD – дисплей), MUX – мультиплексор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер.

Переключатель (S) осуществляет коммутацию силовой цепи (Еп) машины постоянного тока (МПТ), а предохранитель (FU) защищает цепь двигателя от повышенной токовой нагрузки. С делителя напряжения (ДН) и манганинового шунта (Rш) снимается информация в виде аналогового сигнала (напряжения), которая через блок ограничения напряжения (БОН), поступает в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) микроконвертера. БОН обеспечивает защиту элементов обработки и преобразования информации от возможных выбросов напряжения, обусловленных переходными процессами при щёточной коммутации индуктивностей обмоток электрической машины.

После того как аналоговый сигнал прошел преобразование в цифровой сигнал, информация обрабатывается микроконтроллером (МК) в соответствии с заданной программой и выводится на жидкокристаллический индикатор (ЖКИ). Слаботочная часть имеет свою схему питания.

Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 2.

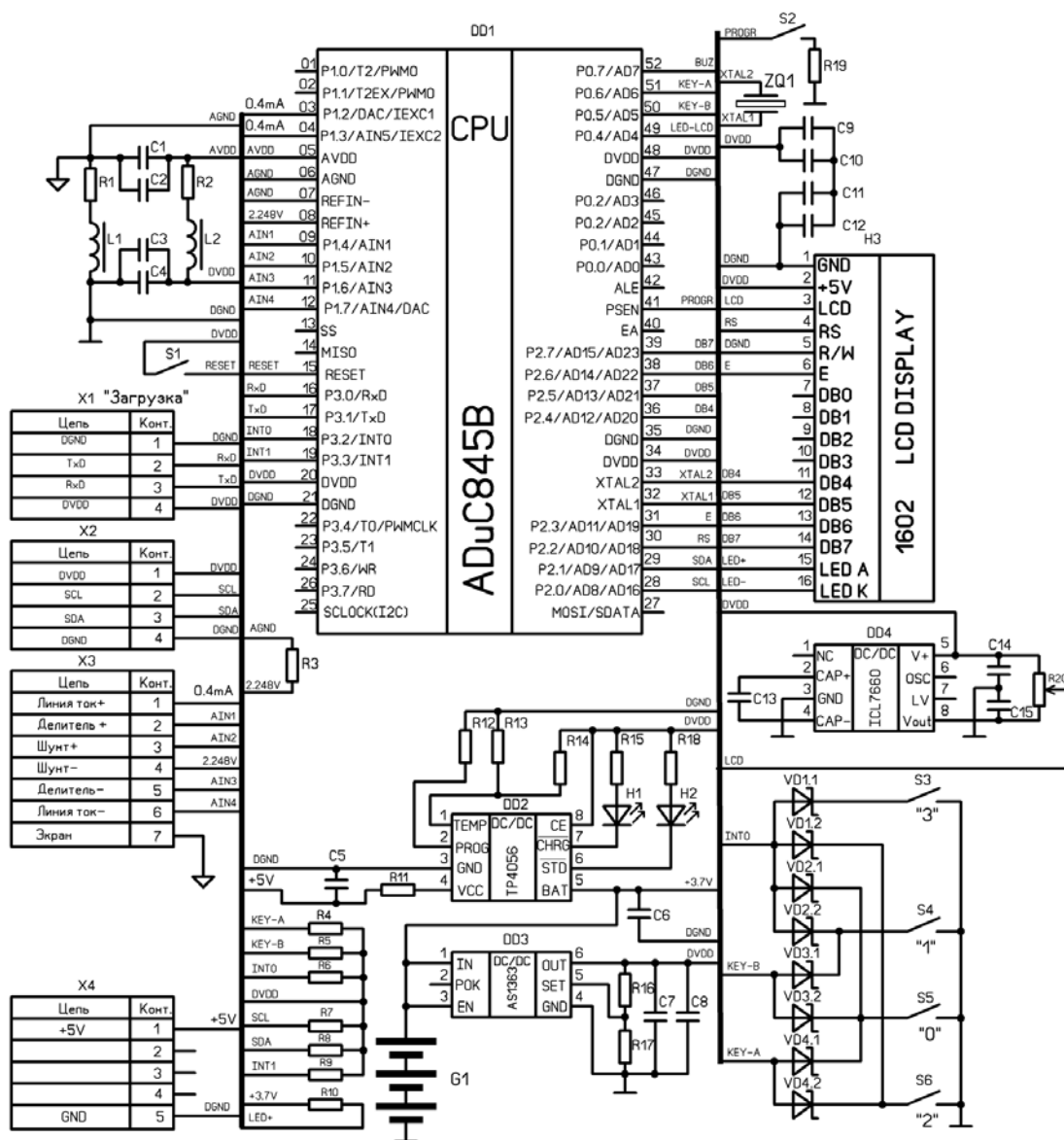


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная

Измерительным и вычислительным ядром приведенной схемы является микроконтроллер на основе структуры 8051 фирмы Intel, т.е 8-разрядный микропроцессор [4]. Этот микропроцессор обеспечивает решение задач управления измерением и первичной обработки результатов измерения.

Для обеспечения высокой помехозащищенности в схеме прибора организуется два общих провода, так называемые «аналоговая земля» и «цифровая земля». На схеме они обозначаются аналоговая-AGND и цифровая-DGNDсоответственно.

Для дальнейшего повышения помехозащищенности схемы организованы две цепи питания микроконвертера: аналоговое питание (AVDD) и питание цифровой части микроконвертера (DVDD).

Для тактирования микроконвертера служит кварцевый резонатор ZQ1 с номинальной частотой возбуждения 32768Гц.

Снятие параметров тока и напряжения производится с помощью шунта и делителя напряжения. Полученные аналоговые сигналы оцифровываются аналого-цифровым преобразователем, после чего обрабатывается микроконтроллером по созданному алгоритму. Результат выводится на жидкокристаллический индикатор.

Устройство имеет автономный заряжаемый источник питания с номинальным напряжением 3.7В, адаптированный для подзарядки от стандартного порта USB.

Разработана эскизная конструкторская документация блока контроля параметров энергопотребления электрических машин постоянного тока, изготовлен и испытан макетный образец. Основная относительная погрешность измерения напряжений, токов и мощности в нормальных условиях не превышает 0.1 %.

Библиографический список

1. ЭНЕРГОСОВЕТ: портал по энергосбережению. URL: <http://www.energsovet.ru/> (дата обращения: 10.04.2017)
2. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федеральный закон № 261-ФЗ от 23.11.2009
3. Андреева Е. Г., Морозова Н. С. Машины постоянного тока: учеб. пособие. Омск: ОмГТУ, 2015. 80 с.
4. AnalogDevices. URL: <http://www.analog.com/> (дата обращения: 11.04.2017)

УДК 621.317

А.А. Кабанов, А.В. Зеленов, А.И. Щелканов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация. Работа посвящена созданию блока измерения параметров энергопотребления электрических машин переменного тока, включающих в себя как синхронные, так и асинхронные электродвигатели. Проведены анализ вычислительных процессов и средств разработки, произведен выбор микроконтроллера и разработана схема электрическая принципиальная.

Ключевые слова: микроконтроллер, аналого-цифровой преобразователь, электрические машины переменного тока.

Повсеместное внедрение высокотехнологичного оборудования с ЧПУ обуславливает снижение материальных издержек производства, повышение КПД и срока службы оборудования. Необходимым условием этого процесса является интеллектуализация средств измерения технологических параметров. Интеллектуальный электропривод, дополнительное оборудование, датчики, контроллеры, линии связи предъявляют весьма жесткие требования к качеству потребляемой ими электрической энергии, что обеспечивается использованием различного рода электронных импульсных преобразователей [1]. Мощность последних, к сожалению, ежегодно возрастает, в связи с чем назрела необходимость комплексного контроля параметров электроэнергии.

Развитие и совершенствование законодательной базы в области технического регулирования привело к внедрению новых стандартов, направленных на введение процедур обязательной сертификации электрической энергии по показателям качества, предусмотренным введенным с 2013 года национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 54149-2010 [11]. В соответствии с данным стандартом метрологической базой для средств измерения показателей качества электроэнергии должен являться национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 51317.4.30-2008 [2].

Используемые в настоящее время измерительные приборы либо очень дороги, либо не соответствуют современным метрологическим нормам и не могут быть использованы для проведения адекватного анализа работы электропривода. Применение методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) позволяет повысить не только качество измерений, но и значительно расширить функции приборов [3]. Кроме уже известных возможностей (программирование диапазонов преобразования, фильтрация сигнала, коррекция аддитивных и мультипликативных погрешностей) появляются и другие весьма полезные функции (коррекция нелинейности номинальных статических характеристик используемых датчиков, задание параметров для реализации допускового контроля, реализация сервисных режимов самодиагностики, оптимизация трафика по информационным шинам с ограниченной пропускной способностью) [4].

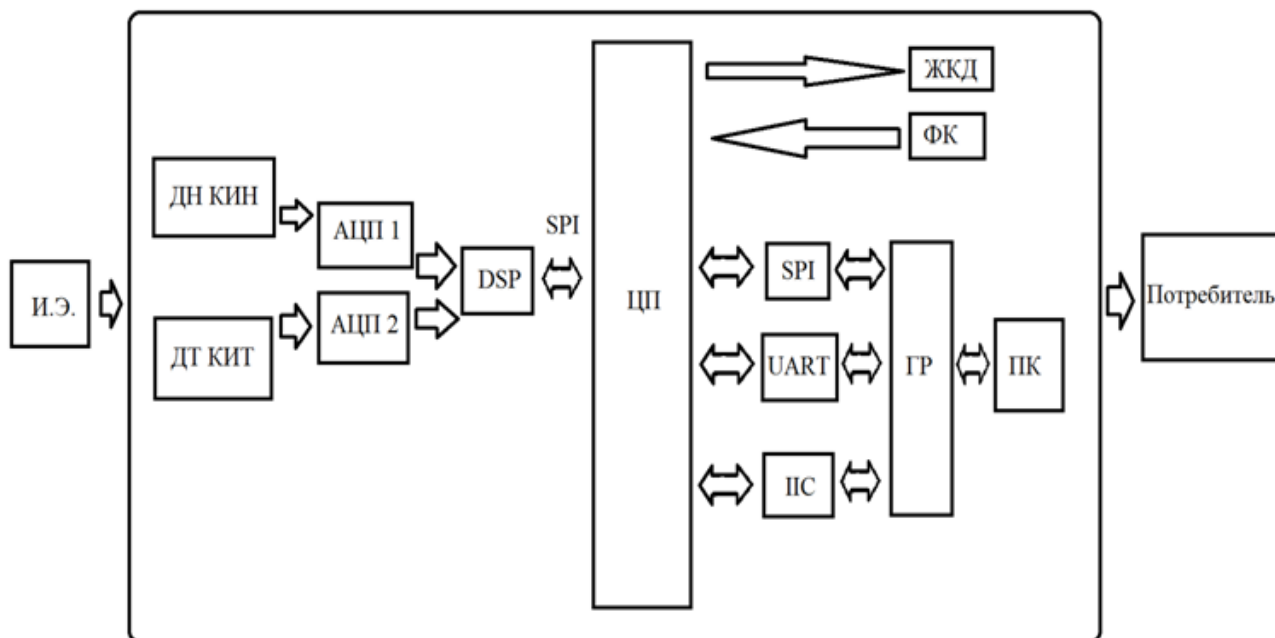


Рис.1. Структурная схема блока измерения параметров энергопотребления

На рис. 1 приведена структурная схема разработанного устройства. Схема содержит:
 И.Э. –источник электроэнергии; ДН КИН –датчик напряжения канала измерения напряжения; ДТ КИТ –датчик тока канала измерения тока; АЦП1 –аналого-цифровой преобразователь канала измерения напряжения; АЦП2 –аналого-цифровой преобразователь

The schematic diagram illustrates the internal circuitry of the ADE7953 LCD module. It features two main integrated circuits: the ADE7953 microcontroller (DD1) and the STC12C5A60S2 CPU (DD2). The ADE7953 is connected to the STC12C5A60S2 via a data bus (P0.0-P0.7, P2.0-P2.7) and control lines (RESET, INT, etc.). The module is powered by a +3.3V supply, which is derived from a +5V supply through a DC/DC converter (AMS1117). The STC12C5A60S2 CPU is also powered by a +5V supply. The module includes a 2002 LCD display, a DC/DC converter (AMS1117), and various passive components (resistors R1-R11, capacitors C1-C16, inductors L1-L2) for signal conditioning and power regulation.

93

На рис. 2 приведена принципиальная схема, реализованная на основе приведенной структуры. Основу измерительного ядра составляет специализированная микросхема фирмы Analog Devices, содержащая 3 прецизионных аналого-цифровых преобразователя, основанных на принципе сигма-дельта модуляции ADE7953 (DD1) [5].

Символьно-цифровой дисплей содержит 2 строки по 20 символов. Для оперативного изменения режимов работы устройства схема содержит функциональную клавиатуру S1–S4. Для упрощения программной организации меню кнопки S3 S4 подключены ко входу общего прерывания INT0.

Для реализации высокой помехозащищенности цифровое напряжение питания отделено от аналогового напряжения питания, эту функцию выполняет дроссель L2 индуктивностью порядка нескольких мкГн и демпфирующий резистор R3, последовательно включенный с индуктивностью, 1,6 Ом. Соответственно для компенсации и коррекции индуктивности печатных проводников служат конденсаторы C1–C4, размещенные на печатной плате в непосредственной близости к соответствующим выводам питания микроконтроллера.

Входы АЦП через резисторы с квази нулевым сопротивлением поступают для КИН элементы делителя напряжения R10 R11, который реализован на прецизионных SMD резисторах с номинальным значением температурного коэффициента сопротивления $9 \dots 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Потенциальные выводы шунта подключаются к выводам I1 I2, причем элементы R5 R6 C5 C6 обеспечивают дифференциальный режим работы АЦП токового канала, что обеспечивает значительное снижение помех. Дополнительный вход I* может использоваться для дальнейшего расширения функциональных возможностей данного прибора, например, в части реализации методов и средств технической диагностики.

Результаты испытаний подтвердили корректность теоретических предпосылок. Погрешность измерения среднеквадратических значений напряжения (в диапазоне 3...300 В) и тока (в диапазоне 0,04...40 А) не превышает 0,15 %, а погрешность измерения активной мощности составляет 0,2 % при коэффициентах мощности 1, +0,5 и минус 0,866, что позволит применять данный прибор для решения задач энергоаудита и в практической инженерной деятельности [6].

Библиографический список

1. Агунов А. В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах. СПб.: СПбМТУ, 2009. 134 с.
2. ГОСТ Р 51317.4.7–2008. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. М.: Стандартинформ, 2009. 54 с.
3. Блейхут Р. Алгоритмы быстрой обработки сигналов. М.: Мир, 1989. 448с.
4. Электротехнический портал: [Электронный ресурс]. URL: <http://datasheet.su>
5. AnalogDevices: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.analog.com/ru>
6. Притыко И.С., Щелканов А.И. Прецизионный измерительный преобразователь параметров нагрузки электрических машин переменного тока // Стандартизация, метрология и управление качеством: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 90-летию Росстандарта и 170-летию метрологической службы России. 2015. С. 118–122.

А.А. Кабанов, А.Ю. Криворучко, А.М. Сембаев, А.И. Щелканов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ И БЕСПРОВОДНЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ

Аннотация. Рассмотрены структурные и схемотехнические аспекты построения аппаратных средств преобразования сигналов тензометрических датчиков. Проведены экспериментальные исследования аппаратных средств, образующих измерительную структуру. Намечены пути повышения метрологических характеристик тензометрических преобразователей.

Ключевые слова: литые детали грузовых вагонов, резистивный тензопреобразователь, аналого-цифровой преобразователь, микроконтроллер, беспроводный интерфейс, автономное питание.

Литые детали тележек железнодорожных вагонов (боковые рамы) являются наиболее значимыми техническими изделиями с точки зрения безопасности эксплуатации. Комплекс ресурсных испытаний, призванных обеспечить надежность изделий, невозможно провести без средств прецизионной тензометрии, являющейся неотъемлемой частью статических и динамических измерений.

Представленный ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» проект межгосударственного стандарта, регламентирующий методы ресурсных испытаний боковых рам тележек железнодорожных грузовых вагонов, предполагает монтаж весьма большого количества тензодатчиков в зонах элементов конструкции, имеющих весьма высокую степень риска отказов [1].

Условия проведения поездных испытаний достаточно специфичны в плане широкого диапазона изменения температуры и влажности окружающей среды, наличия широкого спектра механических воздействий (тряска, удары, синусоидальная вибрация). Обеспечение надежного съема информации с датчиков вызывает необходимость интегрирования в конструкцию грузового вагона большого количества технологических кабелей, что на практике трудновыполнимо. Таким образом, задача создания многоканальных средств измерения деформаций с беспроводным интерфейсом является весьма актуальной.

Предлагаемое устройство выполнено на базе прецизионного многоканального аналого-цифрового преобразователя ADuC847 [2] с встроенным восьмиразрядным вычислительным ядром (рис.1). Кристалл объединяет сигма-дельта АЦП с разрешающей способностью 24 бит, восьмиканальный аналоговый мультиплексор с гибкой перепрограммируемой структурой, датчик температуры кристалла и усилитель с программируемым коэффициентом усиления (PGA) и элементами структуры периодической коррекции аддитивных погрешностей.

Интегрированный в массив программной памяти загрузчик обеспечивает загрузку прикладных программ в устройство через последовательный порт (UART).

АЦП с встроенным цифровым фильтром и программируемыми параметрами выходного потока данных обеспечивает широкий динамический диапазон низкочастотных сигналов микровольтового и милливольтного уровня, снимаемых непосредственно с выводов тензодатчиков [3].

Микропроцессорное ядро тактируется частотой до 12.58 МГц с выхода программно управляемого делителя встроенной системы фазовой автоподстройки частоты, синхронизируемой от частоты 32768 Гц. Архитектура микропроцессорного ядра полностью совместима с архитектурой микроконтроллеров семейства Intel 8051, отличаясь от

последних увеличенной в 12 раз производительностью за счет реализации одноциклового ядра.

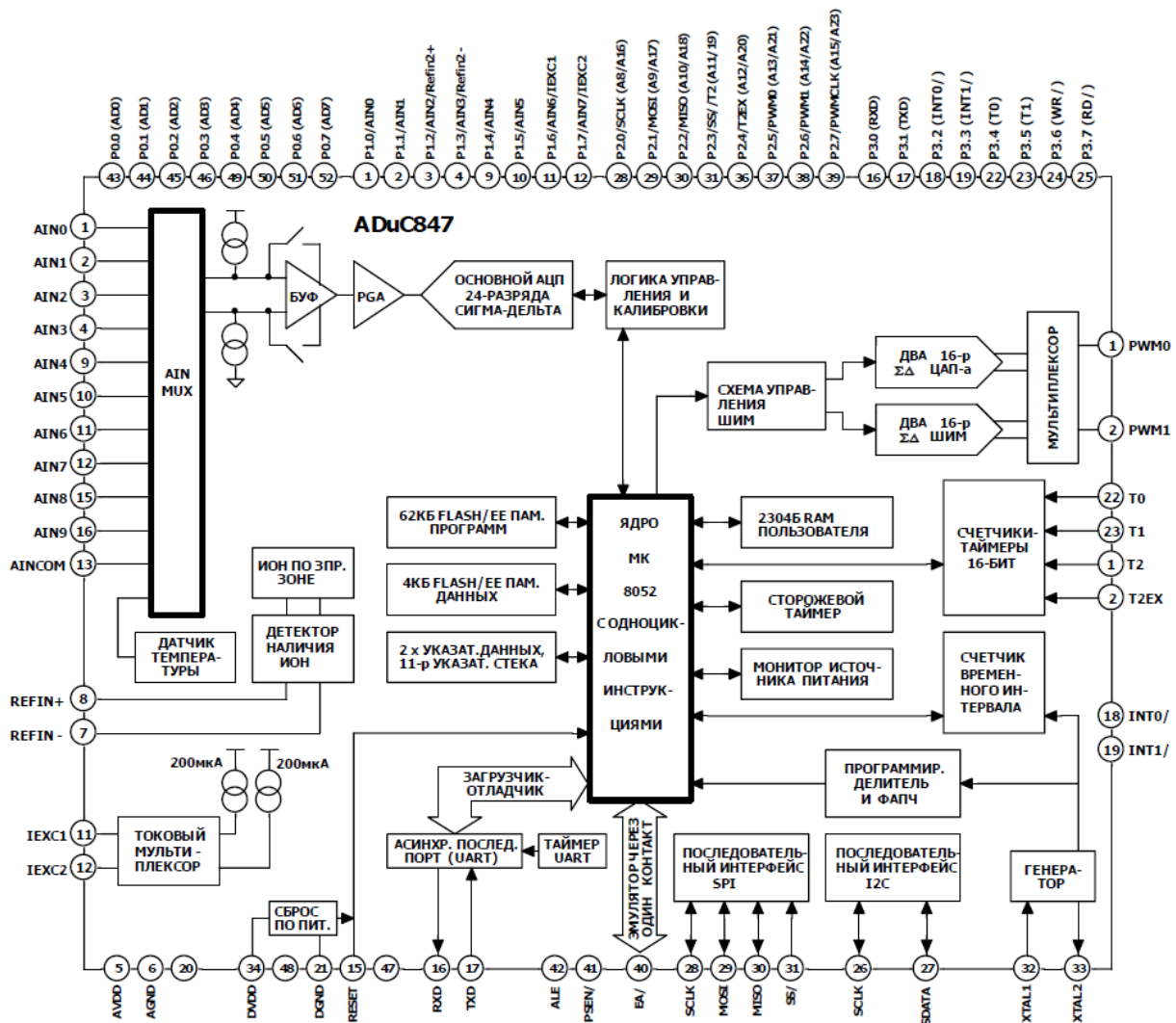


Рис. 1. Структурная схема ADuC847

Аналоговые входы ADuC847 конфигурируются в виде четырех полных дифференциальных каналов или восьми псевдодифференциальных каналов с одним общим входом AINCOM, что обеспечивает корректный синтез логометрической измерительной структуры [4] с четырехпроводным или шестипроводным подключением тензодатчика (рис. 2).

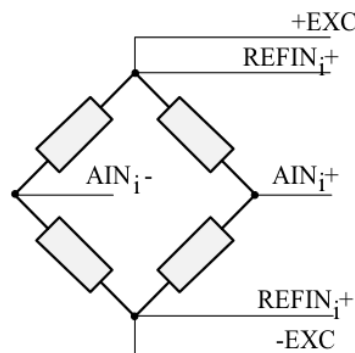


Рис. 2. Схема тензодатчика

Четырехпроводная схема подключения предпочтительна при использовании коротких кабелей к тензодатчикам, то есть когда не требуется температурная компенсация изменения сопротивления проводов питающего кабеля, вызванного изменением температуры окружающей среды.

В большинстве случаев предпочтительно использование шестипроводной схемы подключения, которая практически полностью компенсирует влияние возможных изменений сопротивления кабеля питания на функцию преобразования под воздействием изменения параметров окружающей среды [5].

Источник опорного напряжения [6], входящий в состав ADuC847, не обладает приемлемыми точностными параметрами, в силу чего в схему введен отдельный источник опорного напряжения, дополненный аналоговым коммутатором мостового типа для коррекции аддитивных погрешностей, вызванных паразитными термоэдс [7].

Беспроводной интерфейс работает в диапазоне частот 2.4 ГГц и подключен к контроллеру через интерфейс SPI [8].

Экспериментальные исследования изготовленного опытного преобразователя показали высокие метрологические характеристики при измерениях нагрузок в широком динамическом диапазоне преобразуемых сигналов.

Библиографический список

1. ОАО ВНИИЖТ. URL: <http://www.vniizht.ru/?id=260>
2. Analog Devices. URL: <http://www.analog.com/ru>
3. Bryan J. M. Sigma-delta measurement ADCs // Practical design techniques for sensor signal conditioning. AnalogDevicesInc., 1999. P. 8.16-8.34.
4. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. Киев: Вища школа, 1983. 455 с.
5. Орнатский, П.П. Автоматические измерения и приборы. Киев: Вицашкола, 1986. 504 с.
6. Miller P., Moore D. Precision voltage references // Texas Instruments Incorporated. AnalogApplicationsJournal. 1...4 pp.
7. Пашкова Н. В., Щелканов А. И. Структурные методы синтеза измерительных схем портативных цифровых микроомметров // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием (21-22 нояб. 2013г.). Омск: Изд-во ОмГУПС, 2013. С. 264-269.
8. Nordic Semiconductor. URL: <http://www.nordicsemi.no>

УДК 621.317.3

А.А. Кабанов, А.Н. Тамбовцев, А.И. Щелканов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ИЗМЕРИТЕЛЬ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО СЕНСОРА С ЦИФРОВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ

Аннотация. Рассмотрены вопросы создания цифровых измерителей освещенности, выполненных на основе кремниевых фотодиодов, интегрированных в структуру программируемого датчика с цифровым интерфейсом. Проведен анализ основных режимов работы.

Ключевые слова: осветительные системы, светодиоды, датчики светового потока, микроконтроллер.

Для жизнедеятельности человека показатели освещенности являются очень важным аспектом, так как восприятие мира для человеческого зрения связано именно со светом. При недостаточном освещении рабочий плохо видит окружающие предметы и плохо ориентируется в производственной обстановке. Хорошее освещение необходимо для нормального видения окружающих предметов и предотвращения заболеваний зрительного анализатора. Оно воздействует через сетчатку глаза на рабочие процессы мозга, влияет на функциональное состояние слухового аппарата, эндокринных органов, имеет бактерицидное и витаминообразующее действие. Недостаточная освещённость угнетает, понижается работоспособность, появляется сонливость. Слишком яркий свет, наоборот, возбуждает, способствует подключению дополнительных ресурсов организма, вызывая их повышенный износ.

Управление современными осветительными системами, реализованными на мощных светодиодах, предполагает измерение таких физических величин, как температура, давление, влажность воздуха и освещенность поверхности. Специфика условий эксплуатации таких систем обуславливает актуальность корректного выбора измерительных интерфейсов датчиков.

Анализ применения датчиков с точки зрения минимизации аппаратных затрат и обеспечения высокой надежности выявил весьма высокую перспективность датчиков с цифровым последовательным коммуникационным интерфейсом I2C. При этом обеспечивается значительное упрощение монтажа датчиков на объекте, унифицируется встроенное программное обеспечение управляющего микроконтроллера, повышается надежность системы управления в целом.

Если для датчиков температуры, давления и влажности воздуха можно найти стандартное, описанное в литературе решение, то для датчиков светотехнических параметров не все так просто.

Датчики светового потока, выполненные на основе кремниевых фотодиодов (фирма Freescale), присутствующие на рынке средств измерений, имеют недостаточно высокие метрологические характеристики и приемлемые для практики условия эксплуатации. Характерная для полупроводниковых датчиков значительная температурная погрешность достаточно трудно минимизируется программными средствами из-за отсутствия аналитических зависимостей номинальной статической характеристики преобразования [1].

Появившиеся в последнее время цифровые датчики освещенности представлены фирмой Intersil и имеют самые высокие в своем классе метрологические характеристики. Эти датчики имеют интегрированный в структуру кристалла фотодиод, прецизионный аналого-цифровой преобразователь и программно-аппаратные средства коррекции аддитивных и мультипликативных погрешностей фотодиода, обусловленных изменениями температуры окружающей среды. Таким образом, обеспечивается также и компенсация технологического разброса датчиков.

Многоточечная схема измерения может быть реализована простым параллельным соединением датчиков на шине I2C. Исключение конфликтов между датчиками на шине обеспечивается назначением уникального адреса каждому датчику или, при невозможности выполнения последнего, введением шинного арбитра [3].

На рис. 1 приведена структурная схема миниатюрного микропроцессорного измерителя освещенности.

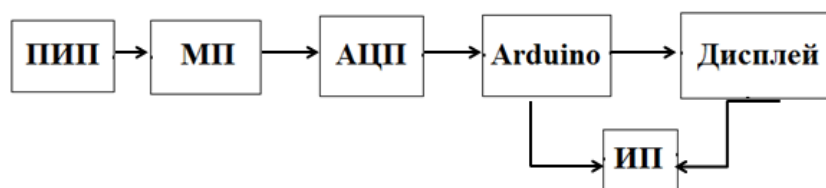


Рис.1. Структурная схема миниатюрного микропроцессорного измерителя освещенности

Первичный измерительный преобразователь (ПИП) через масштабирующий преобразователь (МП) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) подключен к Arduino (Arduino). Конструктивно ПИП, МП и АЦП выполнены в едином технологическом цикле на кремниевом кристалле и имеют стандартный последовательный коммуникационный интерфейс [2].

Для обеспечения комплекса необходимых сервисных функций в устройство введен жидкокристаллический символьно-цифровой дисплей.

Питание узлов структуры осуществляется источником питания (ИП) на основе литий-полимерного аккумулятора.

На рис.2. представлена принципиальная схема подключения датчика освещенности и дисплея к Arduino.

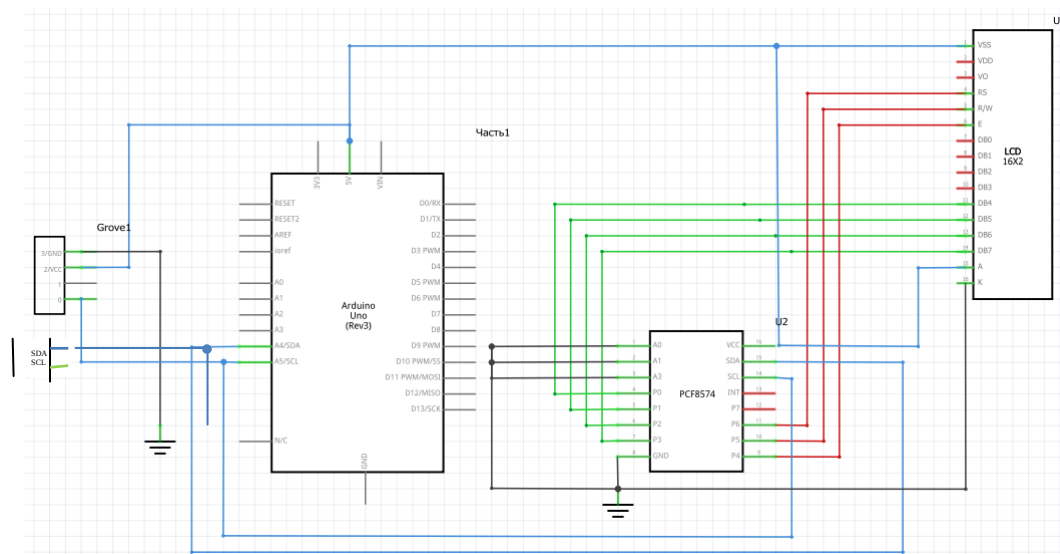


Рис. 2. Принципиальная схема миниатюрного микропроцессорного измерителя освещенности

Проведенные экспериментальные исследования изготовленного макетного образца с датчиком, снабженным интерфейсом I2C, показали полную работоспособность устройства. Основная относительная погрешность измерения в диапазоне 300...65535 люкс не превысила 1%. Возможно дальнейшее улучшение метрологических характеристик за счет совершенствования алгоритма коррекции аддитивных погрешностей.

Отказ от передачи слабых аналоговых сигналов по линиям связи за счет применения цифрового последовательного интерфейса позволяет значительно повысить помехозащищенность устройства и упростить выполнение требований технического задания в части электромагнитной совместимости при разработке конструкторской документации [4].

Унификация интерфейса для всех датчиков, используемых в устройстве управления, обеспечивает упрощение задачи создания прикладного программного обеспечения.

Библиографический список

1. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений. 2003г.
2. Агуров П.В. Последовательные интерфейсы ПК. Практика программирования. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 496 с.
3. Семенов Б.Ю. Шина I2C в радиотехнических конструкциях. М.: СОЛОН-Р, 2002. 189 с.
4. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники/ 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Вища школа, Головное изд-во, 1983. 455с.

ФОРМИРОВАНИЕ КОММУНИКАТИВНОЙ КОМПЕТЕНЦИИ У СТУДЕНТОВ НА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЯХ ПО ФИЗИКЕ

Аннотация. В статье анализируется содержание коммуникативных компетенций, формируемых у студентов физического факультета. Описан констатирующий этап педагогического эксперимента и его результаты, полученные при помощи анкетирования студентов 1 курса. Показано, что студенты положительно относятся к предложенной форме работы на практических занятиях. Выявлены трудности в процессе формирования и оценивания уровней сформированности коммуникативных компетенций у обучающихся.

Ключевые слова: коммуникативные компетенции, активные методы обучения, формы организации обучения в вузе, критерий Фишера.

В настоящее время учебный процесс требует постоянного совершенствования, так как происходит смена приоритетов и социальных ценностей. Переход высшего образования на федеральные образовательные стандарты, декларирующие компетентностный подход к проектированию образовательного процесса, порождает актуальную проблему поэтапного формирования компетенций, в частности, коммуникативной компетенции, и оценивания уровней их сформированности у студентов в процессе обучения в вузе.

С нашей точки зрения в формировании коммуникативных компетенций могут помочь активные методы обучения.

Активные методы обучения (АМО) – это методы, которые побуждают учащихся к активной мыслительной и практической деятельности в процессе овладения учебным материалом. В качестве основных неоспоримых достоинств выступают высокая степень самостоятельности, инициативности, развитие социальных навыков, сформированность умения добывать знания и применять их на практике, развитие творческих способностей.

Рассмотрим *формы организации обучения с использованием активных методов в вузе*. Существуют имитационные и неимитационные (традиционные) формы организации обучения с использованием активных методов обучения (лекции, семинары, дискуссии, коллективная мыслительная деятельность различных видов). Остановимся более подробно на коллективной мыслительной деятельности. В ее основе лежит диалогическое общение, один студент высказывает мысль, другой продолжает или отвергает ее. Известно, что диалог требует постоянного умственного напряжения, мыслительной активности. Данная форма учит студентов внимательно слушать выступления других, формирует аналитические способности, учит сравнивать, выделять главное, критически оценивать полученную информацию, доказывать, формулировать выводы.

Анализ подходов к определению сущности коммуникативной компетенции специалиста позволил выявить четыре ее важнейшие стороны: мотивационно-ценностную (готовность к коммуникации), когнитивную (знания в области коммуникативных дисциплин и практических умений и др.), интерактивную (способности и умения общения, умения речевого и неречевого контакта с другими людьми и др.) и перцептивную (рефлексивность, эмпатия и др.) [1].

Для языковых областей деятельности такая структура коммуникативной компетенции может считаться достаточной для исследования и формирования. В сферах же деятельности, не являющихся исключительно коммуникативными, как например, деятельность физика-исследователя, коммуникация с коллегами осуществляется при использовании профессионального предметного содержания. Поэтому необходимой составляющей

коммуникативной компетенции для физика должен стать предметный содержательно-процессуальный компонент.

Проблема нашего исследования связана с выявлением способов активизации познавательной деятельности студентов, необходимых для формирования их коммуникативных компетенций в процессе обучения физике.

Цель исследования – оценить возможность формирования коммуникативной компетенции у студентов младших курсов вузов во время работы в небольших группах на практических занятиях по физике.

На первом этапе исследования выявлялось содержание коммуникативных компетенций, которые должны быть сформированы у студентов-физиков.

Анализ ФГОС ВО по направлениям подготовки, реализуемым на физическом факультете ФГБОУ ВО ОмГУ им. Ф.М. Достоевского [2], показал, что выпускник каждого направления должен обладать определенным набором общепрофессиональных и профессиональных компетенций.

В таблице 1 представлены компетенции, содержащие коммуникативную составляющую для различных направлений подготовки, реализуемых на физическом факультете ОмГУ.

Таблица 1

Коды компетенций и направления подготовки	Содержание компетенции
ОК-2 «Физика», «Радиофизика», «Прикладные математика и физика», «Биотехнические системы и технологии»	способность анализировать основные этапы и закономерности исторического развития общества для формирования гражданской позиции
ОК-5 «Физика», «Радиофизика», «Прикладные математика и физика», «Биотехнические системы и технологии»	способность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач межличностного и межкультурного взаимодействия
ОПК-9 «Физика», «Радиофизика», «Прикладные математика и физика», «Биотехнические системы и технологии»	способность получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах и других малых коллективах исполнителей

Следующим этапом исследования была практическая реализация педагогических условий, способствующих развитию коммуникативной компетенции у студентов на практических занятиях по физике. Занятия проходили в виде коллективной работы в небольших группах. Экспериментом были охвачены 28 студентов физического факультета ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, направления подготовки бакалавров «Радиофизика» – 17 человек, «Биотехнические системы и технологии» – 11 человек. Студенты были объединены в небольшие группы (3-4 человека) по вариантам предварительно выполненной контрольной работы. В ходе занятия им было необходимо провести «работу над ошибками», допущенными в контрольной работе, и обсудить ход решения и результаты друг с другом.

Составлена анкета, с помощью которой предполагалось выяснить отношение студентов к коммуникации друг с другом и с преподавателем в процессе контроля результатов обучения. Анкета содержала вопросы, посвященные формам работы на практических занятиях, участию в оценивании результатов, например: «Какую форму работы на практическом занятии Вы бы для себя выбрали?» или «Хотели бы вы принимать участие в оценивании результатов работ? Как Вы считаете, что для этого нужно?». Анкета позволила собрать валидные данные об уровне сформированности мотивационно-ценностного аспекта коммуникативной компетенции.

По итогам занятий проведено анкетирование, в котором приняли участие студенты 1 курса физического факультета ОмГУ им. Ф.М. Достоевского в количестве 32 человек. Результаты были обработаны с помощью критерия Фишера.

Респонденты были разделены на группы по гендерному признаку и по успеваемости. Проводилось сравнение ответов на каждый вопрос анкеты следующих сочетаний групп: юношей и девушек; «успевающих» и «неуспевающих» студентов. Ни в одном сочетании групп респондентов значимых различий не было установлено. Подавляющее большинство студентов выбирали вариант ответа, несущий в себе коммуникативную составляющую.

По полученным данным можно сделать вывод, что студенты положительно относятся к предложенной форме работы на практических занятиях и готовы вступать в коммуникацию друг с другом.

Наблюдение взаимодействия студентов на практических занятиях по физике приводит нас к предположению, что в качестве оснований выделения уровней сформированности коммуникативной компетенции можно выбрать: инициативу в коммуникации, обобщенность, сформированность когнитивной, интерактивной и перцептивной составляющих. На этих основаниях можно выделить три уровня сформированности коммуникативной компетенции: 1) низкий (пассивный, ситуативный – студент не проявляет инициативу в коммуникации, общается вынужденно в отдельных ситуациях, все составляющие коммуникативной компетенции выражены слабо или не выражены совсем); 2) средний (подражательный, адаптивный – студент охотно участвует в коммуникации, предложенной кем-то другим; круг и ситуации общения имеют ограничения; составляющие коммуникативной компетенции выражены частично); 3) высокий (активно-поисковый, творческий – студент проявляет инициативу в коммуникации, способен к общению с любыми людьми в любых ситуациях, составляющие коммуникативной компетенции выражены ярко). Необходимым условием осуществления любого уровня учебной коммуникации студентов на занятии является знание предметного материала по физике. Уточнение признаков уровней сформированности коммуникативной компетенции, а также отнесение состояния каждого студента к определенному уровню требует большего объема выборки испытуемых и более длительного наблюдения.

В настоящий момент отсутствуют методики формирования и оценивания уровней сформированности компетенций у студентов физических направлений подготовки. Поэтому существует проблема: выяснить психолого-дидактические и методические основы формирования коммуникативной компетенции при обучении физике. В нашем исследовании показано, что при организации коммуникации в малых группах студентов на практических занятиях по физике необходимо задействовать все составляющие коммуникативной компетенции – предметную, мотивационно-ценностную, когнитивную, интерактивную и перцептивную. Далее предполагается разрешение сформулированной проблемы: расширение области применения активных методов в процессе обучения студентов младших курсов и выполнение соответствующих методических разработок.

Библиографический список

1. Осипчук О. С. Коммуникативная компетентность современного специалиста: монография. Омск: Изд-во Ом. гос. ун-та, 2010. 208 с.
2. ФГОС ВО по направлениям подготовки: «Прикладная математика и физика», «Физика», «Радиофизика», «Биотехнические системы и технологии», реализующимся на физическом факультете ФГБОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского». URL: <http://omsu.ru/sveden/eduStandarts/bakalavriat-fgos-vo/> (дата обращения: 08.04.2017).

ИМПЕДАНС ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ С ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫМИ МИКРОЭЛЕКТРОДАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ИССЛЕДУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В статье рассмотрен подход для определения частотной зависимости импеданса электрохимической ячейки с встречно-штыревыми микроэлектродами и влияния на эту зависимость удельной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости исследуемого раствора электролита. На основе моделирования распределения потенциала в системе встречно-штыревых электродов на постоянном токе определена постоянная ячейки. Для учета электрофизических процессов, протекающих в электрохимической ячейке, использована ее электрическая эквивалентная схема. Определены частотные зависимости модуля и аргумента импеданса электрохимической ячейки с встречно-штыревыми электродами при различных значениях удельной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости исследуемого раствора электролита.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, импеданс, электрохимическая ячейка, встречно-штыревые микроэлектроды, постоянная ячейки.

I. ВВЕДЕНИЕ

Импедансная спектроскопия является одним из методов электрохимического анализа веществ и широко применяется для измерения концентрации веществ, контроля коррозии и качества энергетических носителей, солнечных батарей, в медицине для контроля характеристик биологических тканей и диагностики заболеваний, изучения наноразмерных систем [1–3].

В импедансной спектроскопии применяются датчики различных конфигураций, но благодаря простоте конструкции и высокому отношению сигнал-шум наибольшее применение получили планарные встречно-штыревые микроэлектроды (ВШМЭ).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В импедансной спектроскопии измеряемым параметром является импеданс электрохимической ячейки. В различных областях частотного диапазона импеданс электрохимической ячейки по-разному зависит от электрохимических процессов, протекающих в ячейке. Значение импеданса определяется конструкцией ячейки и измерительных электродов и электрофизическими свойствами исследуемого вещества, такими как удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость. Для учета конструктивных параметров ячейки и системы электродов используется такой параметр как постоянная ячейки. Зная этот параметр и учитывая электрохимические процессы, протекающие в ячейке, можно определить влияние электрофизических свойств исследуемого вещества на импеданс ячейки и оптимальный частотный диапазон для определения конкретных свойств исследуемого вещества из экспериментальных данных.

Таким образом, целью данной работы является разработка математической модели для определения значения постоянной электрохимической ячейки с встречно-штыревыми электродами и определение влияния электрофизических свойств исследуемого вещества на импеданс данной ячейки.

III. ТЕОРИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

Постоянная электрохимической ячейки связывает между собой значение сопротивления между электродами ячейки на постоянном токе с удельной проводимостью исследуемого вещества и может быть определена из следующего выражения

$$K_c = \bar{R}_s \sigma,$$

где K_c – постоянная ячейки с ВШМЭ; R_s – сопротивление электрохимической ячейки на постоянном токе; σ – удельная проводимость вещества.

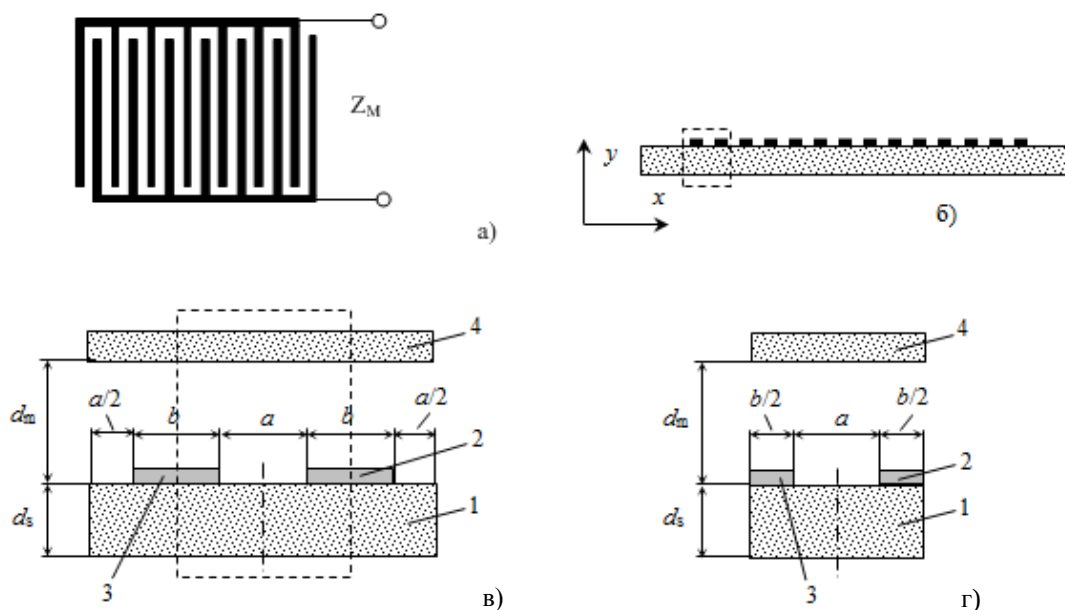


Рис. 1. Система штыревых микроэлектродов : (а) встречно-штыревые микроэлектроды; (б) их поперечное сечение; (в) поперечное сечение единичной области; (г) поперечное сечение элементарной ячейки; 1 – подложка; 2, 3 – микроэлектроды; 4 – верхняя стенка микроканала, d_m – высота микроканала, d_s – толщина подложки

Сопротивление электрохимической ячейки на постоянном токе определяется из распределения электрического поля в ней. Существующие подходы к решению данной задачи сводятся к численным методам [4–6]. Недостаток численных методов заключается в том, что полученные данные крайне неудобны в обработке, изменение условий задачи требует переопределения всех параметров численного моделирования, точность расчетов зависит от вычислительной мощности ЭВМ.

Для определения постоянной электрохимической ячейки можно использовать аналитический метод, предложенный в [7]. Согласно данной работе для нахождения распределения электрического поля в системе встречно-штыревых микроэлектродов из нее выделяется элементарная ячейка, как показано на рис. 1. Это возможно благодаря трансляционной симметрии в направлении оси x . В свою очередь, данная элементарная ячейка обладает зеркальной симметрией, что позволяет выделить в ней область моделирования, показанную на рис. 1г.

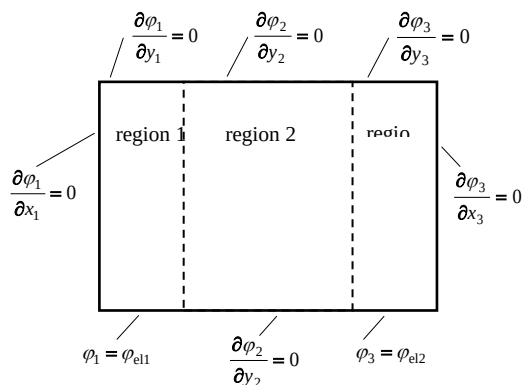


Рис. 2. Структура домена и его разбиение на отдельные области

Разбив данную область моделирования на три прямоугольные зоны (рис. 2) в зависимости от граничных условий, запишем для каждой зоны дифференциальное уравнение для распределения потенциала и граничные условия между зонами и на границе с электродами в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial y_j^2} = 0; \quad (1)$$

$$\sigma_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} = j^{(j,s)}, \quad (2)$$

Для каждой зоны дифференциальное уравнение (1) с граничными условиями (2) решается методом собственных функций, что позволяет определить распределения потенциала в зоне

$$\begin{aligned} \varphi_j = & \frac{1}{l_j b_j \sigma_j} \left[-\delta_0^{(j,s)} - \delta_0^{(j,t)} + \delta_0^{(j,u)} + \delta_0^{(j,v)} \right] + \frac{2}{l_j b_j \sigma_j} \sum_{k=1}^{\infty} \left[(-1)^k \delta_0^{(j,s)} - \delta_k^{(j,t)} + \delta_0^{(j,u)} + \delta_k^{(j,v)} \right] \cdot \\ & \cdot \frac{1}{(k\pi/l_j)^2} \cos\left(\frac{k\pi x_j}{l_j}\right) + \frac{2}{l_j b_j \sigma_j} \sum_{m=1}^{\infty} \left[-\delta_m^{(j,s)} - (-1)^m \delta_0^{(j,t)} + \delta_m^{(j,u)} + \delta_0^{(j,v)} \right] \frac{1}{(m\pi/b_j)^2} \cos\left(\frac{m\pi y_j}{b_j}\right) \\ & \cdot \frac{1}{(m\pi/b_j)^2} \cos\left(\frac{m\pi y_j}{b_j}\right) + \frac{4}{l_j b_j \sigma_j} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left[-(-1)^k \delta_m^{(j,s)} - (-1)^m \delta_k^{(j,t)} + \delta_m^{(j,u)} + \delta_k^{(j,v)} \right] \cdot \\ & \cdot \frac{1}{(k\pi/l_j)^2 + (m\pi/b_j)^2} \cos\left(\frac{k\pi x_j}{l_j}\right) \cos\left(\frac{m\pi y_j}{b_j}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где l_j и b_j – длина и ширина области j , соответственно; x_j , y_j – координаты области j ; k , m – индексы суммирования по координатам x_j и y_j , соответственно; s , t , u , v – индексы смежных зон; δ – весовые коэффициенты, определяющие плотность тока на границах между зонами.

Выражения для распределения потенциала в зонах содержат неизвестные весовые коэффициенты, для нахождения которых можно использовать следующие граничные условия

$$\varphi_1|_{x_1=l_1} = \varphi_2|_{x_2=0}; \quad \varphi_2|_{x_2=l_2} = \varphi_3|_{x_3=0}; \quad \varphi_1|_{y_1=0} = \varphi_{el1}; \quad \varphi_3|_{y_3=0} = \varphi_{el2};$$

Решение полученной системы линейных уравнений для неизвестных весовых коэффициентов позволяет определить их значение и найти распределение потенциала в области моделирования [7].

Исходя из распределения потенциала в области моделирования, определяется линейное сопротивление между встречно-штыревыми микроэлектродами

$$\bar{R}_d = \frac{\varphi_{el2} - \varphi_{el1}}{b/2} \int_0^{b/2} j_1 dx_1,$$

где $\bar{R}_d$ – линейное сопротивление между встречно-штыревыми микроэлектродами; φ_{el1} , φ_{el2} – потенциалы на электродах 1 и 2, соответственно, j_1 – плотность тока на электроде 1. Общее сопротивление ячейки с ВШМЭ на постоянном токе вычисляется по следующей формуле

$$\bar{R}_s = \frac{\bar{R}_d}{L(2N-1)},$$

где L – длина перекрытия штырей микроэлектродов; N – количество штырей в каждом микроэлектроде.

Для учета электрохимических процессов, протекающих в электрохимической ячейке, необходимо рассмотреть ее эквивалентную электрическую схему, элементы которой отражают данные процессы [4, 8-9]. На рис. 3 представлена предлагаемая эквивалентная электрическая схема рассматриваемой электрохимической ячейки с ВШМЭ.

Двойной электрический слой, сформированный на границе электрод-электролит, ведет себя как микроконденсатор и на электрической эквивалентной схеме представлен емкостью C_{dl} . Исследуемый раствор электролита, помещенный между двумя электродами и имеющий определенное электрическое сопротивление, можно рассматривать как последовательно соединенные емкости C_{dl} и сопротивление R_s . Емкость между встречно-штыревыми электродами учитывается вводом параллельно подключенного конденсатора с емкостью C_c .

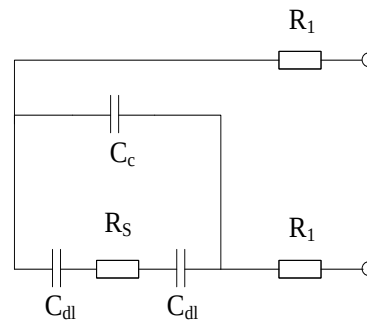


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема электрохимической ячейки

Импеданс эквивалентной электрической схемы, приведенной на рис. 3, определяется на основе следующего выражения

$$Z_M = \frac{Z'}{j\omega C_c Z' + 1} + 2R_1,$$

где Z' – общее сопротивление цепи $C_{dl} - R_s - C_{dl}$; ω – частота; C_c – емкость между двумя встречно-штыревыми электродами; R_1 – сопротивление электрода.

Сопротивление Z' равно

$$Z' = R_s + \frac{2}{j\omega C_{dl}},$$

Емкость двойного электрического слоя определяется выражением

$$C_{dl} = \frac{(2N-1)Lb}{2} C_0,$$

где b – ширина штырей микроэлектродов; C_0 – удельная емкость двойного электрического слоя на границе раствор электролита – электрод.

Емкость между двумя встречно-штыревыми электродами, C_c , может быть определена через постоянную ячейки с ВШМЭ по следующей формуле

$$C_c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{K_c},$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость электролита.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представленная аналитическая модель была использована для исследования импеданса ячейки с встречно-штыревыми микроэлектродами. Пленочные микроэлектроды на основе платины (удельная проводимость $9.66 \cdot 10^6$ См/м) имели толщину 0.5 мкм. Длина электродов равнялась 1000 мкм. Ширина проводников электродов была принята равной 150 мкм. Расстояние между электродами было выбрано равным 100 мкм. Количество электродов N полагалось равным 20. Удельная емкость двойного электрического слоя на границе раствор электролита – электрод выбрана равной 10 мкФ/см². При моделировании сопротивление электродов полагалось равным 0.

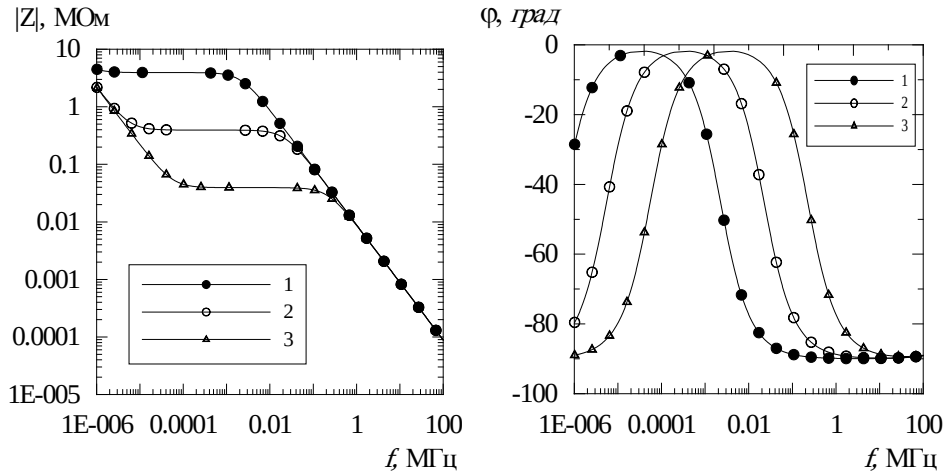


Рис.4. Зависимость модуля и аргумента импеданса от частоты при фиксированной относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon=80$ для различных значений проводимости: 1 – $\sigma=1 \cdot 10^{-5}$ См/м; 2 – $\sigma=1 \cdot 10^{-4}$ См/м; 3 – $\sigma=1 \cdot 10^{-3}$ См/м

На рис. 4 представлены зависимости модуля и аргумента импеданса электрохимической ячейки с ВШМЭ от частоты для трех значений проводимости раствора электролита: $1 \cdot 10^{-5}$ См/м, $1 \cdot 10^{-4}$ См/м и $1 \cdot 10^{-3}$ См/м, и при фиксированном значении относительной диэлектрической проницаемости, равном 80. На рис. 5 представлены зависимости модуля и аргумента импеданса электрохимической ячейки для трех значений относительной диэлектрической проницаемости: 27, 50 и 80 и при фиксированной проводимости электролита, равной $1 \cdot 10^{-5}$ См/м.

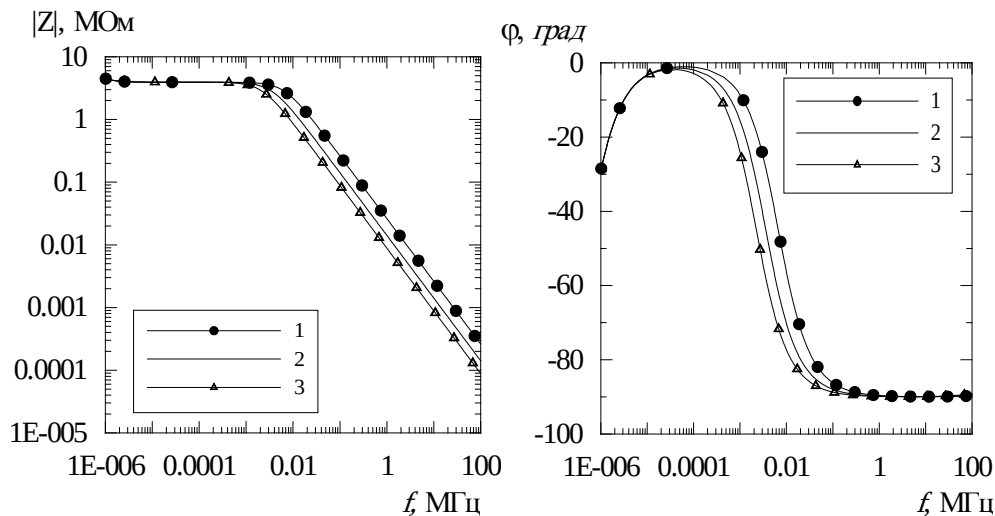


Рис. 5. Зависимость модуля и аргумента импеданса от частоты при фиксированной проводимости $\sigma=1 \cdot 10^{-5}$ для различных значений относительной диэлектрической проницаемости: 1 – $\epsilon = 27$; 2 – $\epsilon = 50$; 3 – $\epsilon=80$

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные на рис. 4 частотные зависимости модуля импеданса рассматриваемой электрохимической ячейки с ВШМЭ имеют три участка. На участках в области низких и высоких частот модуль импеданса уменьшается с увеличением частоты. В области средних частот модуль импеданса не зависит от частоты. Значение частот, разграничивающих указанные участки частотной зависимости импеданса, зависят от удельной проводимости раствора электролита. С повышением проводимости раствора электролита данные значения смещаются в область более высоких частот. Уменьшение импеданса в области низких и высоких частот связано с тем, что на данных диапазонах частот импеданс в основном определяется емкостной составляющей. На низких частотах данное влияние обусловлено емкостью двойного электрического слоя на границе раствор электролита – электрод. На высоких частотах основное влияние на импеданс оказывает емкость между двумя встречно-штыревыми электродами. В области средних частот модуль импеданса не зависит от частоты и определяется в основном активным сопротивлением ячейки с ВШМЭ, равным сумме сопротивлений раствора электролита и выводов.

Анализ частотных зависимостей аргумента импеданса электрохимической ячейки с ВШМЭ, представленных на рис. 4, показывает, что данные зависимости аргумента импеданса ячейки не изменяют свою форму при изменении удельной проводимости раствора электролита. Однако с повышением удельной проводимости раствора электролита эти зависимости смещаются в область высоких частот. При определенных значениях частот частотные зависимости аргумента импеданса электрохимической ячейки имеют близкие к нулю значения.

Частотные зависимости модуля электрохимической ячейки с ВШМЭ при различных значениях относительной диэлектрической проницаемости раствора электролита имеют различие только в области высоких частот (рис. 4). На этом участке с повышением относительной диэлектрической проницаемости раствора электролита значение модуля импеданса ячейки уменьшается. Частотные зависимости аргумента электрохимической ячейки с ВШМЭ при различных значениях относительной диэлектрической проницаемости имеют различие на участке, где аргумент с повышением частоты изменяется от 0 до -90 градусов (рис. 4). С повышением относительной диэлектрической проницаемости этот участок смещается в область низких частот.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен подход для определения изменения частотной зависимости импеданса электрохимической ячейки с встречно-штыревыми микроэлектродами от свойств исследуемых растворов электролитов. Определение импеданса ячейки проведено на основе аналитической модели для нахождения значения постоянной ячейки и с использованием ее эквивалентной электрической схемы для учета электрохимических процессов, протекающих в ней. Предложенный подход использован для определения частотных зависимостей модуля и аргумента электрохимической ячейки с ВШМЭ при различных значениях удельной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости раствора электролита. Результаты анализа позволяют определить участки частотных зависимостей импеданса, на которых наблюдается наибольшее влияние указанных параметров на импеданс электрохимической ячейки с ВШМЭ.

Библиографический список

1. Grimnes S., Martinsen O.G. Bioimpedance and bioelectricity basics / London: Academic Press, 2008. 484 p.
2. Krakowiak S., Darowicki K., Slepiski P. Impedance of metastable pitting corrosion // Journal of Electroanalytical Chemistry, 2005. Vol. 575. P. 33–38.
3. Handbook of Electrochemistry / Ed.: C.G. Zoski. Amsterdam: Elsevier, 2006. 935 p.

4. Ibrahim M., Claudel J., Kourtiche D., Nadi M. Geometric parameters optimization of planar interdigitated electrodes for bioimpedance spectroscopy // J. Electr. Bioimp. 2013. Vol. 4. P. 13–22.
5. Pech D., Brunet M., Dinh T.M. [et al.] Influence of the configuration in planar interdigitated electrochemical micro-capacitors // Journal of Power Sources, 2013. Vol. 230. P. 230–235.
6. Vurin D., Džapo H. Multielectrode measurement of conductive liquid layer thickness // Proceedings of 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Graz, Austria, 2012. P. 123–128.
7. Kozlov A.G., Fadina E.A. Analysis of electrophysical processes in system of interdigitated microelectrodes used in microchannels // Proceedings of X International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics), Omsk, Russia, 2016. P. 1–5.
8. Timmer B., Sparreboom W., Olthuis W.[et al.] Optimization of an electrolyte conductivity detector for measuring low ion concentrations // Lab on a Chip, 2002. Vol. 2. P. 121–124.
9. Hong J., Yoon D.S., Kim S.K.[et al.] AC frequency characteristics of coplanar impedance sensors as design parameters // Lab on a Chip, 2005, Vol. 5. P. 270–279.

УДК 573.311.3

А.В. Кормилец, Т.А. Аронова

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Аннотация. В связи с тем, что технологии беспроводной передачи электрической энергии пока не получили повсеместного применения, приходится использовать различные проводники, что вызывает необходимость классификации и определения их свойств, в частности их проводимости. В данной обзорной статье рассмотрены основные методы определения проводимости твёрдых тел, указаны основные аспекты и собраны рекомендации по наилучшему осуществлению измерений. Методы классифицированы в зависимости от необходимости применения электродов или отсутствия таковой. Данные методы имеют широкие возможности для применения на практике, так как могут быть осуществлены вне лабораторий и не требуют большого количества условий.

Ключевые слова. Электропроводность, двухэлектродный метод, трёхэлектродный метод, зондовый метод, тепловой шум.

Интенсивное развитие электротехники в современном мире спровоцировало широкую потребность в глубоком понимании свойств электропроводящих материалов и потенциальных возможностей практического применения последних. В военной и космической промышленности обнаружились потребности в разнообразных клеях, красках, пастах и множестве других покрытий, способных проводить электрический ток, а также экранирующих панелей.

Физический параметр, отвечающий за способность тела или среды проводить электрический ток, в научной литературе именуется электропроводностью. На практике же при работе с реальными образцами чаще применяются такие термины как: удельное объёмное электрическое сопротивление и удельное поверхностное электрическое сопротивление. В данном случае применительно к исследуемому телу под этими терминами понимается отношение напряжения к току, протекающему по объёму образца или же по его

поверхности. При измерении удельных сопротивлений принято пользоваться системой вольтметр-амперметр.

Для исследования различных параметров образцов, их структуры, химического состава, молекулярной подвижности и, конечно же, электропроводности отлично подходят электрические методы. Измерительные электроды должны обеспечивать равномерное распределение электрического поля в исследуемом теле. Добиться этого можно подходящей формой электродов, обычно это дискообразная конфигурация. Допустимый зазор между электродом и охранным кольцом (при наличии такового) должен составлять приблизительно 2 миллиметра. Для обеспечения лучшего контакта электродов с образцом рекомендуется использовать отожженную алюминиевую фольгу для притирки, применять покрытия из графита, также не лишним будет предварительное шлифование металлических электродов[1,2].

Двухэлектродный метод. Двухэлектродный метод, также известный как биполярный метод, является достаточно простым и надёжным. Чаще всего при измерении используют ЭХЯ (электрохимические ячейки), они представляют собой образец с инертными по отношению к токопроводящим частицам электродами. При этом с особым вниманием нужно отнестись к сопротивлению гетерофазного контакта электрода с электролитом. Величина этого сопротивления обусловлена эффектами пограничной поляризации, природой электродов, способом их нанесения, а так же окружающей атмосферой и рядом других факторов. Для обеспечения корректной работы данного метода необходимо следить за тем, чтобы полное электрическое сопротивление контактов было ниже, чем сопротивление образца, а также были правильно подобраны электроды, особенно при измерении характеристик образцов, обладающих малым сопротивлением. В данном случае рекомендуется подбирать обратимые электроды.

В данном методе напряжение, либо постоянное, либо переменное, прикладывается к образцу, размещённому между двух электродов, что позволяет измерить сопротивление электрохимической ячейки. Однако нужно помнить, что при наложении постоянного напряжения должен отсутствовать сдвиг фаз между этим напряжением и током, другими словами нужно использовать обратимые контакты. Если исследуемое тело обладает большим сопротивлением, рекомендуется использовать охранные кольца, разрешающие проблемы, связанные с токами утечки [3, 4]. Определение объёмного активного сопротивления образца позволяет рассчитать проводимость последнего. Из-за некоторого расхождения выводов теории и экспериментальных данных принято учитывать геометрические параметры образца [5], а поправки могут достигать 30%. Поэтому на практике двухэлектродные ячейки получили очень широкое применение с использованием переменного тока.

Трёхэлектродный метод. Данный метод используется в случае необходимости измерения истинного объёмного или поверхностного сопротивления образца [4]. Суть всего метода заключена в определении токов, протекающих через образец или же по его поверхности при подаче напряжения. Возможны два случая осуществления соединения. В первом случае экран провода и охранный кольцо соединяют с полюсом источника тока и последний при протекании между электродами по поверхности образца не складывается с измеряемым током. Второй способ позволяет измерить поверхностное сопротивление, для этого поверхностный ток нужно пустить через гальванометр, а для тока, идущего по объёму, исключить гальванометр из цепи. В литературе описан случай одновременного измерения поверхностной и объёмной проводимостей [6].

Четырёхэлектродный (зондовый) метод. Четырёхэлектродный, или зондовый, метод позволяет исключить эффекты, создаваемые электродным сопротивлением, а значит, и снизить погрешность измерений. На образец накладываются четыре электрода. По краям два «токовых» электрода (также они называются внешними, по ним будет протекать ток), а между ними два ножевых или узкополосных, поперечных «потенциальных» электродов или «потенциометрических». Затем к токовым электродам, последовательно с амперметром,

будет подключен источник постоянного напряжения, а к потенциальным – электромер. Для корректности измерений необходимо следить за тем, чтобы входное сопротивление электромера значительно превышало возможное контактное сопротивление. Токовые электроды изготавливаются из меди или латуни. Потенциометрические электроды изготавливают из резины и оборачивают отожженной свинцово-оловянной фольгой. В случае проявления у образца анизотропии, сопротивление измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях (как правило, вдоль и поперёк оси вытянутости), а в качестве конечного результата принимают среднее арифметическое. На практике наилучшую реализацию метода обеспечивает использование минимальных токов.

Четырёхэлектродный метод имеет ряд недостатков. Ограниченность его использования связана с возможностью несоответствия формы образца необходимой конфигурации (типичной формой для образца является вытянутая пластина) и трудностями в образовании точечных электродов-зондов в случаях исследования не стандартизированных образцов. Хотя в литературе описан усовершенствованный метод Ван-дер-Пува, позволяющий производить измерение удельного сопротивления у образцов любой формы [7, 8]. Также, в случае использования в качестве «потенциальных» электродов их протяжённого варианта, возникают трудности при определении эффективного межэлектродного расстояния, в силу отсутствия единого и общепринятого способа его определения [9]. Однако стоит отметить, что если толщина пластины намного меньше ширины электрода, то можно учитывать в расчётах расстояние между ближайшими краями, ведь такой электрод полностью закорачивает соответствующую область. В противном же случае, когда толщина пластины намного больше ширины электрода, уместным будет использовать расстояние между центрами электродов, однако, не исключается вариант и промежуточного метода, то есть включают в расчёт лишь 25% от ширины электрода [3,6].

Несмотря на множество факторов, не позволяющих назвать данный метод близким к идеалу, например, такие, как невозможность создания идеальных «точечных» контактов, неравномерность отвода тепла с поверхности образца и низкий уровень входного сопротивления вольтметра, на практике удаётся свести систематическую погрешность до уровня 5%.

Многоэлектродный метод. Многоэлектродным называется любой метод, где используется больше 4 электродов. Чаще всего применяется для исследования плёночных образцов твёрдых электролитов при создании ячеек плоской конфигурации. Заключается данный метод в измерении сопротивлений и потенциала самопроизвольной поляризации. В данном методе измерение сопротивления осуществляется при фиксированной частоте переменного тока на различных секциях образца, иными словами, при разных расстояниях между используемыми электродами. Ошибочно полагать, что большое количество электродов обеспечивает более высокую точность.

Измерения с помощью теплового шума. При тепловом равновесии броуновское движение заряженных частиц, как правило, приводит к флуктуирующей ЭДС между концами любого сопротивления. Спектр данных флуктуаций вычислил один из пионеров теории информации – Гарри Найквист. Он показал, что спектр является универсальной функцией сопротивления. Значение действительной части комплексного сопротивления определяет напряжение шумов. Из-за отсутствия физического смысла теплового равновесия для реактивных сопротивлений последние не генерируют тепловой шум. Шумы, возникающие в областях границ между электродом и электролитом, могут быть применены для анализа электрохимических процессов на электродах.

Бесконтактные методы измерения проводимости. Все рассмотренные ранее методы измерения проводимости предполагали применение внешних контактов. При использовании таких методов приходится мириться с трудностями определения истинного объёмного сопротивления образца из-за поляризационных эффектов на границах между электролитом и электродом. Однако бесконтактные методы позволяют полностью избежать этих трудностей.

Суть всех бесконтактных методов заключается в наведении вихревых токов внутри образца в изменяющемся магнитном поле. Осуществить измерение электропроводности твёрдых электролитов можно двумя способами: либо поместить образец про вращающееся магнитное поле, либо в катушку индуктивности.

Во вращающемся магнитном поле измерение проводимости основано на измерении величины момента сил, действующих на образец. В нём возникают индуцированные вихревые токи с разной амплитудой, величина которой зависит от электропроводимости образца. Возникающие токи вступают во взаимодействие с магнитным током, что и создаёт крутящий момент, который необходимо зафиксировать. Момент сил для сферического проводника рассчитал ещё Герц в начале 19 века. Если образец имеет более асимметричную конфигурацию, то для него расчёт значительно усложняется [10], также размеры стоит выбирать таким образом, чтобы была возможность пренебречь влиянием эффекта самоиндукции.

Методы с участием катушки индуктивности основаны на изменении её полного сопротивления при внесении в неё образца. Вносимый образец вступает во взаимодействие с магнитным полем катушки, вследствие чего изменяется комплексное сопротивление катушки индуктивности, в зависимости от проводимости материала образца.

Библиографический список

1. Ковнев А. В., Гоффман В. Г., Гороховский А. В. Импедансная спектроскопия полититаната калия, модифицированного солями кобальта // Электрохимическая энергетика. 2014. Т. 14, №3. С. 149–157.
2. Кречик В. Д., Семёнов М. Б., Филатов Д. О. Ионный и туннельный механизмы проводимости для растущих квантовых точек из коллоидного золота // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2015. № 3(35). С. 214–217.
3. Куншина Г. Б., Ефремов В. В., Белявский А. Т. Изучение ионного переноса в твёрдых электролитах со структурой NASICON методом импедансной спектроскопии // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 5(31). С. 105–110.
4. Лупицкая Ю. А., Филоненко Е. М., Калганов Д. А. Синтез и ионная проводимость в соединениях церата бария при частичном замещении ионов церия на ионы редкоземельных элементов // Вестник Челябинского государственного университета. 2015. № 22(377). С. 64–69.
5. Федоренко Я. Г. Электронная проводимость в плёнках селенида теллурида германия при ионной имплантации висмута // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 1, № 1(78). С. 53–59.
6. Голованов О. А., Макеева Г. С., Вареница В. В., Горелов Р. А. Расчет эффективности управления проводимостью графена действием электрического поля в терагерцовом диапазоне частот // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18, № 2. С. 27–32.
7. Козлова М. В., Алибеков С. Я. Электрические контакты с высокой удельной проводимостью. Научному прогрессу - творчество молодых: материалы IX международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам: в 3 частях. 18-19 апреля 2014 г. Йошкар-Ола 2014. С. 257–259.
8. Воронин В. И., Блатов В. А., Шехтман Г. Ш. Особенности кристаллической структуры полиморфных модификаций KFEO_2 и их связь с ионной проводимостью. // Физика твёрдого тела. 2013. Т. 55, № 5. С. 968–974.
9. Зверева О. С., Козлова М. В. Композиционный материал на основе меди с высокой удельной электрической проводимостью. Наука и образование: инновации, интеграция и развитие: материалы Международной научно-практической конференции (29-30 апреля 2014 г., Уфа 2014 г.): в 2-х частях. С. 181–183.
10. Букун Н. Г., Графов Б. М., Добровольский Ю. А. Фундаментальные проблемы ионики твёрдого тела // Электрохимия. 2011. Т. 47, № 4. С. 403.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Аннотация. В статье ставится задача рассмотреть современные методы измерения различных характеристик электрического поля. Целью исследования является изучение наиболее простых конструкций, необходимых для создания метода, а также реализация нового датчика по данной тематике. Одна из главных физических величин полей, рассматриваемая в статье, – напряженность. Эта характеристика важна для измерения полей, а также трудна для изучения, поэтому и стала объектом исследования в нынешнем мире. В ходе работы описаны разнообразные методы и эффекты, которые могут быть использованы для решения проблемы.

Ключевые слова: измерение, напряженность, электрическое поле, частота, конструкция.

Мы живем в мире, в котором происходит развитие нефтеперерабатывающей, химической, топливно-энергетической промышленности, а также электроэнергетики. Человек, работающий в той или иной промышленности, каждый день подвергает себя различного рода воздействиям. Одним из пагубных влияний являются электрическое и магнитное поля. Степень воздействия этих полей различной частоты во многом зависит от интенсивности облучения. Признаками облучения являются высокое артериальное давление, сонливость, боли в области сердца, усталость. Также в нашем XXI веке люди не представляют свою дальнейшую жизнь без электроники. Телефоны, компьютеры – всё это также оказывает воздействие на организм человека. Поэтому возникает вопрос об измерениях параметров полей с целью изучения их воздействия на биологические объекты. В повседневной деятельности человека актуальным средством исследования является измерение электрических полей (ЭП).

Электрическое поле – пространство, где наблюдается действие электрических сил, которое можно охарактеризовать многими параметрами: электрическим зарядом, напряженностью, электрическим потенциалом. Наиболее важной характеристикой действия ЭП является напряженность. Поэтому данная работа посвящена анализу методов и средств измерения напряженности ЭП в диапазоне частот от 30 МГц до 30 ГГц. В работе будут рассмотрены основные эффекты для измерения напряженности ЭП, а также современные конструкции датчиков и средств измерений по данной теме.

В работе в первую очередь будем рассматривать физические эффекты, необходимые для дальнейшего исследования, и выделим наиболее подходящие из них.

В ходе исследования были изучены следующие эффекты: электроэлектрический; резистивный; емкостной; электромеханический; электропространственный; электрооптический; электротепловой [7-9].

Проведенный анализ позволил выделить два физических эффекта. Это электрооптический и электроэлектрический, основанный на явлении электрической индукции, эффекты. Для детального рассмотрения возьмем электроэлектрический эффект. Он, по сравнению с электрооптическим эффектом, удобен для изучения датчиков высоких и сверхвысоких частот, простота и прочность конструкции, стойкость к перегрузкам, а также имеет малую погрешность около 2%. Основными недостатками является низкая чувствительность и влияние внешних факторов.

Электроэлектрический эффект лежит в основе нескольких методов, которыми можно воспользоваться для построения датчика электрического поля. К ним относятся следующие методы: метод изменения магнитного сопротивления цепи; метод электромагнитной

индукции (ЭМИ); метод моментов или метод конечных элементов; метод амплитудно-импульсной модуляции.

Исследование начнем с рассмотрения современных патентов на датчики и способы измерения электромагнитных полей [1-6].

Первая конструкция, которую мы рассмотрим, основана на проведении амплитудно-импульсной модуляции [1]. Структурная схема устройства, реализующего данный способ измерения напряженности, приведена на рисунке 1.

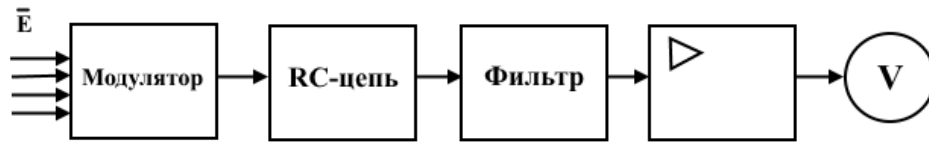


Рис. 1. Структурная схема измерительной цепи устройства

Измерения заключаются в следующем: электромеханический модулятор, состоящий из экранирующего электрода и приемных электродов, при своем вращении обеспечивает частоту модуляции сигнала, которую необходимо поддерживать неизменной. При изменении угловых значений соотношения секторных прорезей экранирующего электрода и приемных электродов, расположенных под ним, производится регулирование скважности сигнала. По результатам спектрального анализа выходного сигнала модулятора устанавливаются только значения скважности сигнала, при которых коэффициенты разложения гармоник имеют максимальное значение. При помощи избирательного усилителя выделяют именно те гармоники, которые нам необходимы. После этого детектируют и подают на регистрирующее устройство. При равных значениях уровня шумов результаты измерений напряженности ЭП отградуированы изначально и сведены в таблицу.

Главным объектом второй рассмотренной измерительной цепи служит электрическая антенна (рис. 2).

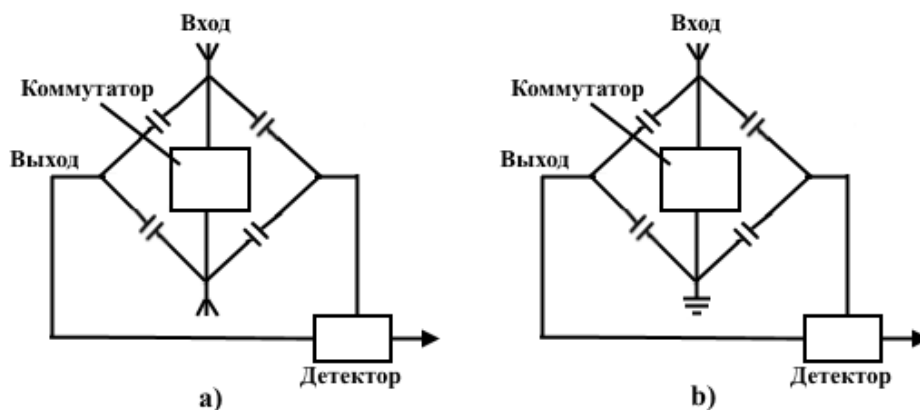


Рис. 2. Схема измерительной цепи с симметричным и несимметричным включением антенны

В данной измерительной цепи можно выполнить симметричное и несимметричное включения антенны. Рассмотрим принцип действия данной измерительной цепи. Так как измерительная цепь содержит мостовую схему, то перед проведением измерения необходимо при отключенной антенне с помощью источника смещения варикондов (конденсаторов переменной емкости, выполненных из сегнетоэлектрика) провести балансировку этой схемы, пока на выходной диагонали напряжения не будет установлен нуль. После этого антенну подключают к входной диагонали мостовой схемы. После внесения антенны в измеряемое электрическое поле на входной диагонали появляется напряжение, пропорциональное высоте антенны и величине напряженности измеряемого

ЭП. А на выходной диагонали схемы, после её разбалансировки, появляется напряжение, при котором вариконд работает в линейном режиме и которое пропорционально величине напряжения смещения этих конденсаторов и величине напряжения входной диагонали мостовой схемы. Чтобы избежать влияния внешних факторов на результат измерения, необходимо периодически замыкать входную диагональ мостовой схемы электронным коммутатором на резистор, имеющий малое сопротивление. Коммутатор вырабатывает последовательность импульсов выходной диагонали мостовой схемы и подает их на синхронный детектор, который синхронно с этими импульсами воспроизводит зависимость напряженности ЭП от времени [2].

Уравнение преобразования представляет с собой

$$E_{пр} = E \cdot \frac{\ln 1,5 \cdot \frac{l}{a} - 1}{0,08 \cdot \frac{l}{a}},$$

где $E_{пр}$ – напряженность поля в материале сегнетоэлектрических элементов прототипа; E – напряженность измеряемого электрического поля; l, a – продольный и поперечный размеры сегнетоэлектрического элемента соответственно.

Рассмотрим работу еще одного из интересных устройств. На рис. 3 представлена структурная схема данной конструкции.

В данной измерительной цепи есть первичный измерительный преобразователь (ПИП), выполненный в виде трех металлических дисков, параллельных друг другу и представляющих собой два плоских конденсатора, имеющих общую пластину. Устройство работает следующим образом. Перед началом работы следует с помощью блока управления сформировать импульсы управления коммутаторами, для того чтобы знать, во сколько раз частота следования импульсов, а также интервал времени ПИП секции ac , будет выше частоты следования импульсов и интервала времени секции bc . При появлении электрического поля с ПИП секции ac снимается напряжение, пропорциональное изменению напряженности за определенный интервал времени, а с ПИП секции bc – напряжение, пропорциональное изменению напряженности появившегося поля за интервал времени, который меньше интервала времени секции ac .

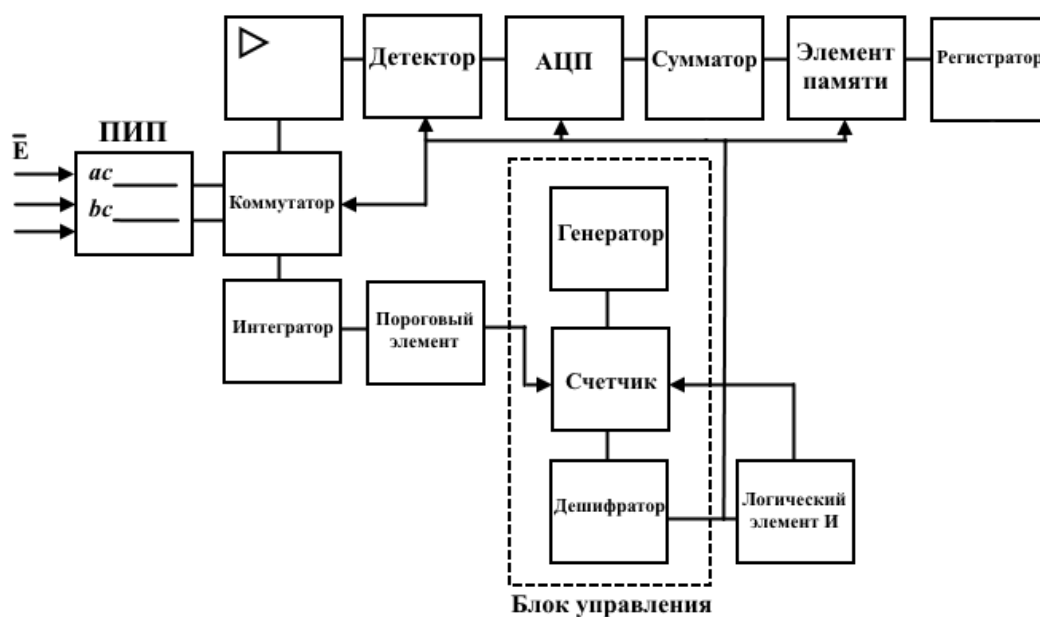


Рис. 3. Структурная схема измерительной цепи устройства

Уравнение преобразования:

$$E = \frac{U}{d},$$

где E – напряженность измеряемого электрического поля; U – напряжение секции ПИП; d – расстояние между обкладками конденсатора.

Измеритель напряженности состоит из ПИП (только секции ac), коммутатора, разрядного сопротивления, усилителя, пикового детектора, АЦП, сумматора, элемента памяти и регистрирующего блока. На разрядном сопротивлении формируются импульсы, которые несут информацию об изменении поля за время секции ac , после чего усиливаются и преобразуются в постоянное напряжение. Затем это напряжение с помощью АЦП преобразуется в цифровой код и поступает на сумматор, где суммируется с предыдущими значениями. Фиксация этой суммы производится с помощью регистрирующего блока. Блок управления, в свою очередь, обеспечивает последовательность работы каждого из элементов устройства. Также этот блок производит запоминание результата, а по окончании обработки производит сброс напряжения в нуль. Напряжение на выходе интегратора, которое пропорционально напряжению секции ac , каждый раз сравнивается с порогом элемента. А также для работы необходимо знать, что, чем меньше интервалы времени срабатывания коммутаторов, тем выше значение изменения напряженности ЭП [3].

Также были рассмотрены патенты на полезную модель других стран [4-6]. Эти конструкции объединяет простота метода, но сложность их структурных схем затрудняет их понимание и дальнейшее изучение, что является большим минусом.

В заключение хотим сказать, что данная тема очень обширна для изучения и невозможно изложить всю изученную литературу в одной статье. Также можно сказать, что на основании этой литературы можно спроектировать конструкцию по заданным нами критериям, и добиваться поставленной цели.

Библиографический список

1. Пат. 2445639 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля / Сушко Б. К., Исянчуринов И. И., Ямалетдинова К. Ш., Гоц С. С., Гимаев Р. Н., Фахретдинов И. Р., Сушко Г. Б. № 2010150127/28; заявл. 08.12.2008; опубл. 20.03.2012.
2. Пат. 2485528 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/00. Широкополосное устройство для измерения напряженности электрического поля / Гончаров В. П., Молочков В. Ф., Филатов М. М. № 2011153806/28; заявл. 28.12.2006; опубл. 20.06.2013.
3. Пат. 2071072 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрических полей / Зажирко В. Н., Крысов С. А., Полянин И. Г. № 4911235/09; заявл. 09.01.1991; опубл. 27.12.1996.
4. Пат. U 9026 Республика Беларусь, МПК G 01 R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля / Ковалевич В. В., Иващенко И. А., Воинов В. В. № U 9026; заявл. 18.07.2012; опубл. 28.02.2013.
5. Пат. EP 1 477 819 A1 Европа, МПК G 01 R 29/08. Method of measuring electromagnetic field intensity and device therefor / Kazama, Satoshi. № JP 201110344; заявл. 09.04.2002; опубл. 17.11.2004.
6. Пат. US 2011/0227559 A1 США, МПК G 01 R 31/00. Electric field measuring device/ Norikazu Miyazaki, Takeshi Sakai. № JP 2009/070000; заявл. 27.11.2009; опубл. 22.09.2011.
7. Ложников В. Я. Измерительные преобразователи: межвуз. сб. науч. трудов. Омск: ОмПИ, 1975. 177 с.
8. Бирюков С. В. Физические основы измерения параметров электрических полей: моногр. Омск: СибАДИ, 2008. 112 с.
9. Бирюков С. В. Измерение напряженности электрических полей в диэлектрических средах электроиндукционными датчиками. Методы и средства измерений: моногр. Омск: ОмГТУ, 2011. 196 с.

Е.С. Крошка, Т.А. Беляева¹, П.П. Бобров¹

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

¹Омский государственный педагогический университет, г. Омск, Россия

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ЗАМЕРЗАЮЩИХ ПОЧВ И ПОРОД

Аннотация. Комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) почв является важным параметром моделей, используемых в алгоритмах восстановления влажности почв с помощью космических микроволновых сенсоров и при подповерхностной радиолокации с помощью георадаров. В работе приведены результаты экспериментальных измерений КДП увлажняемых дистиллированной водой и солевым раствором почв и порошков кварцевых гранул при температурах от -15 до +25°C в частотном диапазоне от 10 кГц до 1–8 ГГц. Показано, что релаксационные процессы, существующие в породах с частичным насыщением при отсутствии перколяции, возникают и в замерзающих почвах и породах. Перколяция, имеющая место в образцах с большой влажностью при положительных температурах, исчезает при замерзании, когда удельная проводимость образцов уменьшается. Возникающий после исчезновения перколяции релаксационный процесс может приводить к резкому возрастанию действительной части КДП. Такое поведение КДП почв может приводить к сложностям при картировании границ промерзания дистанционными микроволновыми методами и при подповерхностной радиолокации.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая релаксация, промерзание почв, засоление почв.

Диэлектрические измерения проводились с помощью разработанного в ОмГПУ и запатентованного метода, позволяющего производить измерения одного и того же образца, помещенного в коаксиальную ячейку, в диапазоне частот от десятков герц до 8–20 ГГц [1]. Методика измерений описана в [2,3]. Исследованы два образца луговочерноземной почвы, взятых с разной глубины и различающихся содержанием гумуса и гранулометрическим составом. Характеристики образцов приведены в табл. 1. Гранулометрический состав почв определялся в двух разных сертифицированных лабораториях, в одной из которых использовался традиционный седиментационный метод (по Качинскому) и в другой – современный метод лазерной дифракции. Как видно, в исследуемых образцах от 36% до 56,6 % массы составляют частицы размерами менее 0,01 мм, оставшуюся часть массы составляют более крупные частицы (физический песок).

Кроме того, исследовался порошок сферических гранул плавленого кварца с размерами частиц от 0,9 до 1,8 мкм.

Таблица 1

Характеристики исследованных образцов почв

№	Глубина отбора образца, см	Содержание гумуса (%)	Массовая доля физической глины (частиц <0.01мм)		Массовая доля ила (частиц <0.001мм)	
			Седиментационный метод	Метод лазерной дифракции	Седиментационный метод	Метод лазерной дифракции
1	0-20	6,6	0,360	0,566	0,20	0,072
2	60-70	0,6	0,441	0,457	0,28	0,074

Почвы содержат четыре основных компонента: твердая фаза, свободная вода; вода, связанная на поверхности твердых частиц, и воздух. На частотах выше 1 ГГц КДП $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ почв моделируют различными формулами смесей (см., например [4]). На частотах ниже 1 ГГц в глинах и на частотах ниже 10 МГц в песчаных почвах на КДП влияют релаксационные процессы, возникающие в результате поляризации двойного слоя на границе раздела твердая

поверхность–жидкость [5]. Действительная часть КДП ε' песчаных почв, полностью насыщенных водой, остается практически неизменной в области частот от 1–2 ГГц до 1–10 МГц, а на низких частотах вследствие поляризации границы вода-минерал наблюдается резкое возрастание ε' .

Как показано в работе [6], при уменьшении влажности породы одновременно с уменьшением ε' на частотах около 1 ГГц наблюдается ее возрастание в диапазоне частот 0,1–100 МГц. Это возрастание мы объясняем накоплением зарядов на появляющейся границе раздела вода–воздух и возникновением соответствующего релаксационного процесса. Однако при высокой степени насыщенности водой или соевым раствором существующая высокая сквозная проводимость (перколяция) подавляет релаксационный процесс.

На рис. 1 приведены частотные зависимости ε' порошка кварцевых гранул при различных значениях влажности и зависимость удельной эквивалентной проводимости $\sigma_z = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''$ на частоте 15 кГц. Видно, что при объемной влажности, большей, чем $0,31 \text{ м}^3/\text{м}^3$, значения σ_z составляют 0,18–0,23 См/м и релаксационный процесс отсутствует. При уменьшении влажности перколяция исчезает (проводимость σ_z резко падает до значений порядка 0,01–0,03 См/м). Значения ε' на частоте около 1 ГГц, где релаксационные процессы не проявляются, уменьшаются, а в частотной области 1–100 МГц резко возрастают (на частоте 10 МГц от 32 до 107 ед.).

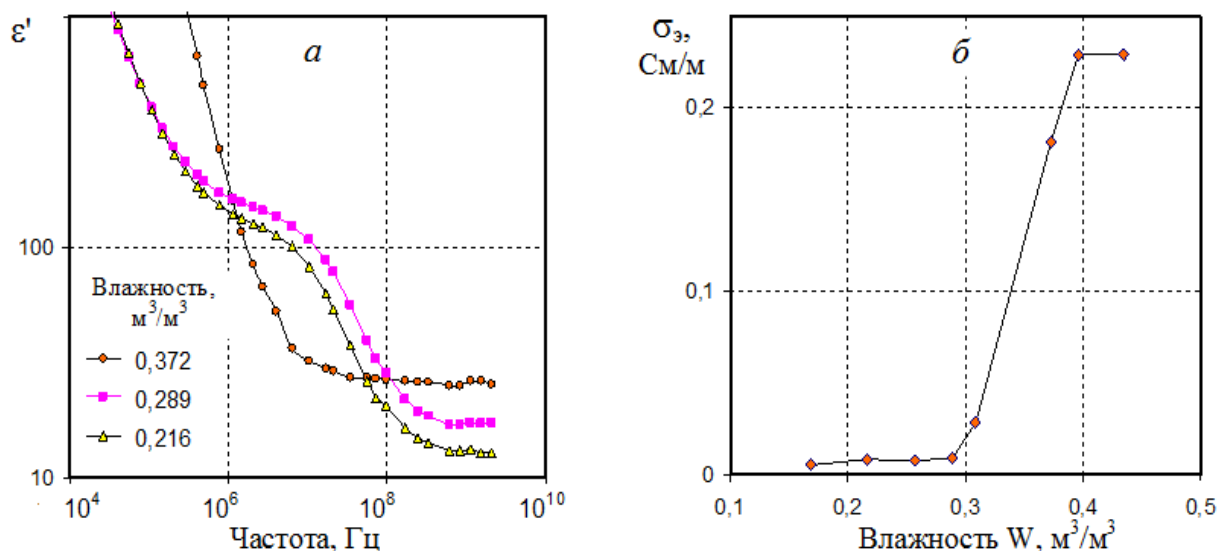


Рис. 1. Частотная зависимость действительной части КДП (а) и зависимость удельной эквивалентной проводимости на частоте 15 кГц от влажности (б). Образец – порошок кварцевых гранул, насыщаемый соевым раствором концентрацией 4 г/л. Температура 25°C

На рис. 2 показаны результаты измерения КДП порошка кварцевых гранул при двух значениях влажности и двух температурах – положительной и отрицательной. При большой влажности (объемная доля воды $W = 0,412$) все поры насыщены водой и релаксационный процесс отсутствует как при положительной, так и отрицательной температурах, несмотря на то, что при замерзании проводимость резко падает. Причина в том, что в образце нет воздуха и нет границы раздела вода–воздух. При меньшей влажности релаксационный процесс проявляется при температуре -15°C , при которой свободная вода превратилась в лед, о чем свидетельствуют одинаковые значения ε' при разных влажностях на частотах выше 100 МГц.

Релаксационный процесс, по-видимому, вызван поляризацией границы воздуха и связанной воды, которая в данном образце присутствует, хотя и в небольших количествах. Известно, что связанная вода не превращается в лед и при температурах до -40°C . В данном случае при температуре -15°C на частотах 10^5 – 10^7 Гц значения ε' в образце с меньшей влажностью выше, чем в образце с большей влажностью, но ниже, чем при $+25^\circ\text{C}$.

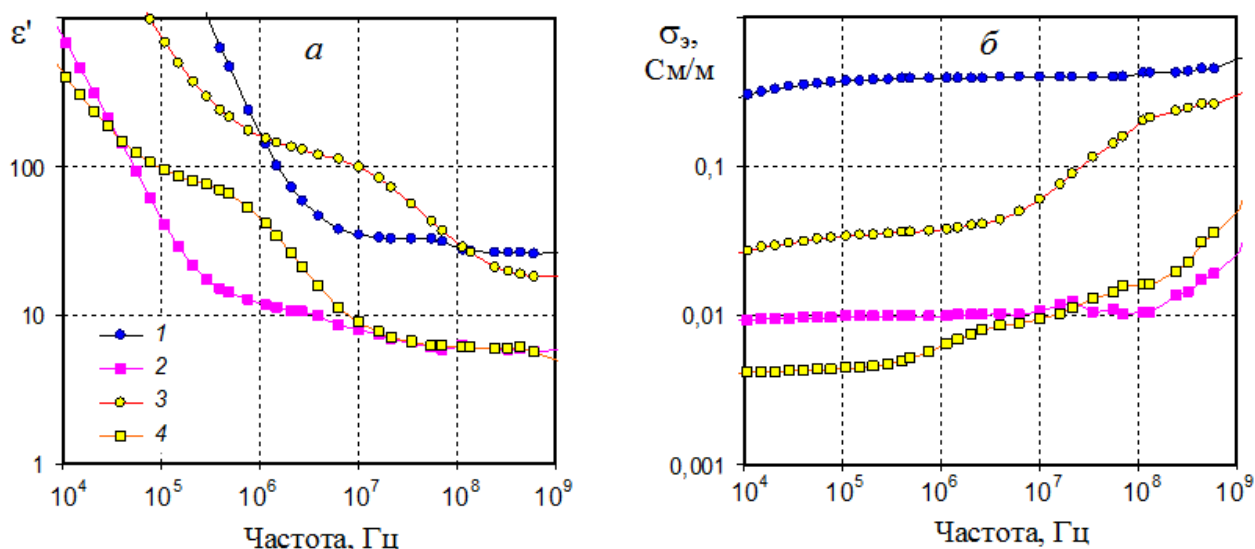


Рис. 2. Частотные зависимости действительной части КДП (*а*) и удельной эквивалентной проводимости (*б*). Образец – порошок кварцевых гранул, насыщаемый солевым раствором концентрацией 4 г/л. 1, 2 – $W = 0,412 \text{ м}^3/\text{м}^3$; 3, 4 – $W = 0,301 \text{ м}^3/\text{м}^3$;
1, 3 – температура $+25^\circ\text{C}$; 2, 4 – температура -15°C

На рис. 3 приведены частотные зависимости ε' и $\sigma_{\text{э}}$ в случае, когда при уменьшении температуры значения ε' при -1°C в диапазоне частот от 1,5 МГц до 100 МГц выше, чем при $+25^\circ\text{C}$ (на частоте 10 МГц более чем в 2 раза). Такой, на первый взгляд, невероятный результат объясняется возникновением релаксационного процесса при уменьшении проводимости образца. На частоте 10 МГц удельная эквивалентная проводимость при температуре -1°C в 5 раз меньше, чем при $+25^\circ\text{C}$ (см. рис. 3б). При температурах -5°C и -10°C свободная вода превращается в лед, о чем свидетельствует уменьшение значений ε' на частотах около 1 ГГц. Однако релаксационные процессы с меньшей интенсивностью существуют и при этих температурах (см. рис. 3а).

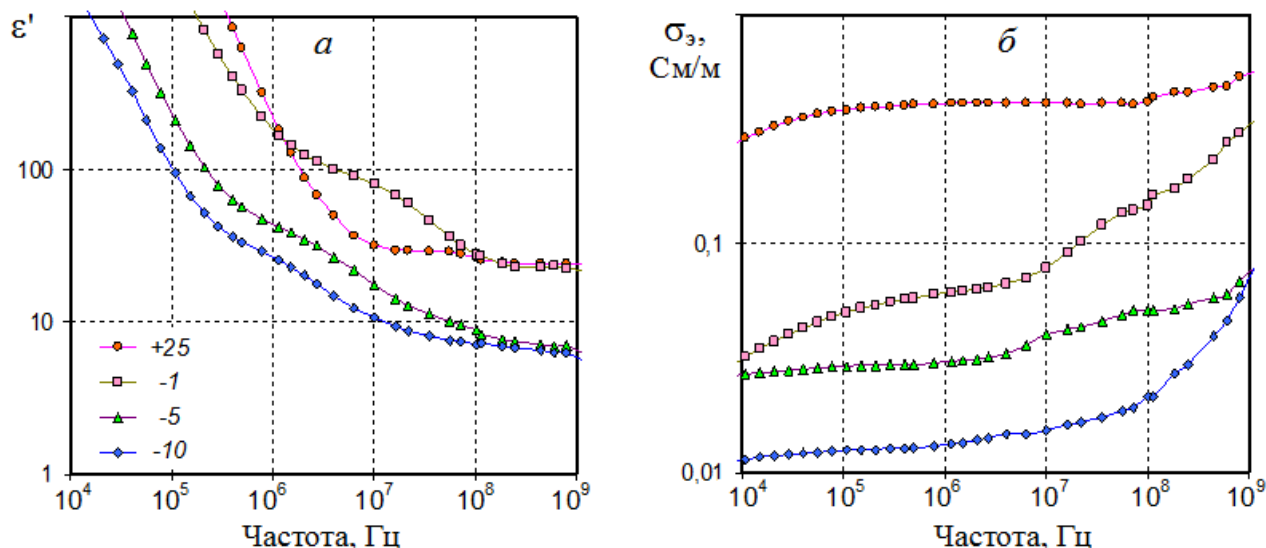


Рис. 3. Частотные зависимости действительной части КДП (*а*) и удельной эквивалентной проводимости (*б*) при разных температурах. Образец – порошок кварцевых гранул, насыщаемый солевым раствором концентрацией 4 г/л с объемной долей $0,345 \text{ м}^3/\text{м}^3$

Исследования релаксационных процессов в естественных почвах показали, что выражены они слабее. Причина этого в том, что почвы содержат значительную долю крупных частиц. Как следует из табл. 1, доля частиц с размерами, превышающими 1 мкм, по

разным данным составляет 72–93%. В работе [7] рассмотрено влияние размеров частиц порошков плавленного кварца и степени засоления на интенсивность релаксационных процессов. Показано, что при увеличении концентрации соли в насыщающем растворе и уменьшении размеров частиц релаксационный процесс смещается в область более высоких частот, а в порошках с размерами порядка 100 мкм релаксационные процессы практически не наблюдаются.

На рис. 4 приведены частотные зависимости ε' двух почвенных образцов при различных значениях влажности. При объемной доле воды $W = 0,4$ значения ε' обоих образцов практически совпадают. При меньших значениях влажности появляется граница раздела вода-воздух и возникают процессы диэлектрической релаксации, приводящие к возрастанию ε' . Из-за различий в значениях удельной поверхности твердых частиц эти процессы возникают на разных частотах.

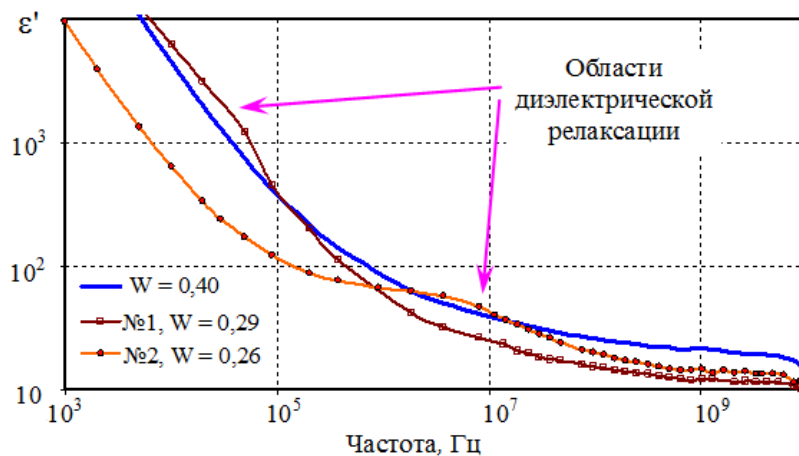


Рис. 4. Частотная зависимость действительной части КДП образцов почв №№ 1 и 2 при разных значениях объемной доли дистиллированной воды W . Температура 25°C

На рис. 5 показано, что слабые релаксационные процессы в замерзающей почве могут существовать даже при полном ее насыщении дистиллированной водой. Здесь приведены частотные зависимости КДП образца №1 (табл. 1). При температурах +25°C и -1°C проводимость высокая и релаксационные процессы отсутствуют. При уменьшении температуры до -5°C и -10°C проводимость резко уменьшается (свободная вода замерзает) и в диапазоне частот 10^5 – 10^7 Гц возникают слабые релаксационные процессы.

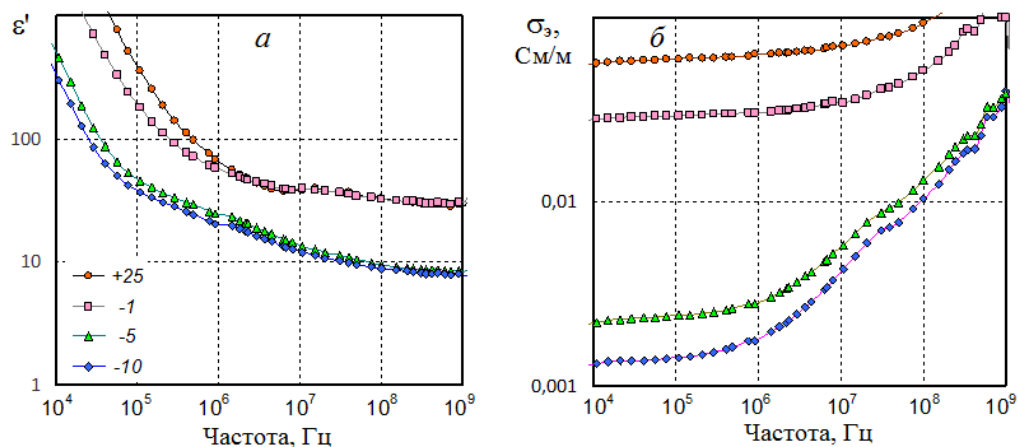


Рис. 5. Частотные зависимости действительной части КДП (а) и удельной эквивалентной проводимости (б) почвы №1 при разных температурах. Образец насыщен дистиллированной водой, $W = 0,496 \text{ м}^3/\text{м}^3$

Причиной этого, по-видимому, является наличие малой доли заземленного воздуха и существование границы связанная вода–воздух.

Аналогичные исследования, проведенные с такой же, но засоленной почвой (1% соли NaCl от массы сухого образца), показывают, что наличие соли приводит к смещению точки замерзания свободной воды вниз по температуре, уменьшению интенсивности процесса релаксации и к его смещению в область более высоких частот.

Таким образом, в результате проведенных исследований выяснено, что при уменьшении температуры в засоленных мелкозернистых кварцевых песках и почвах при определенных условиях могут возникать релаксационные процессы, сопровождающиеся резким возрастанием действительной части КДП и резким уменьшением проводимости. Следовательно, в области частот, где проявляется влияние этого процесса, резко уменьшается затухание электромагнитных волн и увеличивается максимальная глубина зондирования георадарами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки (проект 5.9513.2017/БЧ).

Библиографический список

1. Пат. 2474830 Российская Федерация, МПК G01R27/26. Способ измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидких и сыпучих веществ в широком частотном диапазоне / Бобров П. П., Репин А. В., Кондратьева О. В. № 2011134175/28; заявл. 12.08.2011; опубл. 10.02.2013, Бюл. № 4.
2. Бобров П. П., Кондратьева О. В., Репин А. В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц // Известия Вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 23–26.
3. Bobrov P. P., Repin A.V., Rodionova O.V. Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Properties Measurements // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015. Vol. 53, № 5. P. 2366–2372.
4. Mironov V. L., Dobson M. C., Kaupp V. H. [et al.] Generalized Refractive Mixing Dielectric Model for Moist Soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2004. Vol. 42, № 4. P. 773–785.
5. Chelidze T. L., Gueguen Y. Electrical spectroscopy of porous rocks: a review – I.Theoretical models // Geophysical Journal International. 1999. Vol. 137, no.1. P. 1–15.
6. Bobrov P. P., Lapina A. S., Repin A. V. Effect of the rock/water/air interaction on the complex dielectric permittivity and electromagnetic waves attenuation in water-saturated sandstones // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Proceedings. Prague, July 6-9. 2015. С. 1877–1879.
7. Lapina A.S., Bobrov P.P., Golikov N.A. [et al.] Hysteresis of the NMR response and the complex relative permittivity of the quartz granules powders and solid sandstones during the water imbibition and drainage // Measurement Science and Technologies. 2017. V. 28, № 1. 014007.

В.Л. Литневский, Г.И. Косенко¹, Ф.А. Иванюк², С.И. Мазур³

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

¹Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

²Институт ядерных исследований, г. Киев, Украина

³Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ЗАВИСИМОСТЬ СЕЧЕНИЙ КАСАНИЯ СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ЯДЕР ОТ ВЫБОРА КРИТЕРИЯ КАСАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РЕАКЦИИ СЛИЯНИЯ ЯДЕР ^{36}S , ^{48}Ca , ^{48}Ti , ^{64}Ni С ЯДРОМ ^{238}U)

Аннотация. Для описания реакций слияния–деления авторами разработана модель, содержащая две стадии расчета. На первой стадии моделируется процесс сближения сталкивающихся ионов. При этом учитываются их деформации и взаимная ориентация в пространстве. Первая стадия расчета позволяет получить сечения касания сталкивающихся ядер, а также начальные характеристики моносистемы, образующейся в точке касания, а именно, распределения событий касания по угловому моменту системы, ее внутренней и потенциальной энергиям. На второй стадии производится расчет эволюции формы моносистемы.

В работе обсуждается выбор критерия определения точки касания: точки, в которой происходит переход от первой стадии расчета ко второй. Показано, что выбор положения точки касания может оказывать существенное влияние на значение сечений касания.

Ключевые слова: процесс слияния–деления, уравнения Ланжевена, сечение касания, сечение захвата, сверхтяжелые элементы.

Введение. Одним из актуальных направлений исследований в современной ядерной физике является синтез и дальнейшее изучение свойств сверхтяжелых элементов (СТЭ). Для синтеза СТЭ применяются реакции с участием тяжелых ионов. На стадии планирования эксперимента исследователь должен определиться с тем, какая реакция будет использована для получения того или иного изотопа СТЭ, а также при какой энергии будет протекать выбранная реакция. Соответственно, перед теоретическими моделями стоит задача точного предсказания значения сечений захвата, слияния и образования остатков испарения для различных реакций, а также описания зависимости этих сечений от энергии сталкивающихся ядер. Первая величина, получаемая при моделировании процесса слияния–деления тяжелых ионов, которую можно сравнить с результатами эксперимента, это сечение касания исходных ядер. Ее можно сравнивать с сечением захвата. В значение сечения захвата дают вклад те столкновения ядер, которые приводят либо к образованию компаунд-ядра, т.е. к слиянию исходных ядер, либо к квазиделению системы, образовавшейся после касания исходных ядер [1]. Реакции глубоко-неупругой передачи вклада в данное сечение не дают. К сожалению, в ходе моделирования процесса слияния–деления нельзя в точности сказать, насколько должны сблизиться исходные ядра, чтобы в ходе дальнейшей эволюции система подвергалась только слиянию и квазиделению. Таким образом, при написании модели остается некоторая свобода выбора положения момента окончания расчета процесса сближения ионов (выбора точки касания).

Целью настоящей работы является выяснение влияния выбора критерия касания на значение получаемых в ходе моделирования сечений касания. Исследование проводится на примере реакций $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{274-x}\text{Hs} + xn$, $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{286-x}\text{Fl} + xn$, $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{302-x}\text{120} + xn$. Результаты моделирования сопоставляются с экспериментальными значениями, полученными в работе [2].

Модель и обсуждение. Форма системы, состоящей из двух приближающихся друг к другу ядер (первая стадия расчета) описывается с помощью набора четырех параметров (рис. 1). Изменение параметров формы системы q_i соответствующих им импульсов p_i описывается с помощью уравнений Ланжевена (УЛ) [3]:

$$\begin{aligned}\dot{q}_\beta &= \mu_{\beta\nu} p_\nu, \\ \dot{p}_\beta &= -\frac{1}{2} p_\nu p_\eta \frac{\partial \mu_{\eta\nu}}{\partial q_\beta} - \frac{\partial F}{\partial q_\beta} - \gamma_{\beta\nu} \mu_{\nu\eta} p_\eta + \theta_{\beta\nu} \xi_\nu.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь подразумевается суммирование по повторяющимся индексам ν и η , $\gamma_{\beta\eta}$ – фрикционный тензор системы, $\mu_{\beta\eta}$ – тензор, обратный тензору инерции $m_{\beta\eta}$, $F = V_{\text{pot}} - aT^2$ – свободная энергия Гельмгольца. Здесь V_{pot} – потенциальная энергия системы, рассчитанная с учетом ядерной оболочечной структуры [4], T – температура, определяемая из модели ферми-газа: $T = (a E_{\text{dis}})^{1/2}$, a – параметр плотности уровней [5], E_{dis} – внутренняя энергия системы. Случайная сила $\theta_{\beta\nu} \xi_\nu$ описывает флуктуации в системе.

Наличие в (1) случайной силы позволяет производить вероятностное описание процесса слияния-деления. То есть при одних и тех же начальных данных в точке касания мы получаем распределения параметров системы.

На каждом шаге интегрирования необходимо соблюдение закона сохранения энергии, в соответствии с которым сумма кинетической $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} p_\nu p_\eta \mu_{\eta\nu}$, потенциальной V_{pot} и внутренней E_{dis} энергий системы должна равняться начальной энергии сталкивающихся ядер, заданной в системе центра масс, E_{cm} .

Следует заметить, что энергия сталкивающихся ядер E_{cm} связана с энергией возбуждения образовавшейся после касания исходных ядер системы

$$U^* = E_{\text{cm}} - Q, \quad (2)$$

где Q – энергия, выделяющаяся (поглощающаяся) при протекании ядерной реакции. В настоящей работе для удобства сравнения сечений касания, слияния и образования остатков испарения результаты приведены с использованием U^* .

При описании процесса столкновения исходных ядер учитываются четыре параметра формы системы (рис. 1): по одному параметру описывают квадрупольную деформацию каждого из ядер [3], один параметр описывает взаимную ориентацию сталкивающихся ядер, четвертый параметр описывает расстояние между центрами масс ядер. Значения этих параметров определяют энергию кулоновского [6] и ядерного [7] взаимодействий сталкивающихся ядер. Подробное описание первой стадии модели приводится в работе [3].

Учет произвольной пространственной ориентации ядра мишени приводит к тому, что высоты кулоновских барьеров, соответствующих разным конфигурациям системы, могут отличаться на 10 ÷ 15 МэВ (рис. 2). Такой широкий диапазон высот кулоновских барьеров делает актуальным учет эффекта туннелирования при любых начальных энергиях сталкивающихся ядер.

Расчет вероятности туннелирования производится в том случае, если система перестает двигаться вдоль координаты r , описывающей расстояние между центрами масс сталкивающихся ядер (упирается в потенциальный барьер). В этот момент (в точке поворота) мы фиксируем значения всех параметров формы системы. Проницаемость барьера оценивается в ВКБ приближении [8]:

$$T_L(E) = \left[1 + \exp \left(\frac{2}{\hbar} \int_{r_2}^{r_1} \sqrt{2m(V_{\text{pot}} - E)} dr \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где интегрирование производится между точками поворота r_1 и r_2 в подбарьерной области, а $E = V_{\text{pot}}(r_1) = V_{\text{pot}}(r_2)$. В наших расчетах предполагается, что туннелирование происходит только вдоль координаты r , все остальные характеристики системы (формы ядер и их относительная ориентация) замораживаются.

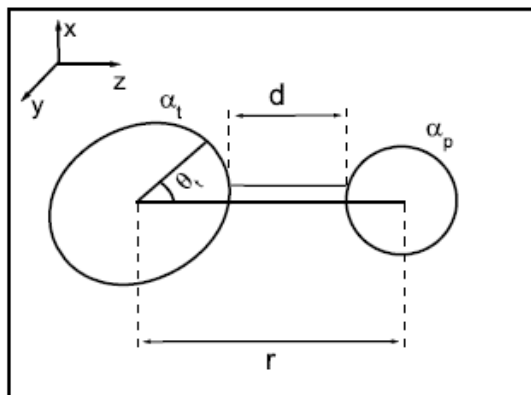


Рис. 1. Схематический вид системы, эволюция которой описывается на первой стадии расчета. Параметры α_t и α_p описывают деформации ядра мишени и ядра снаряда, соответственно [9]. Расстояние между центрами масс ядер описывается параметром r , θ_t – угол между осью, соединяющей центры масс ядер, и осью симметрии деформированного в основном состоянии ядра мишени. Величина d не является независимым параметром, она описывает расстояние между поверхностями сталкивающихся ядер

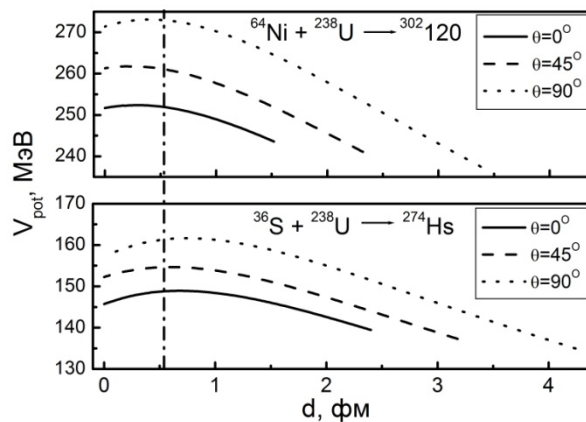


Рис. 2. Зависимость потенциальной энергии системы двух сталкивающихся ядер от расстояния между их поверхностями. Расчеты проведены для различных ориентаций θ_t ядра ^{238}U . Вертикальная штрих-пунктирная прямая, проведенная для значения $d = 0.54$ фм, показывает положение точки касания, определенной по критериям, используемым в работах [3]

В работе [3] интегрирование уравнений Ланжевена (1) происходило до тех пор, пока расстояние между поверхностями сталкивающихся ядер d (см. рис. 1) не стало равным значению параметра диффузности ядерной поверхности, используемого для расчетов потенциала ядерного взаимодействия [7] ($d = 0.54$ фм), в этом случае говорилось, что ядра достигли точки касания. Из анализа зависимости потенциальной энергии сталкивающихся ядер от расстояния между их поверхностями (рис. 2) видно, что для некоторых реакций при некоторых ориентациях ядер точка касания ($d = 0.54$ фм) может находиться перед кулоновским барьером. Следовательно, применение данного критерия может приводить к некоторым неточностям определения сечений касания и прочих характеристик системы, получаемых при расчете процесса столкновения ядер.

На рис. 3 приведены результаты расчетов процесса столкновения с использованием альтернативных критериев определения точки касания: $d = 0.04$, что практически соответствует геометрическому касанию ядерных поверхностей, и $d = d_{\text{barrier}}$, что соответствует остановке расчета в момент, когда система пересекает кулоновский барьер. Хорошо видно, что для приведенных критериев определения точки касания сечения касания могут отличаться друг от друга в 2–3 раза. Причем критерий, используемый в работе [3], дает близкие к верхней границе (с критерием $d = d_{\text{barrier}}$) значения сечений касания. Для реакций $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{286-x}\text{Fl} + xn$, $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{302-x}\text{120} + xn$ значения сечений с критерием $d = 0.54$ превышают верхнюю границу. Это означает, что касание происходит до достижения системой кулоновского барьера.

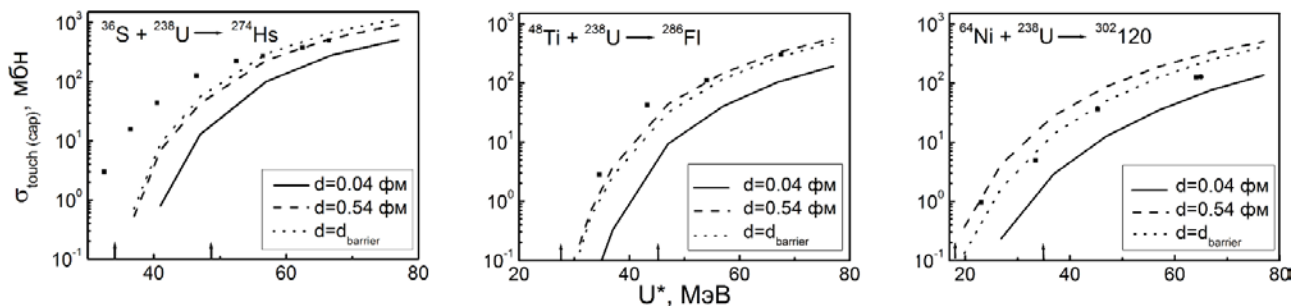


Рис. 3. Зависимости сечений касания, полученные с разными критериями касания, и экспериментальные данные по сечениям захвата в соответствующих реакциях

Закключение. В работе получены значения сечений касания для разных критериев определения точки касания. Учет того факта, что точка касания не может находиться перед кулоновским барьером, позволил улучшить согласие расчета реакции $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{302-x}120 + x\text{n}$ с экспериментальными данными. Следует заметить, что существенная зависимость в 2–3 раза при средних и высоких энергиях и в 20 раз при очень низких энергиях сечений касания от выбранного критерия касания приводит к необходимости дополнительного исследования данной проблемы с целью выработки единого критерия определения положения точки касания.

Библиографический список

1. Toke J. [et al.] Quasi-Fission - the mass-drift mode in heavy-ion reactions // Nucl. Phys. A. 1985. Vol. 440. P. 327–365.
2. Kozulin E. M. [et al.] Fission and quasifission of composite systems with $Z=108-120$: Transition from heavy-ion reactions involving S and Ca to Ti and Ni ions // Phys. Rev. C. 2016. Vol. 94. P. 054613.
3. Litnevsky V. L., Kosenko G. I., Ivanyuk F. A., Pashkevich V. V. Description of synthesis of super-heavy elements within the multidimensional stochastic model // Phys. Rev. C. 2014. Vol. 89. P. 034626.
4. Strutinsky V. M. Shell effects in nuclear masses and deformation energy // Nucl. Phys. A. 1967. Vol. 95. P. 420–442.
5. Iljinov A. S. [et al.] Phenomenological statistical analysis of level densities, decay widths and lifetimes of excited nuclei // Nucl. Phys. A. 1992. Vol. 543. P. 517–554.
6. Курманов Р.С., Косенко Г.И. Новый подход к расчету потенциальной энергии сталкивающихся ядер // ЯФ 2014. Т. 77. С. 1514–1525.
7. Gross D. H. E., Kalinowski H. Friction model of heavy-ion collision // Phys. Rev. 1978. Vol. 45. P. 175–210.
8. Nevzorova T. I., Kosenko G. I. Dynamical calculations of the cross section for heavy-ion fusion with allowance for tunneling // Physics of Atomic Nuclei. 2008. Vol. 71, P. 1373–1383.
9. Pashkevich V. V. On the asymmetric deformation of fissioning nuclei // Nucl. Phys. A. 1971. Vol. 169. P. 275–293.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В СПИНОВЫХ СИСТЕМАХ МЕТОДОМ ВАНГА-ЛАНДАУ

Аннотация. Метод Ванга-Ландау приобретает актуальность и активно применяется для исследования фазовых переходов в сложных спиновых системах, спиновых стеклах, в химии для исследования сворачивания белка. Данный метод представляет интерес, в первую очередь, вследствие того, что он позволяет преодолеть эффект критического замедления, который возникает вблизи температуры фазового перехода и существенно увеличивает время моделирования традиционными методами Монте-Карло. Алгоритм Ванга-Ландау позволяет путем единичного моделирования получить плотность энергетических состояний, из которых возможно вычислить термодинамические величины, включая свободную энергию и энтропию. Но для данного алгоритма на больших решетках наблюдается расходимость плотности энергетических состояний, что осложняет исследование больших спиновых систем. Целью исследования является реализация параллельной версии данного алгоритма применительно к большому количеству энергетических состояний системы. Для этого с помощью библиотеки OpenMP реализована параллельная версия алгоритма Ванга-Ландау для систем с общей памятью. Получены результаты для многопоточной версии алгоритма, которые коррелируют с результатами, полученными для однопоточного алгоритма. Из вышесказанного следует вывод, что параллельная версия может быть применена к исследованию больших спиновых систем.

Ключевые слова: алгоритм Ванга-Ландау, методы Монте-Карло, параллельное программирование, энтропическое моделирование.

Алгоритм Ванга-Ландау представляет собой метод компьютерного моделирования, который основан на предположении, что, совершая случайное блуждание в пространстве энергии с вероятностью перехода, пропорциональной $1/G[E]$, можно получить гистограмму посещений энергетических уровней, близкую к плоской. Данный метод позволяет, единожды вычислив плотность энергетических состояний системы, получить такие термодинамические величины как внутренняя энергия, теплоемкость, свободная энергия, энтропия [1]. Последние две величины не вычислимы традиционными методами Монте-Карло. Также, для данного метода существуют методики вычисления намагниченности и, следовательно, восприимчивости, что позволяет использовать данный метод компьютерного моделирования в качестве альтернативы методам Монте-Карло, особенно учитывая тот факт, что влияние эффекта критического замедления для него нивелировано и есть возможность исследования низкотемпературной области.

Существует ограничение, которое связано с расходимостью (гистограмма посещений никогда не становится плоской) данного метода для решеток больших размеров, что приводит к сложностям в моделировании трехмерных систем и больших двумерных решеток, которые связаны с большим или неопределенным временем моделирования [2]. Преодолеть данное ограничение возможно при помощи параллелизации алгоритма путем деления общего энергетического интервала на пересекающиеся подчасти, каждая из которых будет обрабатываться отдельной репликой алгоритма (рис. 1). Между данными репликами будет происходить обмен для соблюдения принципа детального баланса. Суть параллельного алгоритма состоит в уменьшении размера обрабатываемого энергетического пространства, что должно привести к лучшей сходимости для каждой отдельной реплики, и, следовательно, при увеличении количества потоков, которые работают с каждым

энергетическим интервалом по отдельности, будет наблюдаться все лучшая сходимость и меньшее время моделирование больших систем.

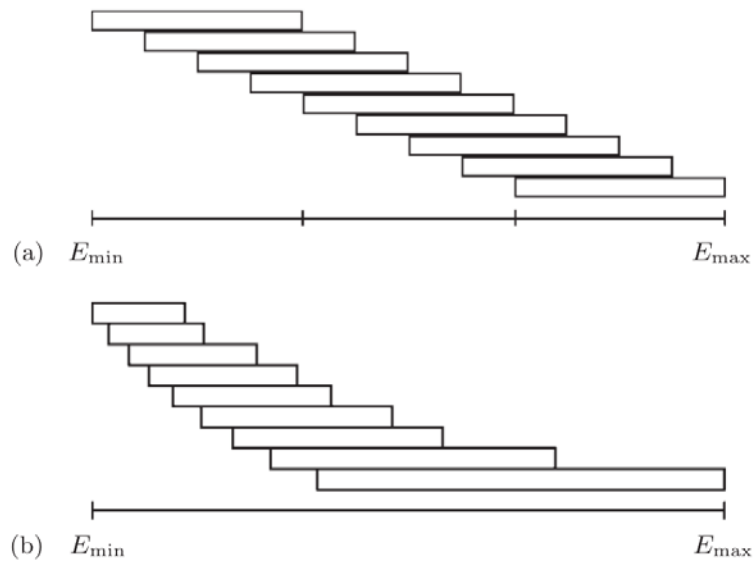


Рис. 1. Варианты разбиения общего энергетического интервала на пересекающиеся подчасти
а) разбиение общего интервала на равные подчасти; б) разбиение общего интервала на подчасти с различным коэффициентом перекрытия с динамической балансировкой для улучшения сходимости реплик алгоритма

В работе рассмотрена применимость параллельной версии алгоритма к исследованию критических свойств двумерной и трехмерной моделей Изинга. Для данной модели существует только фазовый переход второго рода, который будет определяться пиком теплоемкости.

В классическом алгоритме Ванга-Ландау совершается случайное блуждание в интервале энергии $[E_{\min}, E_{\max}]$, принимая вероятность перехода как

$$P = \min \{ 1, G[E_{\text{old}}]/G[E_{\text{new}}] \},$$

где E_{old} – текущее энергетическое состояние, E_{new} – принимаемое с указанной вероятностью. Принятие новой конфигурации увеличивает гистограмму посещения данного энергетического уровня на единицу, увеличивает значение плотности энергетических состояний по следующему соотношению $G[E] = G[E] * f$, где f – множитель, равный экспоненте в начале вычислений, и изменяющийся на каждой итерации алгоритма по следующему рекуррентному соотношению $f = f^{(1/2)}$. Если гистограмма посещений становится существенно плоской, то множитель изменяется по вышеуказанному соотношению. Вычисления продолжаются, пока f не достигнет некоторого $f_{\min}$, которое принимается равным значению, близкому к единице. Отличие параллельной версии данного алгоритма от последовательной заключается в том, что общий энергетический интервал разбивается на перекрывающиеся подчасти с уровнем перекрытия около 75%. Полученные энергетические зоны обрабатываются отдельными репликами алгоритма. После определенного количества шагов Монте-Карло происходит обмен энергетическими состояниями между репликами внутри всего пересекающегося интервала с вероятностью $1/2$. Кроме того, для сохранения принципа детального баланса между репликами на каждой итерации происходит обмен с вероятностью

$$P = \min \{ 1, (G_i[E(X)] * G_j[E(Y)]) / (G_i[E(Y)] * G_j[E(X)]) \} [1].$$

Если попадаем в вероятность, то производится инкремент значений плотностей энергетических состояний и гистограмм для данных энергетических состояний. Когда все независимые реализации будут иметь плоские гистограммы, производится усреднение и перераспределение плотностей энергетических состояний для всех реплик. На каждой итерации алгоритма полученные гистограммы должны обнуляться.

Данный метод был реализован с использованием технологии OpenMP для систем с общей памятью, но есть возможность реализации с использованием MPI для распределенных систем [3]. Также для упрощения машинного счета реализован так называемый энтропический алгоритм, где используется не плотность энергетических состояний, а ее логарифм.

С помощью данного метода для двумерной модели Изинга получены результаты, которые согласуются с результатами, полученными при использовании последовательного алгоритма. Это можно видеть на примере плотности энергетических состояний, которая является основной вычисляемой величиной. Из нее можно получить остальные термодинамические величины (рис. 2).

На рис. 2 видно, что отклонение полученных результатов от последовательной версии алгоритма минимально, но в то же время наблюдается накопление систематической ошибки с увеличением числа потоков.

Данный алгоритм может быть успешно применен к трехмерной модели Изинга (рис. 3).

График теплоемкости трехмерной модели показывает, что для параллельной версии получаемая теплоемкость имеет пик в точке фазового перехода второго рода и согласуется с данными, полученными другими методами, такими как алгоритм Метрополиса, кластерные алгоритмы Вольфа и Свендсена-Ванга [3].

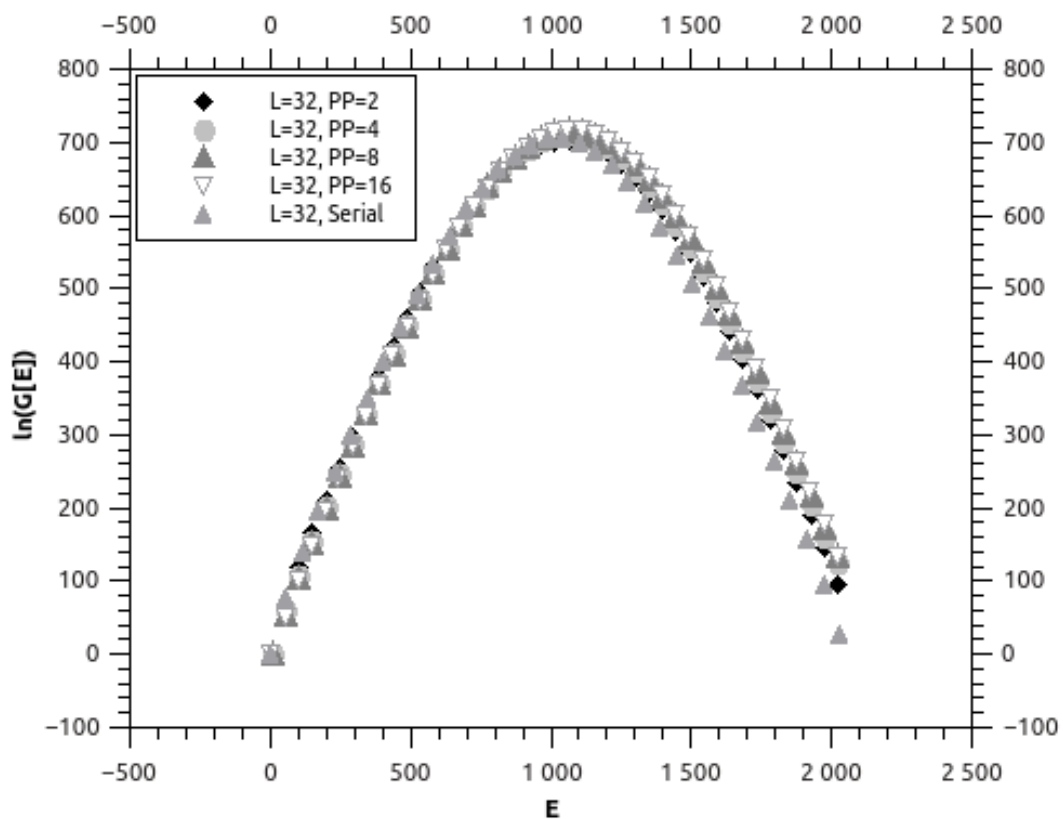


Рис. 2. Плотность энергетических состояний, полученная для двумерной модели Изинга с размером решетки $L=32$ при распределении на разное количество потоков $PP=2,4,8,16$ в сравнении с последовательной версией

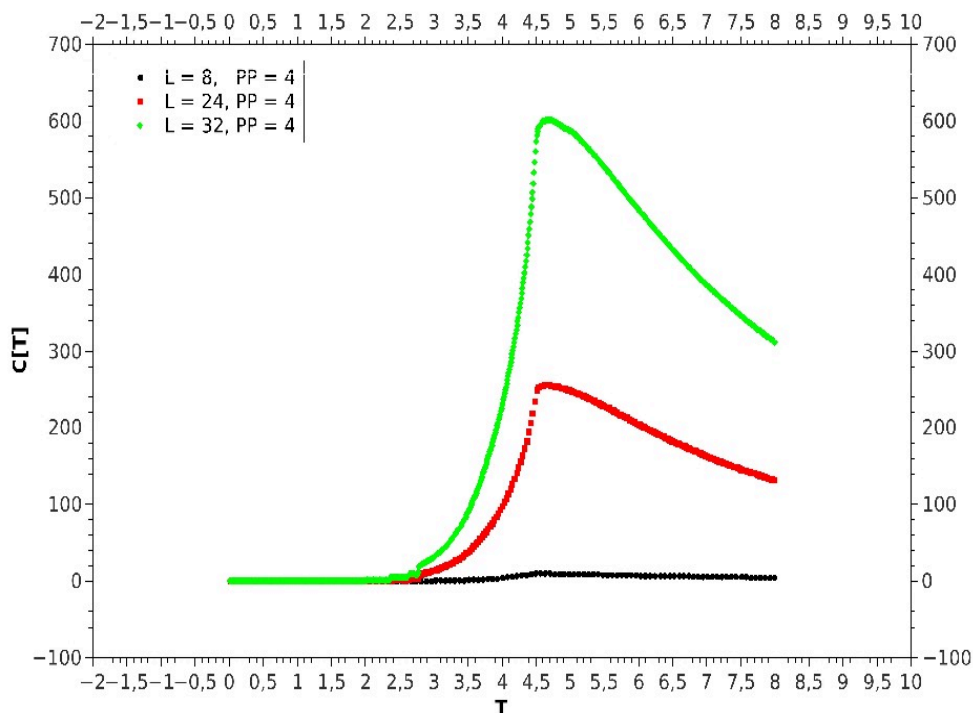


Рис. 3. График теплоемкости для трехмерной модели Изинга, полученный алгоритмом Ванга-Ландау для решеток размера $L = 8, 24, 32$ при разделении энергетического интервала на 4 подчасти

Библиографический список

1. Wang.F., Landau D.P., Efficient, Multiple-Range Random Walk Algorithm to Calculate the Density of States // Phys. Rev. Lett. 2001 V. 86, P. 2050.
2. Vogel T., Li Y.W., Wust T., Landau D.P., Generic, Hierarchical Framework for Massively Parallel Wang-Landau Sampling // Phys. Rev. Letters. 2013, P.5.
3. Wolf U. Collective Monte Carlo Updating for Spin Systems. // Phys. Rev. Lett. 1989 V. 62. P. 361.

УДК 539.172.17

С.И. Мазур, Р.С. Курманов¹, В.Л. Литневский¹, Г.И. Косенко²

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

²Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ЯДЕР НА ВЕРОЯТНОСТЬ КАСАНИЯ

Аннотация. Для дальнейшего продвижения в синтезе новых элементов знание энергии взаимодействия ядер при столкновении играет все возрастающую роль ввиду малой вероятности событий. Важен учет различных факторов. Нами рассчитана потенциальная энергия взаимодействия сталкивающихся ядер, с учетом их произвольной ориентации. Показано, что в зависимости от ориентации меняется не только высота, но и положение

барьера. Учет вращения ядер относительно оси, соединяющей их центры масс, приводит к еще большему разбросу в значениях потенциальной энергии. Все это говорит в пользу динамического рассмотрения процесса слияния ядер с учетом большого числа степеней свободы.

Ключевые слова: синтез новых элементов, слияние ядер, энергия взаимодействия ядер.

Вероятность касания ядер определяется во многом потенциалом взаимодействия. Поэтому вычисление энергии взаимодействия двух сталкивающихся ядер является важной задачей в теории столкновений тяжелых ионов. В работе [1] было показано, что ориентации деформированных ядер «нос в нос» и «бок в бок» приводят к различным величинам потенциального барьера во входном канале. В этом случае оси симметрии ядер лежат в одной плоскости. Представляется интересным более детально изучить влияние ориентации ядер на величину их энергии взаимодействия. Для этого необходимо учесть произвольные ориентации сталкивающихся ядер, в том числе рассмотреть случай, когда их оси симметрии не лежат в одной плоскости.

Форму ядер будем описывать, используя полином Лежандра второго порядка

$$R = R_0 \lambda (1 + \alpha_2 P_2(x)).$$

Здесь R_0 – радиус равновеликой сферы, параметры α_{2p}, α_{2t} задают деформацию ядер, λ – нормировочный коэффициент, обеспечивающий сохранение объема ядра при деформации. Используемая геометрия задачи представлена на рисунке 1. Будем обозначать $s = |O_1 O_2|$ – расстояние между центрами масс ядер. Углы ϑ_1, ϑ_2 – задают ориентацию осей ядер относительно оси OZ, проходящей через их центры масс. Ориентации «нос в нос» соответствуют углы, равные нулю, «бок в бок» – $\pi/2$. Угол φ_2 задаёт поворот плоскости $X_2 O_2 Z_2$ относительно плоскости XOZ.

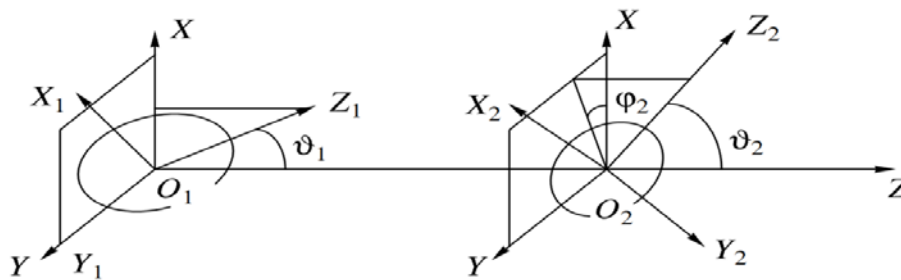


Рис.1. XYZ – система координат, в которой задается положение ядер. Центры масс ядер лежат на оси OZ. $X_1 Y_1 Z_1$ и $X_2 Y_2 Z_2$ – внутренние системы координат ядер. Предполагается аксиальная симметрия ядер относительно внутренних осей OZ

Таким образом, энергия взаимодействия ядер зависит от указанных четырех параметров и двух деформаций ядер α_{2p}, α_{2t} . Энергия взаимодействия ядер складывается из двух частей – кулоновской и ядерной:

$$E_{tot}(s, \alpha_{2p}, \alpha_{2t}, \vartheta_1, \vartheta_2, \varphi_2) = E_n(s, \alpha_{2p}, \alpha_{2t}, \vartheta_1, \vartheta_2, \varphi_2) + E_{Coul}(s, \alpha_{2p}, \alpha_{2t}, \vartheta_1, \vartheta_2, \varphi_2).$$

Вычисление кулоновского потенциала двух взаимодействующих ядер проведем в модели двойного фолдинга с вудс-саксоновскими зарядовыми плотностями [2]:

$$E_{Coul}(s, \alpha_{2p}, \alpha_{2t}, \vartheta_1, \vartheta_2, \varphi_2) = \int \frac{\rho(\vec{r}_1)\rho(\vec{r}_2)dV_1dV_2}{|\vec{s} + \vec{r}_2 - \vec{r}_1|}.$$

Здесь $\vec{r}_1$ пробегает по области распределения заряда первого ядра, $\vec{r}_2$ пробегает по области распределения заряда второго ядра.

Для ядерной части взаимодействия возьмем модель однократного симметричного фолдинг-потенциала Гросса и Калиновски [3]:

$$E_n(s, \alpha_{2p}, \alpha_{2t}, \vartheta_1, \vartheta_2, \varphi_2) = \frac{1}{2} \left(\int \rho(\vec{r}_1)U_2(\vec{r}_2)dV_2 + \int \rho(\vec{r}_2)U_1(\vec{r}_1)dV_1 \right)$$

Здесь векторы связаны следующим образом: $\vec{r}_1 = \vec{s} + \vec{r}_2$, а свертка проводится по плотности одного ядра $\rho(r)$ с нуклон-ядерным потенциалом $U(r)$ другого ядра. Область интегрирования определяется распределением плотности первого либо второго ядра. Поэтому нуклон-ядерный потенциал одного ядра берется в точке, задаваемой плотностью другого ядра. Все выражение симметризовано по обоим ядрам.

На рисунке 2 представлено несколько кривых, отвечающих потенциальной энергии сталкивающихся ядер для различных ориентаций. Деформации ядер взяты одинаковыми $\alpha_2=0,3$ для обоих ядер. Хорошо видна зависимость потенциала от ориентации ядер. При ориентации «нос в нос» потенциальный барьер имеет самое маленькое значение. При ориентации «бок в бок» – самое большое. Ориентации «нос в бок» занимают промежуточное значение. Заметим, что графики для разных ориентаций пересекаются между собой. Для некоторых таких точек приведены формы сталкивающихся ядер. Точка пересечения для самого маленького значения s отвечает ориентации «бок в бок» и «бок в нос», причем боком повернуто тяжелое ядро. Величина ядерного взаимодействия для первой ориентации меньше, чем для второй, поверхности ядер дальше друг от друга. Но и кулоновское взаимодействие в этом случае меньше. А так как кулоновское и ядерное взаимодействия учитываются с разными знаками, то суммарная энергия получается одинаковой. Аналогичные ситуации и в других точках пересечения. Полная энергия взаимодействия может быть одинаковой при разных ориентациях ядер.

Очевидно, что контакт между ядрами будет достигаться для больших значений s при ориентации «нос в нос». Высота барьера здесь наименьшая. И кажется, что такая ориентация предпочтительна для образования составного ядра, т.е. слияния двух ядер в одно. Но обратим внимание на нижнюю панель рис. Там представлена зависимость квадрата производной ядерной части потенциала от s . Она определяет трение в системе, т.е. диссипацию кинетической энергии налетающих ядер во внутреннюю. Оказывается, что она (диссипация) самая маленькая, когда ядра ориентированы «бок в бок». Поэтому в случае динамического рассмотрения столкновения может оказаться, что более выгодная ориентация для слияния ядер именно «бок в бок». Кстати, в этом случае при касании ядер получается более компактная конфигурация, и формирование составного ядра может быть облегчено. Поэтому вывод о более предпочтительной конфигурации для получения составного ядра можно сделать только после проведения динамического рассмотрения процесса столкновения.

Обратимся теперь к зависимости потенциальной энергии от угла φ . В этом случае оси симметрии ядер лежат в разных плоскостях. Пример влияния вращения ядер вокруг оси, соединяющей их центры масс, приведен на рис. 3. Угловые точки соответствуют ориентации «нос в нос», центральная точка – ориентации «бок в бок». Вверху показана потенциальная энергия для угла $\varphi=0$, т.е. ядра лежат в одной плоскости. Внизу представлена разница $V(\varphi_i) - V(\varphi=0)$ для углов $\varphi_i=30, 60$ и 90 градусов. Как видно из рисунка, с увеличением угла поворота различие в энергии увеличивается. Причем изменения происходят разнонаправленно. Отметим, что угловые точки своих значений не меняют. Это следствие симметрии конфигурации относительно вращения по φ .

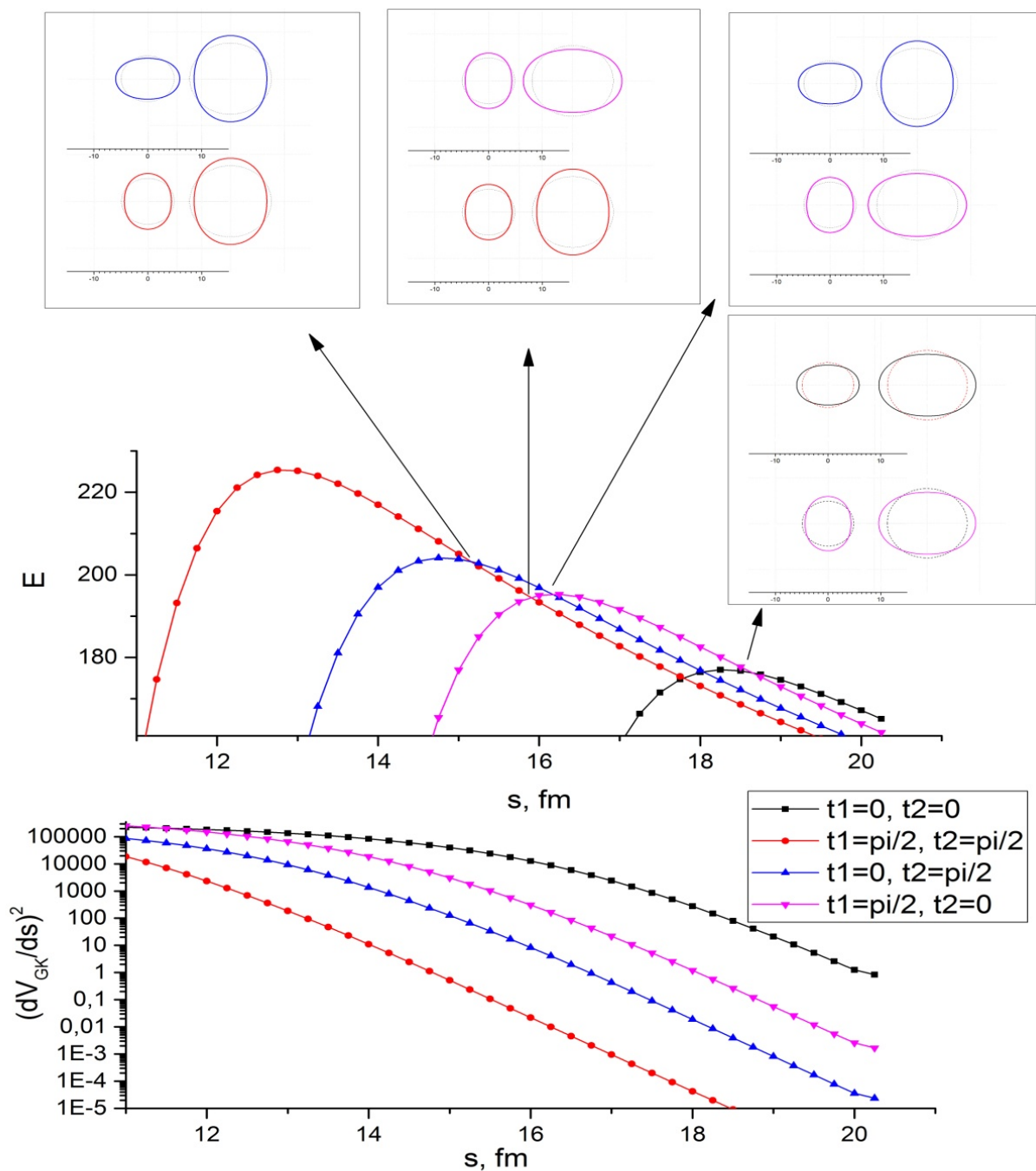
$^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$
 $\alpha = 0.3, \varphi = 0$


Рис. 2. Верхняя панель. Энергия взаимодействия ядер ^{64}Ni и ^{238}U в зависимости от расстояния между центрами масс и взаимной ориентации. На выносных картинках приведена форма ядер в точках пересечения графиков. Нижняя панель. Квадрат производной ядерной части потенциальной энергии от расстояния между центрами масс. Квадраты (черный цвет) – ориентация «нос в нос», круги (красный цвет) – ориентация «бок в бок», треугольники – ориентация «нос в бок»: угол вверх (синий цвет) – ^{64}Ni и ^{238}U , угол вниз (сиреневый цвет) – ^{238}U и ^{64}Ni . Деформация ядер одинаковая $\alpha_{2pt}=0,3$, оси симметрии ядер лежат в одной плоскости $\varphi_2=0$

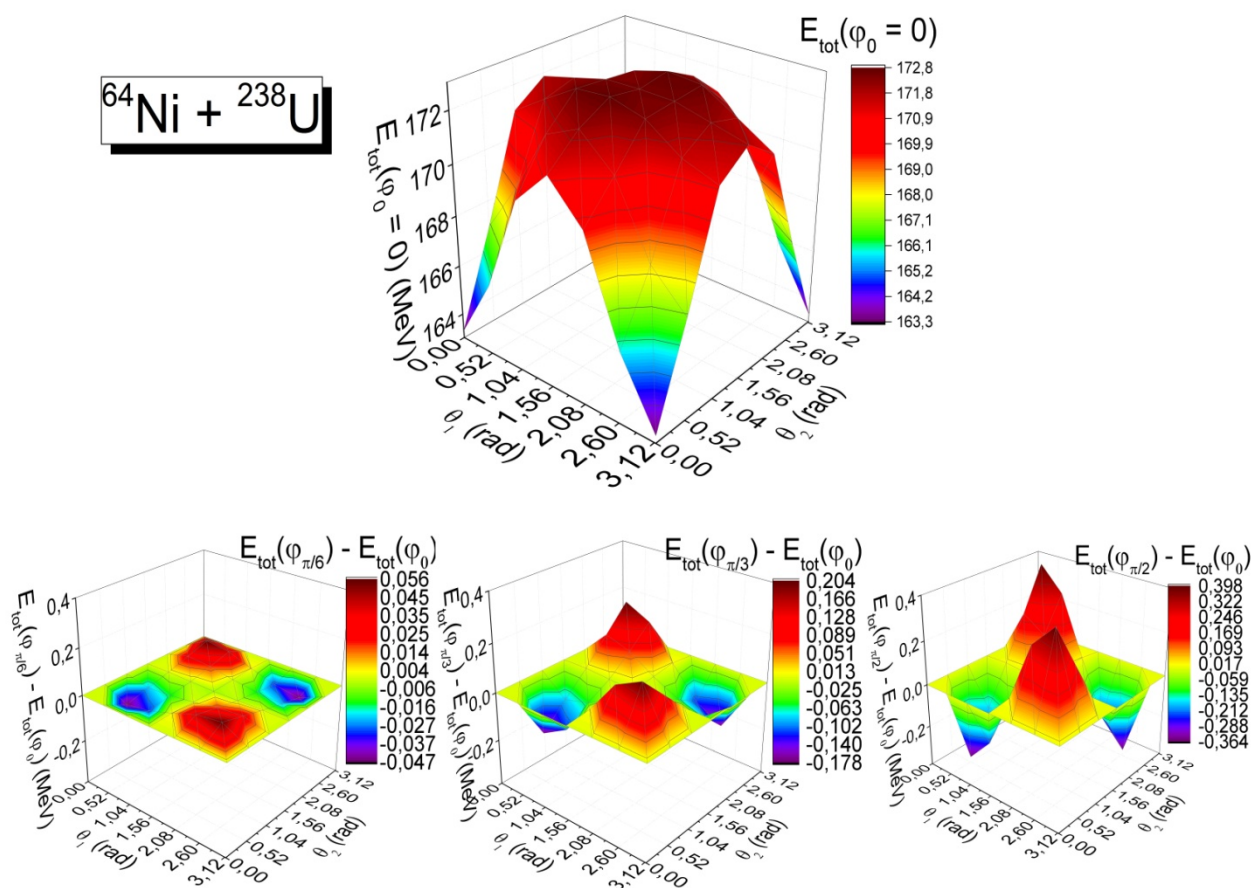


Рис. 3. На верхней панели представлена потенциальная энергия сталкивающихся ядер для расстояния между центрами масс $s=12.5$ Фм в зависимости от углов ϑ_1 и ϑ_2 . Оси симметрии ядер лежат в одной плоскости. На нижней панели показан вклад от вращения ядер вокруг оси, соединяющей центры их масс

Таким образом, расчет показывает, что ориентация сталкивающихся ядер существенно влияет на значение энергии взаимодействия ядер. Это приводит к размытию понятия потенциального барьера. Барьер может достигаться при разных расстояниях между ядрами, и, кроме того, иметь разные значения в зависимости от угла φ . Поэтому оценка вероятности касания или слияния ядер по одному конкретному значению барьера представляется не совсем корректной. Необходимы динамические расчеты, в которых бы учитывалась всевозможная ориентация ядер друг относительно друга.

Библиографический список

1. Moller P., Iwamoto A. Macroscopic potential-energy surfaces for arbitrarily oriented, deformed heavy ions // Nuclear Physics A. 1994 Vol. 575. P. 381-411.
2. Курманов Р. С., Косенко Г. И. Новый подход к расчету потенциальной энергии сталкивающихся ядер // Ядерная физика. 2014. Т. 77, № 12, С. 1514-1524
3. Gross D.H.E., Kalinowski H. Friction model of heavy-ion collisions // Physics Reports, 1978. Vol. 45. P. 175-210.

А.С. Наумов, П.П. Бобров¹

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

¹Омский государственный педагогический университет, г. Омск, Россия

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В НЕНАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРАХ И УГЛЕВОДОРОДАХ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 1 кГц ДО 20 ГГц

Аннотация. Ненаполненные полимеры, как и углеводороды – нефть и продукты ее перегонки, находят широкое применение в технике. В работе приведены результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости фторопласта, сырой нефти, дизтоплива и моторного масла в полосе частот 1 кГц – 20 ГГц. Недостатком широкополосного метода измерения является низкая точность определения мнимой части диэлектрической проницаемости при малых ее значениях. Рассмотрены расчетные способы повышения точности с использованием релаксационных моделей и преобразований Крамерса-Кронига. Показано, что эти методы позволяют повысить точность определения значений мнимой части диэлектрической проницаемости, если они меньше 0,01.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, технические диэлектрики, моторное масло, дизтопливо, сырая нефть.

Органические ненаполненные полимеры являются хорошими диэлектриками, особенно фторопласт-4 (политетрафторэтилен), поэтому их широко используют в электротехнической и радиотехнической промышленности. Ненаполненные полимеры, как и углеводороды – нефть и продукты ее перегонки, обладают низкими значениями действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) $\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''$. Точное знание КДП твердых диэлектриков необходимо при проектировании СВЧ устройств. КДП углеводородов слабо зависит от содержания тяжелых фракций и в большей степени – от содержания воды, поэтому диэлектрические методы часто используются для определения содержания воды прямо в трубопроводе.

При измерениях КДП таких веществ в широкой полосе частот (от единиц килогерц до единиц гигагерц) возникают проблемы точности измерений. При малых собственных потерях вещества (малых значениях тангенса угла диэлектрических потерь), заметное влияние на измеряемые потери будут оказывать потери измерительной ячейки. Резонаторный метод [1] позволяет достаточно точно определять малые потери, но только на одной частоте, и в данном случае не подходит. Для широкополосных измерений используют коаксиальные ячейки [2,3]. Чем меньше действительная часть КДП ε' , тем больше должна быть длина ячейки, чтобы импеданс коаксиального конденсатора в низкочастотной части диапазона не был бы чрезвычайно высоким. При этом возрастают потери в металле проводников, особенно заметные в высокочастотной части диапазона, и погрешность определения мнимой части диэлектрической проницаемости ε'' возрастает. При этом погрешность измерения действительной части КДП невелика и не превышает 2% во всем диапазоне частот.

Нами исследованы два способа повышения точности определения значений ε'' в широком частотном диапазоне 1 кГц – 20 ГГц с использованием более точно измеренных значений ε' в этом же частотном диапазоне. Первый способ основан на применении релаксационных формул Дебая и Коула-Коула. Известно [4,5], что в полимерах и жидких углеводородах наблюдаются слабые релаксационные процессы, из-за которых диэлектрическая проницаемость слабо изменяется по частоте. КДП таких веществ в широкой полосе частот можно описать трехрелаксационной моделью [4], в которой высокочастотный релаксационный процесс (первый член в уравнении) описывается моделью Дебая, а два низкочастотных процесса – моделью Коула-Коула;

$$\varepsilon' - i\varepsilon'' = \left(\varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{S1} - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau_1} \right) + \frac{\Delta\varepsilon_{S2}}{1 + (i\omega\tau_2)^{\alpha_2}} + \frac{\Delta\varepsilon_{S3}}{1 + (i\omega\tau_3)^{\alpha_3}} - i \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где ε_{∞} – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости; ε_{S1} – низкочастотная диэлектрическая проницаемость 1-й (начиная с высокочастотного края диапазона) области релаксации; $\Delta\varepsilon_{S2}$, $\Delta\varepsilon_{S3}$ – разности между низкочастотным и высокочастотным пределами диэлектрической проницаемости 2-й и 3-й областей релаксации, соответственно; τ_1 , τ_2 , τ_3 – времена релаксации для 1, 2, 3-й областей релаксации, соответственно; α_2 , α_3 – коэффициенты распределения времён релаксации для 2-й и 3-й областей; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота; i – мнимая единица; σ – ионная проводимость.

Параметры модели определялись путем минимизации нормы невязки между измеренными и рассчитанными значениями ε' и ε'' . Весовые коэффициенты в целевой функции выбирались в зависимости от соотношения погрешностей измерения ε' и ε'' . В случае высокой погрешности измерения ε'' весовой коэффициент при этой величине был много меньше, чем при ε' .

Второй способ восстановления спектра значений ε'' заключался в использовании преобразования Крамерса-Кронига [6]:

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} - \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega'(\varepsilon'(u) - 1)}{u^2 - \omega^2} du. \quad (2)$$

Перед выполнением численного интегрирования спектр значений ε' расширялся вниз до 1 Гц, и вверх до 100 ГГц и содержал более 1500 значений в этом диапазоне частот. Чаще всего для этой цели использовалась релаксационная модель (1). На частотах в диапазоне от $u_1 = 0,98\omega$ до $u_2 = \omega/0,98$ интеграл определялся с помощью выражения [7]:

$$\int_{u_1}^{u_2} \frac{\omega'(\varepsilon'(u) - 1)}{u^2 - \omega^2} du = \frac{a\omega}{2} \ln \left| \frac{\omega^2 - u_2^2}{\omega^2 - u_1^2} \right| + \frac{b}{2} \ln \left| \frac{(\omega - u_2)(\omega + u_1)}{(\omega - u_1)(\omega + u_2)} \right|, \quad (3)$$

где a и b – коэффициенты интерполяционного уравнения $\varepsilon'(u) = au + b$ в интервале от u_1 до u_2 . Численное интегрирование производилось в программе MatLab.

Результаты экспериментального измерения действительной части КДП приведены на рис. 1. Жидкие диэлектрики имеют схожие спектры. У моторного масла частотная зависимость диэлектрической проницаемости выражена слабее. В низкочастотной части ε' масла немного меньше, чем у дизтоплива и нефти, а в высокочастотной – немного выше. Значения ε' фторопласта изменяются по частоте незначительно, мало отклоняясь от среднего значения, равного 2. Это позволило нам при расчете мнимой части КДП по формуле Крамерса-Кронига использовать как зависимость $\varepsilon'(u)$, найденную с помощью (1), так и постоянное во всем диапазоне значение $\varepsilon' = 2$.

На рис. 2 приведены экспериментально измеренные и найденные расчетным путем значения мнимой части КДП фторопласта. Значения ε'' , найденные расчетными методами, значительно меньше экспериментальных. Расчеты по релаксационной модели и формуле Крамерса-Кронига дают совпадающие результаты в диапазоне частот 10^5 – 10^{10} Гц. За пределами этого диапазона частотные спектры расходятся. Причиной этого является ограниченность применения преобразования Крамерса-Кронига сверхшироким частотным диапазоном (в идеале от 0 до бесконечности). С другой стороны, формулу Крамерса-Кронига

можно применять и в тех случаях, когда на спектре КДП не обнаруживается релаксационных процессов (кривая 4 на рис.2).

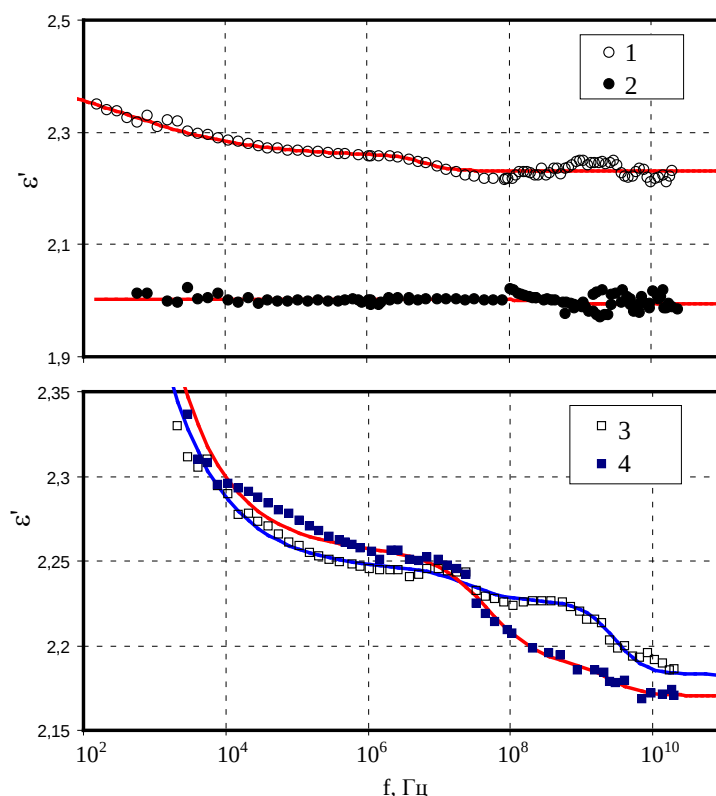


Рис.1. Экспериментальные частотные зависимости действительной части КДП. 1 – моторное масло 10W30; 2 – фторопласт-4; 3 – дизтопливо; 4 – сырая нефть. Сплошные линии – расчет по модели (1)

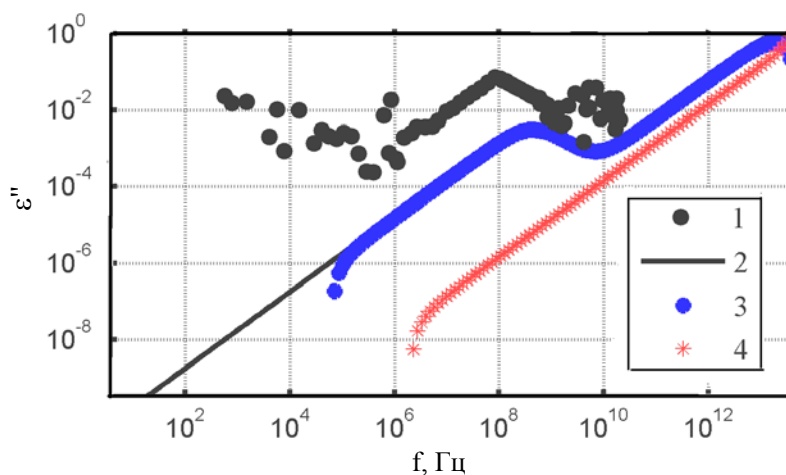


Рис. 2. Частотная зависимость мнимой части КДП фторопласта. 1 – экспериментальные данные; 2 – расчет по формуле (1); 3 – расчет по формулам (2), (3); 4 – расчет по формулам (2), (3) в предположении постоянства действительной части КДП $\epsilon' = 2$

На рис. 3 приведены спектры мнимой части КДП жидких диэлектриков. Влияние релаксационных процессов выражено сильнее, чем во фторопласте, поэтому сильнее изменяется по частоте действительная часть КДП и значения мнимой части выше. В тех случаях, когда $\epsilon'' \geq 0,01$, результаты расчетов хорошо совпадают с экспериментальными данными. Действительная часть КДП ϵ' моторного масла меньше изменяется в частотном

диапазоне (рис. 1), поэтому и значения ε'' меньше, чем у других жидких диэлектриков. В этом случае расчетный метод позволяет получить более точные результаты.

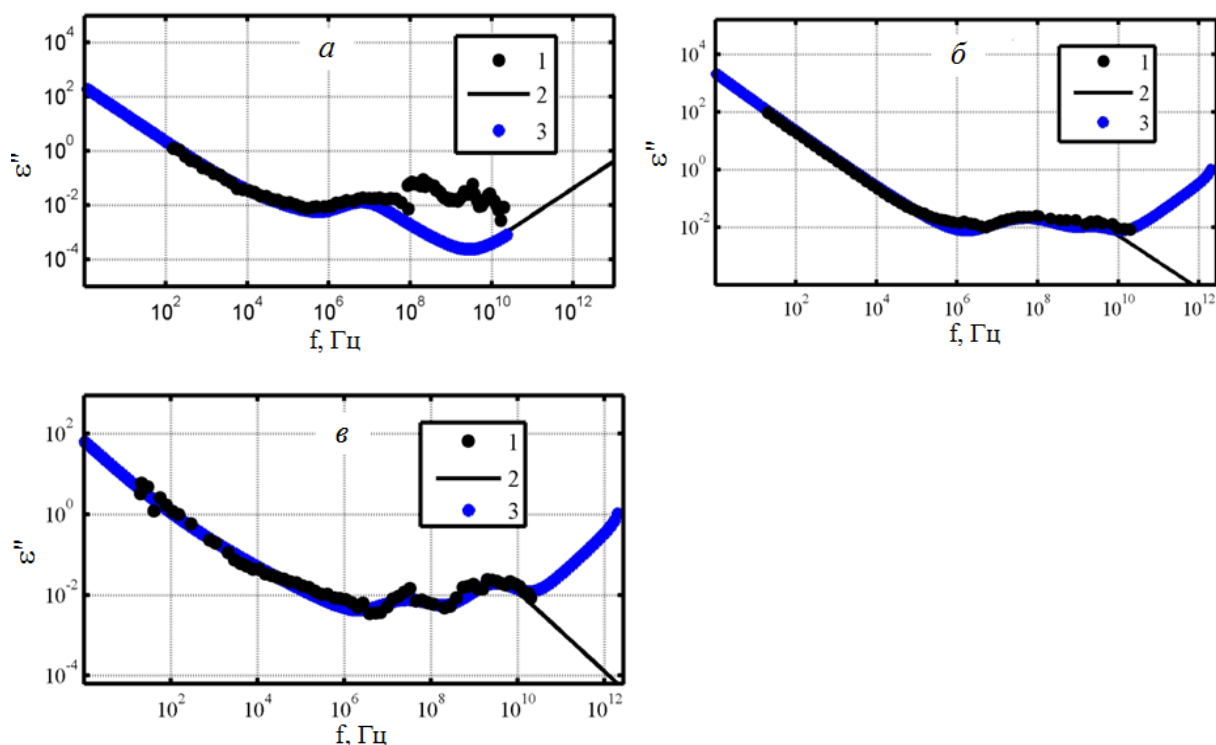


Рис. 3. Частотная зависимость мнимой части КДП моторного масла (а), нефти (б) и дизельного топлива (в).

1 – экспериментальные данные; 2 – расчет по формуле (1); 3 – расчет по формулам (2), (3)

Таким образом, проведенное исследование показало, что применение способов расчета мнимой части КДП по измеренным с высокой точностью спектрам действительной части позволяет получить лучшие, чем в эксперименте, результаты, если значения мнимой части $\varepsilon'' \leq 0,01$. Если на спектрах КДП просматривается влияние релаксационных процессов, то лучше применять для расчета ε'' релаксационную модель. Если же значения ε' практически не изменяются по частоте, лучше применять формулу Крамерса-Кронига, так как не возникает проблем с расширением спектра ε' вверх и вниз по частоте для достижения нужной частотной ширины спектра.

Библиографический список

1. Joshi K. K., Allika I., Wadke C. Non-destructive microstrip resonator technique for the measurement of moisture / permittivity in crude oil // 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 1999. Vol. 4. P. 1-8. URL: [http://www.ursi.org/proceedings/procGA05/pdf/A10.1\(01638\).pdf](http://www.ursi.org/proceedings/procGA05/pdf/A10.1(01638).pdf) (дата обращения: 05.04.2017)
2. Бобров П.П., Кондратьева О.В., Репин А.В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц // Известия Вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 23-26.
3. Bobrov P. P., Repin A.V., Rodionova O.V. Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Properties Measurements // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015. Vol. 53, № 5. P. 2366–2372.
4. Lapina A., Bobrov P. Complex dielectric permittivity of water/oil emulsions in a wide frequency band // The 8th International Siberian Early Career GeoScientists Conference:

Proceedings of the Conference (13-24 June 2016, Novosibirsk, Russia). IGM SB RAS, IPPG SB RAS, NSU: Novosibirsk. 2016. P. 397–398.

5. Малышкина И.А., Маркин Г.В., Кочервинский В.В. Исследование процессов диэлектрической релаксации в сополимерах винилиденфторида и гексафторпропилена //Физика твердого тела. 2006. Т. 48, Вып. 6. С. 1127–1129.

6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Физмалит, 2001. 656 с.

7. Chalashkanov N. M., Dodd S. J., Fothergill J. Limitations of Kramers-Kronig transform for calculation of the DC conductance magnitude from dielectric measurements //Paper presented at the IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 14-17 October 2012, Montreal, Canada. URL: <http://openaccess.city.ac.uk/1738/> (датаобращения: 05.04.2017)

УДК 544.6.018.42-16

А.К. Паульс, Т.А. Аронова

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СУПЕРИОННЫХ ПРОВОДНИКОВ В ВИДЕ ПЛЕНОК

Аннотация. Статья посвящена обзору методов получения пленок суперионных проводников (СИП) и выявлению преимуществ и недостатков данных методов. В качестве источников информации использованы материалы монографий по данной тематике за последние 15 лет. Рассмотрены физические и химические методы получения СИП, а также перспективы их применения в различных отраслях промышленности. Преимущества пленочных покрытий на основе СИП заключаются в том, что такие технологии позволяют решить задачу миниатюризации промышленных устройств. К недостаткам можно отнести сложность получения материалов со стабильными характеристиками, так как СИП представляют собой многокомпонентные системы, свойства которых сильно зависят от технологии их получения.

Ключевые слова: Суперионные проводники, твердые электролиты, тонкослойные пленки, толстослойные пленки, вакуумное испарение, ионное распыление, химическое осаждение из паровой фазы, электроосаждение, ионное наслаивание.

К современным тенденциям конструирования изделий машиностроения и приборостроения можно отнести стремление разработчиков к миниатюризации энергетических блоков и блоков автоматики и применение композиционных материалов. Композиционные материалы применяются не только в виде кристаллов, но и в виде тонкопленочных покрытий, характеристики которых могут изменяться в зависимости от их толщины. Применение таких покрытий обусловлено их уникальными физическими свойствами, возникающими в результате синтеза многих компонентов.

В электронной промышленности и микроэлектронике используют всевозможные технологические процессы, когда из композиционных материалов в результате напыления или нанесения иным способом на подложку и отжига производятся изделия, способные выполнять разнообразные электрические, магнитные или акустические функции.

Ниже более подробно рассмотрим две группы методов, которые позволяют сохранять стабильность свойств применяемых многокомпонентных материалов и обеспечивают изготовление высококачественных тонкопленочных образцов, и толстопленочную технологию.

Метод вакуумного испарения является наиболее применимым для получения тонких слоев и является одним из физических методов получения суперионных проводников (СИП). В данном методе атомы, конденсируясь, образуют трехмерные зародыши, которые, срастаясь, формируют тонкую пленку. Свойства и структура пленок напрямую зависят от кинетики процесса роста, а структурный порядок в пленках определяют тип и температура подложки, скорость осаждения испаряемого вещества, последующий отжиг пленки и так далее [1]. Таким образом, пленки СИП имеют разную ориентацию, разную кристаллическую структуру, могут быть эпитаксиальными, аморфными или поликристаллическими и обладают различными свойствами, это зависит от условий получения пленки СИП.

Для того чтобы определить толщину пленок, используют различные методы, которые связаны с измерениями как механическими, к примеру, профилограф, так и разнообразными оптическими.

Образцом СИП является AgI. Его тонкие слои удалось получить благодаря вакуумному испарению на холодную подложку, но на микрофотографиях этих пленок четко видны сквозные каналы-поры. Однако, для получения в работе образцов AgI без пор исходный материал осаждается на подложку, которую нагревают до температуры, превышающей температуру перехода AgI в высокопроводящую α -фазу. Как только подложка охлаждается до комнатной температуры, происходит фазовый переход, при котором происходит увеличение коэффициента объемного расширения материала на 6%, далее имеющиеся в пленке поры «самоизлечиваются».

Также в виде тонких слоев могут быть изготовлены фторионные проводники, которые динамично изучают в последние годы. Так, пленки из PbSnF_4 создаются термическим испарением в вакууме ранее синтезированного материала [2]. Для того чтобы изготовить тонкопленочную модель СИП на основе фторидных твердых растворов в системах $\text{MF}_x\text{-B}_1\text{F}_3$ ($\text{M} = \text{Rb, Ag, Pb, Te}$), применяется усложненная методика, в которой используется два отдельных испарителя. Использование данного метода позволяет модифицировать скорости испарения отдельных компонентов и в результате получать на подложке слои нужного состава.

Попытки получить целый ряд СИП в результате прямого термического испарения потерпели неудачу, так как при этом изменялись физические свойства синтезированных материалов, поэтому в настоящее время используется дискретное испарение. Для осуществления данного способа применяется вибробункер для порционной подачи испаряемого материала к испарителю.

Для нанесения пленок из тугоплавких материалов используют мощный электронный луч вместо резистивного нагревателя для разогрева образца. Данный способ применяется для напыления слоев из LaF_3 , ErF_3 , тонких пленок на основе ZrO_2 , LISICON [3].

Еще одним физическим методом получения СИП является ионное распыление. Данный метод довольно часто используют для получения пленок СИП, которые имеют высокие температуры плавления или сложный химический состав. Ионное распыление заключается в том, что поверхность напыляемого материала бомбардируют высокоэнергетическими ионами инертных газов [1], в результате чего происходит «выбивание» частиц вещества. Самое простое средство генерации высокоэнергетических ионов – это процесс создания тлеющего разряда между двумя плоскими электродами при остаточном давлении распыляющего газа порядка 1 Па и постоянном напряжении между катодом и анодом от 1 до 3 кВ.

За последние 10 лет разработаны различные системы ионного распыления, позволяющие изготовить пленки с минимальным содержанием захваченных ионов примесей и газа, однородных по составу.

К примеру, существует система магнетронного распыления, где магнитное поле приложено под углом 90 градусов к электрическому. Выходу электронов из прикатодной

области мешает магнитное поле, это повышает эффективность ионизации газа и также предотвращает бомбардировку осаждаемой пленки электронами. В таких системах можно получить токи высокой плотности при достаточно низких напряжениях и значительных скоростях осаждения пленок.

Ионное распыление чаще всего используют для осаждения пленок с различным типом носителя заряда – литий-, серебро-, натрий-, кислородопроводящие СИП. Так, например, пленки $\text{Ag}_{19}\text{I}_{15}\text{P}_2\text{O}_7$, которые были получены методом прямого термического испарения, имеют плохо воспроизводимые характеристики. А в случае ионного распыления тщательный контроль за режимом и правильный выбор состава мишени гарантируют получение высококачественных пленок с составом, который весьма близок к стехиометрическому с воспроизводимыми свойствами.

При помощи магнетронного высокочастотного катодного напыления удалось получить пленки тугоплавкого натрийпроводящего электролита $\text{Na-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, являющегося формульным аналогом $\text{Na-}\beta\text{-глинозема}$.

Химические методы

Синтез тонких слоев твердых электролитов осуществляется различными химическими методами, где образование слоя происходит за счет его осаждения из газовой или жидкой фазы в результате химической реакции.

Одним из химических методов является метод химического осаждения из паровой фазы, который в последнее время широко применяется в микроэлектронике и производстве интегральных схем, также оптических композитов и защитных покрытий. Смысл данного метода состоит в испарении исходного летучего соединения и химическом разложении на нагретой подложке с образованием твердой пленки и газообразных продуктов термоллиза. К преимуществам метода относятся равномерность и морфологическая однородность покрытия, возможность получения высоких адгезионных свойств, а к недостаткам относятся загрязнение покрытия продуктами разложения, необходимость строгого контроля параметров процесса. Определяющими факторами стабильности физических свойств пленок, получаемых таким методом, являются летучесть и устойчивость соединений, свойства подложки, а также способ транспортировки паров летучего соединения.

Вторым химическим способом получения суперионных проводников на основе пленок является электролитический метод нанесения пленок. В данном методе используется явление электролиза. Когда электрический ток проходит через растворы солей, то на электродах протекают электрохимические реакции, которые сопровождаются образованием новых продуктов. Продукты реакции могут выделяться на электродах в виде твердого осадка, такой процесс получил название электроосаждения.

Данный метод успешно используют для приготовления тонкопленочных СИП систем $\text{AgI} - \text{Ag}_n\text{XO}_4$ ($\text{X} = \text{W}, \text{P}, \text{Cr}, \text{Mo}$) и MAg_4I_5 ($\text{M} = \text{K}, \text{NH}_4$), Cu^+ -ТЭЛ, которые практически невозможно получить при помощи вакуумной технологии, о которой говорилось выше. Характеристики электроосажденных пленок зависят от ряда параметров, например, от температуры, при которой проводился электролиз, плотности тока и присутствия примесей. Влияние этих параметров в основном отражается на скорости роста пленки на аноде, а также на качестве пленки. Если правильно подобрать режим электроосаждения, то можно получить беспористые покрытия, которые имели проводимость, сравнимую с объемными образцами.

Третьим химическим методом является метод ионного наплавления, который считается наиболее перспективным, так как среди его достоинств можно выделить возможность получения нанослоев дисперсных веществ на подложке, а также проведение синтеза при наиболее простом аппаратном исполнении [4].

В основе этого метода лежит проведение на поверхности подложки в растворах актов необратимой последовательной сорбции анионов и катионов, которые при взаимодействии

образуют труднорастворимые соединения. Но при этом толщина слоя задается числом циклов ионного наслаивания, включающих промежуточную отмывку от избытка реагентов.

Тогда подложка выступает попеременно в качестве катионо- и анионообменника, а это значит, что представления об ионном обмене могут быть широко использованы. Сейчас практически для всех типов твердых нерастворимых веществ, способных обменивать свои ионы на ионы внешней среды, определены условия наиболее полного обмена ионов и емкость по каждому из них, получены термодинамические и кинетические соотношения, составлены ряды обменивающихся ионов, и во многих случаях были исследованы механизмы реакций.

Методом ионного наслаивания выполняется синтез широкого круга неорганических соединений, в которые входят оксиды [5, 6], пероксиды [7, 8], сульфиды, теллуриды, хроматы [9] и фосфаты.

В качестве четвертого метода можно рассмотреть трехфазный метод получения пленок. Оригинальность данного способа заключается в том, что образование пленок оксидных фаз на оксидных подложках образуется в результате протекания твердофазных реакций. Подобная технология реализуется в двух вариантах с помощью поверхностных твердофазных реакций и посредством твердофазного растекания оксидов.

В основу первого варианта легла твердофазная реакция между оксидной подложкой и другим простым или сложным оксидом, который обладает большой реакционной или диффузионной активностью. Примером является синтез пленок полиалюминатов. Пленки Na-, K- и Cs-β-глиноземов были получены в результате твердофазных реакций порошков MgAl_2O_4 с моно- и поликристаллическими подложками из $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ или монокристаллическими подложками из $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

В основе второго подхода лежит снижение общей энергии системы при самопроизвольном распространении фазы с меньшей поверхностной энергией по поверхности подложки, у которой поверхностная энергия больше. Такого рода процессы включают два этапа распространения диффузианта [10].

Технологией трехфазного растекания оксидов были получены пленки In_2O_3 на поверхности монокристалла Al_2O_3 . Также данную технологию используют и для изготовления плотного пленочного электрода из In_2O_3 на монокристаллическом твердом электролите ZrO_2 .

Толстопленочная технология

Для изготовления пленок СИП из синтезированного мелкодисперсного порошка используют метод трафаретной печати, благодаря которому получают образцы толщиной 50 мкм. Суть данного способа заключается в том, что на подложку через трафарет наносится паста. Она состоит из главного элемента в виде тонкоизмельченного порошка СИП, связующего вещества, препятствующего образованию порошковых агломератов, органического растворителя, который обеспечивает необходимые реологические свойства пасты, такие как вязкость, поверхностное натяжение и так далее, и, наконец, смачивающей добавки. Далее подложка подвергается первоначальной сушке, второй этап – высокотемпературная обработка, результатом которой является прочное соединение компонентов пасты с подложкой. Чтобы избежать механических напряжений, трещин, отслаивания и необратимых изменений свойств пленки, значения коэффициентов теплового расширения полностью отоженной пасты и материала подложки должны быть схожи.

Данным методом удалось приобрести толстые пленки различных СИП: $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$, $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, $\text{ZrO}_2\text{-xY}_2\text{O}_3$ и так далее.

Закключение. Исследователи, которых заинтересовало изучение тонких пленок, имеют довольно обширный выбор методов их производства. Вообще говоря, все вышеперечисленные методы можно разделить на две группы. Одина группа связывает методы, которые основаны на физическом испарении или распылении материала из

источника. Другая группа состоит из методов, в основе которых лежит использование химических реакций. Суть реакций в этой группе методов может быть различной: электрическое разделение ионов или использование тепловых объектов. В приведенной статье была приведена классификация методов получения тонких пленок, основанная на таком принципе подразделения.

В итоге, рассмотрев все разнообразные методы получения тонких пленок, предположим, что нет лучшего выбора метода получения тонких пленок. Выбор метода зависит от типа требуемой пленки, от ограничений в выборе подложек и часто, особенно в случае многократного осаждения, от общей совместимости различных процессов, протекающих при применении этого метода.

Библиографический список

1. Берлин Е. В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / под. ред. Е. В. Берлина, С. А. Двинина, Л. А. Сейдмана. М.: Техносфера, 2007. 176 с.
2. Митькин В. Н. Новейшие электродные материалы для литиевой химической энергетики / под ред. Ф. А. Кузнецова, В. В. Мухина. Новосибирск, ОАО НЗХК, 2001. 162 с.
3. Придатко К. И., Чуриков А. В. Композитные анодные литий-аккумулирующие материалы, альтернативные углеродным // Электрохимическая энергетика, 2005. Т. 5, № 1. 16–29 с.
4. Kurochka A., Sergienko A., Kurochka S., Kolybelkin V. Features of electronic emission from surface of dielectric thin-film materials with ion-beam etching // Journal of Nano- and Electronic Physics. Volume 6, Issue 3, 2014. p. 03031.
5. Каменев Ю. Б., Чезлов И. Г. Современные химические источники тока. СПб.: ГУКиТ, 2009. 90 с.
6. Русин А. И., Хегай Л. Д., Демин Г. Е. Основы технологии производства современных свинцовых аккумуляторов / под. ред. проф. А. И. Русина. СПб.: ИД Петрополис, 2012. 216 с.
7. Дамаскин Б. Б., Петрий О. А., Цирлина Г. А. Электрохимия. М.: Химия. 2006. 667 с.
8. Ivanishchev A. V., Churikov A. V., Ivanishcheva I. A., Ushakov A. V. Mass transport investigation in single-component thin films and composite powder lithium intercalation electrodes: Theoretical approaches and experimental applications // Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering. 2015. № 11544. p. 1–17.
9. Поляков В. И. Визуализация каналов проводимости и динамика ионного транспорта суперионных проводников // ФТТ. 2001. Т. 43, вып. 4. С. 630–636.
10. Уваров Н. Ф., Пономарева В. Г., Лаврова Г. В. Композиционные твердые электролиты // Электрохимия, Т. 46, № 7. 2010. С. 772–784.

УДК 538.945

И.С. Позыгун, Г.М. Серопян, С.А. Сычев

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК YBCO ПЛЕНОК

Аннотация. Статья посвящена влиянию механических напряжений в тонких сверхпроводящих YBCO пленках на их вольтамперные характеристики. Механические напряжения в пленках формируются двумя методами – методом контролируемой закалки и путем выращивания сверхпроводящей пленки на облученной лазером подложке. Исследования вольтамперных характеристик монокристаллических, гранулярных и напряженных пленок показывают, что для сильнонапряженных пленок происходит

существенное смещение ВАХ в сторону больших токов. Повышение внутреннего давления в материале пленки из-за больших механических напряжений может являться причиной существования механизма, подавляющего распаривание куперовских пар даже при токах, в десятки раз превышающих критический сверхпроводящий ток.

Ключевые слова: сверхпроводящая тонкая пленка, механические напряжения, критический ток, вольтамперная характеристика, импульсное лазерное излучение.

Использование сверхпроводящих пленок – единственный способ реализовать на практике многие задачи сверхпроводниковых технологий. Именно на пленках были достигнуты рекордные значения критических параметров (плотность критического тока, критическая температура, критическое магнитное поле и др.). В настоящее время разрабатываются и изучаются сверхпроводящие пленочные структуры, которые служат основой для сверхпроводниковой электроники. В частности, напряженные пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO), оказались по ряду причин наиболее подходящими для изготовления сверхпроводящих квантовых интерферометров – сквидов.

В данной работе при формировании YBCO пленок использовался импульсный твердотельный лазер с длиной волны излучения 1064 нм, длительностью импульса 16 нс и частотой следования импульсов 10 Гц. Мишенями служили таблетки керамического YBCO материала. В вакуумной напылительной камере поддерживалось давление около 100 Па, температура подложки составляла 820 °С. В качестве подложек использовались монокристаллические пластины SrTiO_3 (100). При оптимальных параметрах напыления на подложке формируются монокристаллические YBCO пленки с высокими критическими сверхпроводящими параметрами. Окончательное формирование структуры осуществляется в процессе медленного остывания пленки до комнатной температуры при одновременном напуске в камеру атмосферного воздуха.

При повышении скорости остывания в материале пленки происходит накопление упругих механических напряжений, что приводит к подавлению плотности критического тока. Такая технология получения напряженных пленок названа методом «контролируемой закалки» [1]. Варьированием скорости охлаждения можно организовать в пленке необходимую степень механических напряжений и, следовательно, необходимое значение плотности критического тока. При высоких скоростях охлаждения в монокристаллической пленке образуются домены напряжений, границы между которыми представляют собой сильнонапряженные участки, подавляющие ток куперовских пар, что и приводит к подавлению сверхпроводящих транспортных свойств пленки, в частности, плотности критического тока. Для слабонапряженных пленок значение плотности критического тока лежит в диапазоне $10^5 - 10^6$ А/см², а для сильнонапряженных пленок значение плотности критического тока находится в диапазоне $10^3 - 10^4$ А/см².

Для измерения критического тока пленок и снятия вольтамперных характеристик (ВАХ) использовался стандартный четырехзондовый метод. Вольтамперные характеристики различных YBCO пленок представлены на рис. 1. Для монокристаллических пленок (кривые 1 и 2) на начальных участках ВАХ наблюдается быстрый рост напряжения после достижения сверхпроводящим током критического значения I_c . Для гранулярных пленок (кривые 3 и 4) и слабонапряженных пленок (кривая 5) на начальных участках ВАХ наблюдается медленный рост напряжения после достижения сверхпроводящим током критического значения. Такое поведение может указывать на схожесть сверхпроводящих транспортных свойств межгранулярных и междоменных границ в гранулярных и напряженных пленках соответственно. Наиболее интересное поведение ВАХ наблюдается для сильнонапряженной пленки (кривая 6), где происходит значительное смещение ВАХ в сторону больших токов (даже при превышении током критического значения в 30 раз наблюдается слабый рост напряжения).

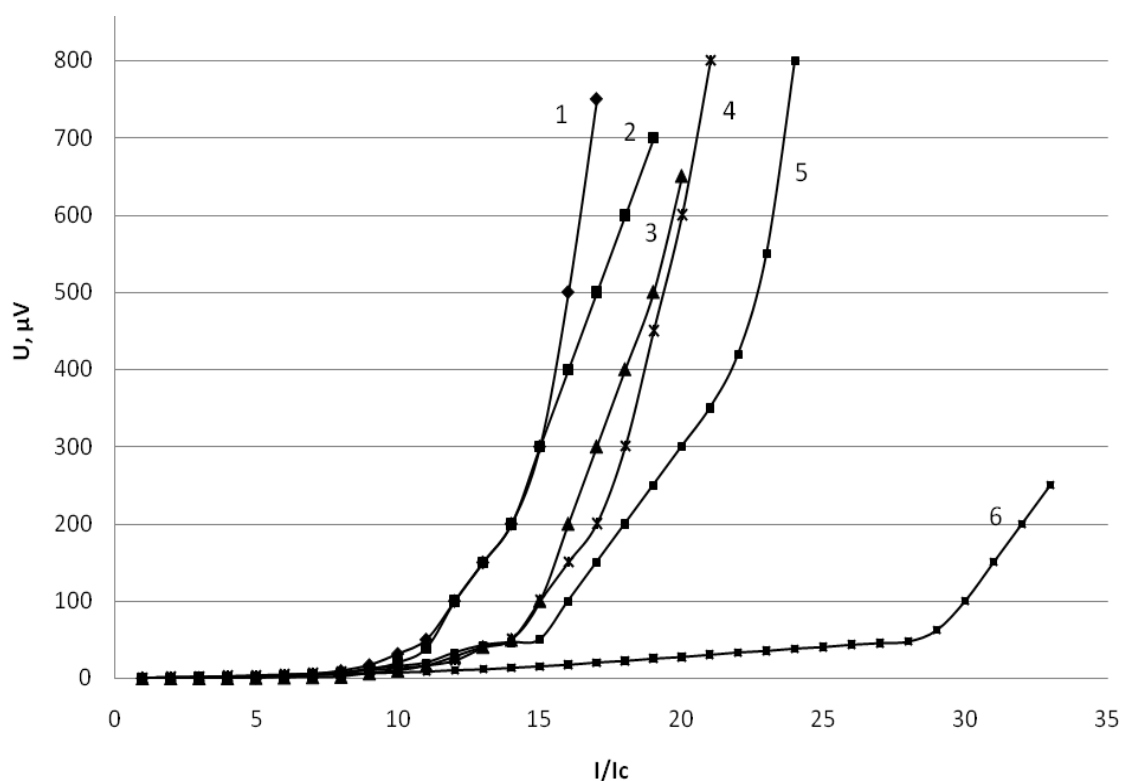


Рис. 1. ВАХ различных YBCO пленок.
1, 2 – монокристаллические пленки, 3, 4 – гранулярные,
5, 6 – напряженные, полученные методом контролируемой закалки

Другой способ формирования сверхпроводящих тонких пленок, имеющих области с различными значениями плотности критического тока, основан на создании механических напряжений в монокристаллической подложке, на которой затем выращивают напряженную сверхпроводящую пленку [2]. Перед нанесением YBCO пленки выбранный участок поверхности монокристаллической подложки облучают импульсным лазерным излучением наносекундной длительности для организации в ней полей упругих напряжений. Интенсивное лазерное излучение вызывает ионизацию вещества, в результате чего возникает пространственно неоднородное облако горячих неравновесных электронов. Облако «раздувает» кристалл, приводя к образованию в нем сильных полей напряжений. Впоследствии на облученной подложке выращивают сверхпроводящую тонкую пленку, в которой формируются дополнительные упругие напряжения только в тех областях, которые расположены над облученными участками подложки. В этих областях значение плотности критического тока пленки находятся в прямой зависимости от степени упругих напряжений в материале, что позволяет изготавливать сверхпроводящие микромостики с джозефсоновскими свойствами. Наблюдения физических свойств пленок на протяжении одного года показали, что значения плотности критического тока пленок не подвергаются существенной релаксации в процессе хранения при нормальных условиях. Исследования структуры облученных подложек на предмет устойчивости сформированных в них механических напряжений к релаксационным процессам показывают, что при длительном хранении параметры деформации меняются незначительно (не более чем на 0,2 %).

Вольтамперные характеристики YBCO пленок, выращенных на напряженных подложках, представлены на рис. 2, где кривая 1 соответствует слабонапряженной пленке, а кривая 2 соответствует сильнонапряженной пленке. И в этом случае для сильнонапряженных пленок наблюдается существенное смещение ВАХ в сторону больших токов.

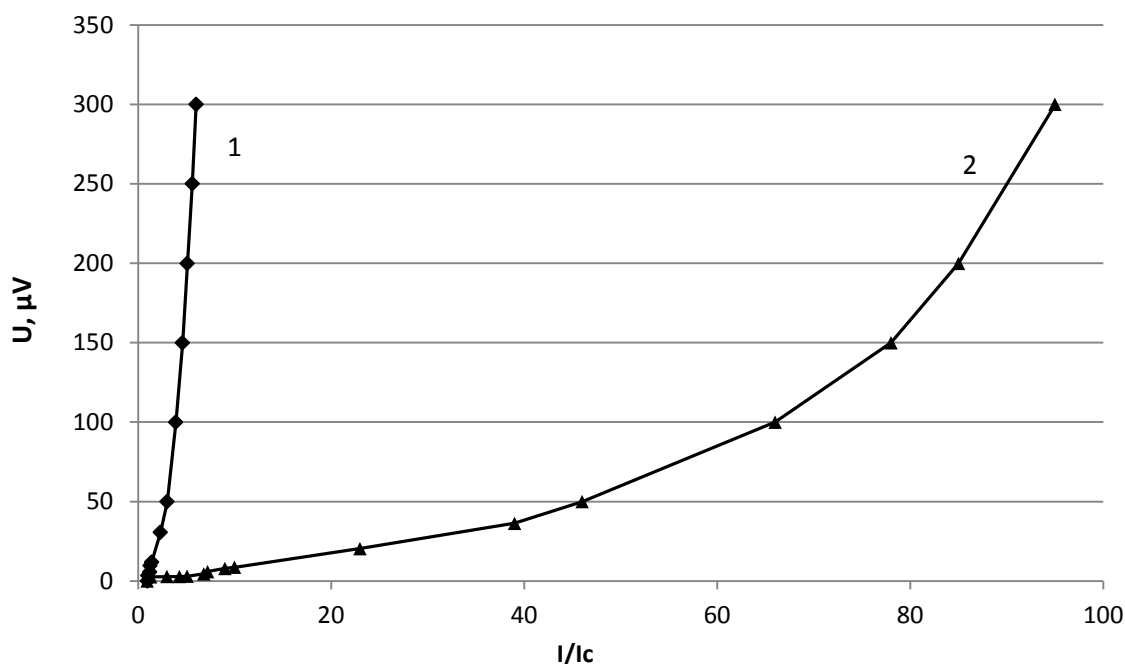


Рис. 2. ВАХ напряженных YBCO пленок, выращенных на напряженных подложках.
1 – слабонапряженная пленка, 2 – сильнонапряженная пленка

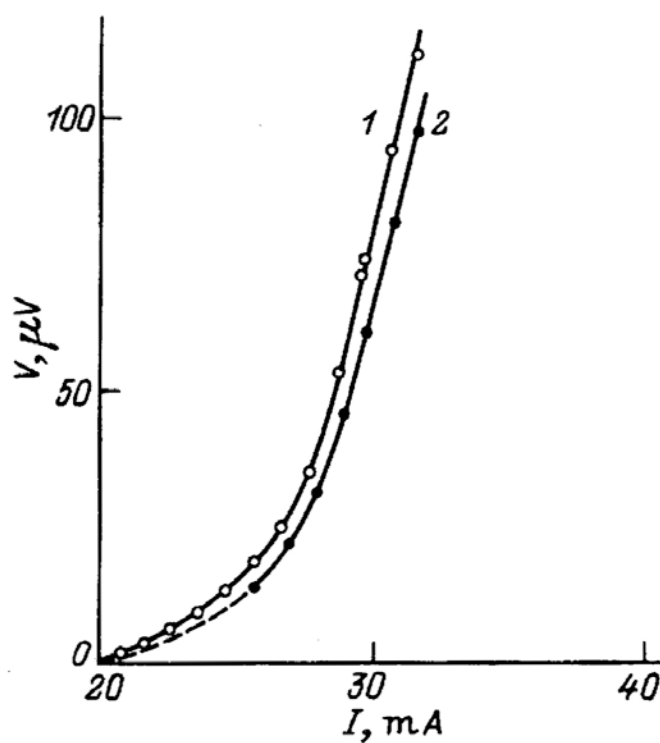


Рис. 3. Влияние сжимающей нагрузки на ВАХ YBCO пленки [3]

Вопрос о влиянии механических нагрузок на сверхпроводящие характеристики высокотемпературных сверхпроводников (критическую температуру T_c и критический ток I_c) обсуждается во многих статьях. В случае пленок эффект нагрузки представляется более важным, чем в керамиках, поскольку в пленках уже в процессе их изготовления возникают остаточные механические напряжения и соответствующие им деформации. Так, по расчетам [3], подобные напряжения в пленках YBCO из-за разницы в коэффициентах

теплового расширения пленки и подложки могут достигать сотен МПа. Рентгеновским методом были определены остаточные упругие деформации пленки, величины которых $\varepsilon \sim 10^{-3}$ хорошо соответствовали расчетным оценкам. На рис. 3 показан пример изменения ВАХ YBCO пленки под действием нагрузки. При воздействии на образец давлением отчетливо наблюдается смещение ВАХ в сторону больших токов, что соответствует уменьшению напряжения при заданном токе. Кривой 1 соответствует внешнее давление 0 МПа, кривой 2 – давление 40 МПа.

При исследовании влияния давления $P \leq 2$ ГПа на критическую температуру YBCO пленок, выращенных на подложках SrTiO_3 и MgO , было установлено, что значения dT_c/dP для указанных подложек равны соответственно 0,65 и 0,45 К/ГПа [4]. При одноосном сжатии изучалось влияние механической нагрузки на ВАХ относительно несовершенных YBCO пленок с плотностью критического тока $1 - 10$ А/см². Оказалось, что для таких пленок деформация сжатия, как и в случае YBCO керамики, приводит к смещению ВАХ в сторону больших токов, т.е. к уменьшению сопротивления образца R при $I > I_c$.

В работе [5] исследовались монокристаллические пленки толщиной 200–500 нм с критическими параметрами $T_c \sim 86$ К и $j_c = 5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^6$ А/см², выращенные на подложках SrTiO_3 (100). ВАХ пленок без нагрузки и под нагрузкой измерялись при 77 К, т.е. при $T < T_c$. При этом нагружение образцов могло производиться как до начала измерения ВАХ, так и при некотором значении $I = \text{const} (I > I_c)$. В последнем случае фиксировалось изменение напряжений ΔV на ВАХ в результате нагружения. Нагруженное состояние образца характеризовалось сжимающими напряжениями в подложке $\sigma_s = F/S$, где S – площадь поперечного сечения кристалла подложки.

В работе [6] исследования влияния механических напряжений на критический ток и ВАХ однофазных и высокоплотных керамик состава $\text{Y}_{1-x}\text{Er}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ позволили установить, что одноосное сжатие приводит к росту критического тока и уменьшению электрического сопротивления образцов при $I > I_c$. Авторы предполагают, что наблюдаемые эффекты связаны с воздействием внешних напряжений на межзеренные границы, которые определяют критический ток и вольтамперные характеристики образцов.

В YBCO керамике критический ток и ВАХ определяются слабыми связями на границах зерен, а влияние нагрузки на ВАХ может быть связано с изменением «толщины» и «состояния» границ, а также площади «контактов» на них [7]. Упругие деформации влияют на вольтамперные характеристики не только сверхпроводящей керамики и относительно несовершенных пленок, но могут приводить к значительным эффектам и в случае монокристаллических пленок с плотностью критического тока порядка 10^6 А/см².

Проведенный анализ ВАХ различного вида пленок показывает, что значение плотности критического тока определяется степенью механических напряжений в пленке. Оба типа напряженных пленок ведут себя примерно одинаково – имеют сильный наклон ВАХ на начальном участке вблизи критического тока. Это может означать, что в этих типах пленок работает одинаковый механизм, влияющий на транспортные сверхпроводящие свойства пленок. Этот механизм может быть связан с повышением внутреннего давления в материале пленки из-за больших напряжений, что может быть причиной подавления распаривания куперовских пар даже при токах, в десятки раз превышающих критический сверхпроводящий ток.

Библиографический список

1. Югай К. Н., Серопян Г. М., Муравьев А. Б. [и др.] Тонкие ВТСП пленки YBCO с замороженными напряжениями // ФНТ. 2006. Т. 32, вып. 1. С. 75–82.
2. Захаров А. В., Муравьев А. Б., Позыгун И. С. [и др.] Сверхпроводящие тонкие пленки иттрий-бариевого купрата, выращенные на напряженных подложках // Вестник НГУ. 2008. Т. 3, вып. 4. С. 25–32.

3. Братухин П. В., Захарченко И. В., Шавкин С. В. [и др.] Влияние одноосного сжатия на вольт-амперные характеристики ВТСП-пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ // ФТТ. 1992. Т. 34, № 3. С. 879–881.

4. Вороновский А. Н., Дижур Е. М., Ицкевич Е. С. Влияние давления на критическую температуру пленок YBaCuO , нанесенных на подложки MgO и SrTiO_3 // СФХТ. 1990. Т. 3, № 1. С. 35–37.

5. Adrian G., Wilkens W., Adrian H., Maul M. Superconductive and normal state transport properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ films on sapphire in high magnetic fields // Supercond. Sci. Technol. 1991. Vol. 4, no 2. P.169–171.

6. Дамм З., Орлова Т. С., Смирнов Б. И., Шпейзман В. В. Влияние механических напряжений на критический ток и вольтамперные характеристики керамик $\text{Y}_{1-x}\text{Er}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ // ФТТ. 1994. Т. 36, № 8. С. 2465-2471.

7. Жуков А. А., Мошалков В. В. Критическая плотность тока в высокотемпературных сверхпроводниках // СФХТ. 1991. Т. 4, №5. С. 850–887.

УДК 539.2

Д.Е. Романовский, В.В. Прудников, П.В. Прудников

Омский государственный университет имени Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ СВЕРХСТРУКТУР С ЭФФЕКТАМИ ГИГАНТСКОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Аннотация. Представлено описание эффекта гигантского магнитосопротивления в мультислойных магнитных структурах с использованием анизотропной модели Гейзенберга для задания магнитных свойств тонких ферромагнитных пленок, образующих данные структуры. Методами Монте-Карло осуществлен расчет коэффициента магнитосопротивления в случае ТВП геометрии трехслойной структуры Fe/Cr с толщиной ферромагнитных пленок Fe, равной 3 нм, при задании шкалы температур через величину интеграла обменного взаимодействия, вычисленного в рамках теории молекулярного поля, $J = 1.7 \cdot 10^{-14}$ эрг. Рассчитанная температурная зависимость коэффициента магнитосопротивления находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными, полученными для структуры Fe/Cr.

Ключевые слова: гигантское магнитосопротивление, мультислойные сверхструктуры, ультратонкие магнитные пленки, коэффициент магнитосопротивления, ТВП геометрия, анизотропная модель Гейзенберга, методы Монте-Карло.

Введение

В последнее десятилетие наблюдается значительный рост интереса к проблеме описания свойств тонких магнитных пленок. Способность понимать и контролировать уникальные свойства тонких пленок, не проявляющиеся в объемных образцах, способствует решению фундаментальных проблем физики магнитных явлений, а выявленные в ходе исследований новые открытия часто находят прикладное применение.

Эффект гигантского магнитосопротивления (ГМС) наблюдается в мультислойных структурах, состоящих из чередующихся ферромагнитных (Fe, Co и др.) и немагнитных (Cr, Cu) слоев толщиной порядка нескольких нанометров. Толщина немагнитной прослойки подбирается таким образом, чтобы взаимодействие между магнитными слоями было антиферромагнитным. За счет этого взаимодействия намагниченности соседних ферромагнитных слоев ориентируются противоположно друг другу. При помещении

системы во внешнее магнитное поле намагниченности ферромагнитных слоев ориентируются параллельно друг другу, что приводит к значительному уменьшению электрического сопротивления. Значения коэффициента магнитосопротивления, достигающие более 100 % при низких температурах, в сочетании с ультратонкими толщинами мультислоев и гранулированных пленок обуславливают перспективность таких структур для создания нового поколения считывающих головок, датчиков магнитного поля, устройств магнеторезистивной памяти [1, 2].

Большинство экспериментов по изучению эффекта ГМС выполняются путем измерения электрического тока, протекающего в плоскости многослойной структуры, то есть в случае ТВП (ток в плоскости пленки) геометрии. Эта геометрия в настоящее время используется для промышленного применения ГМС. Измерение тока, проходящего перпендикулярно плоскостям пленок, то есть в случае ТПП (ток перпендикулярно плоскости) геометрии, намного сложнее, что обусловлено очень малой толщиной многослойной структуры и, следовательно, низким электросопротивлением.

Методика вычисления коэффициента магнитосопротивления в случае ТВП геометрии методами Монте-Карло

Физические свойства тонких ферромагнитных плёнок на основе Fe, Co и Ni можно описать в рамках анизотропной модели Гейзенберга [3]. Гамильтониан модели задается в виде:

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} [(1 - \Delta(N))(S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) + S_i^z S_j^z] - h \sum_i \vec{S}_i, \quad (1)$$

где J – константа обменного взаимодействия, $\Delta(N)$ – константа анизотропии, зависящая от толщины пленки N , h – величина внешнего поля, $\vec{S}_i$ – спин модели, задаваемый как единичный вектор в i узле решетки. Значение $\Delta = 0$ в (1) соответствует изотропной модели Гейзенберга, $\Delta = 1$ – модели Изинга. Параметр Δ учитывает эффективное влияние анизотропии, создаваемой кристаллическим полем подложки, на магнитные свойства пленки в зависимости от ее толщины N в единицах монослоев. Зависимость константы анизотропии от толщины пленки выбиралась в соответствии с результатами работы [4].

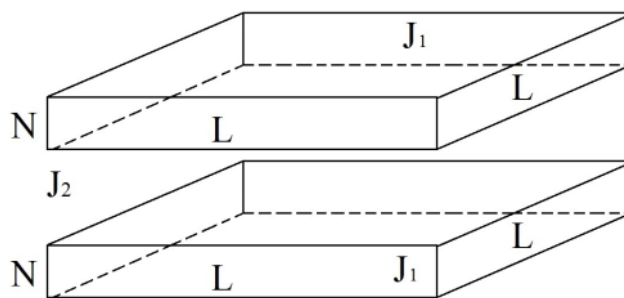


Рис. 1. Модель мультислойной структуры, состоящей из двух ферромагнитных слоев, разделенных немагнитным металлом; L и N – линейные размеры пленок, J_1 , J_2 – интегралы обменного взаимодействия

В настоящей работе были рассмотрены мультислойные структуры, состоящие из двух ферромагнитных слоев Fe, разделенных слоем немагнитного металла Cr (рис. 1). Значение обменного интеграла, определяющего взаимодействие соседних спинов внутри ферромагнитного слоя, задавалось как $J_1 = 1$, взаимодействие между слоями – $J_2 = -0.1$. Температура T системы измеряется при этом в единицах обменного интеграла $J = 1.7 \cdot 10^{-14}$ эрг.

Представим ниже элементы разработанной нами методики [4] по определению коэффициента магнитосопротивления с применением метода Монте-Карло для мультислойных магнитных структур при ТВП-геометрии (ток в плоскости пленки). Коэффициент магнитосопротивления определяется соотношением

$$\rho = \frac{R(H=0) - R(H \neq 0)}{R(H \neq 0)} \quad (2)$$

где $R(H=0)$ и $R(H \neq 0)$ – сопротивление образца без поля и во внешнем магнитном поле, соответственно.

Обозначим величину сопротивления группы электронов со спином вверх (вниз) при прохождении ФМ-слоя и рассеянии на границе с НМ-слоем $R_{\downarrow}$ и $R_{\uparrow}$. В случае $H > H_s$ поля насыщения, намагниченности соседних ферромагнитных слоёв ориентированы параллельно друг другу (ферромагнитная конфигурация). Общее сопротивление такой структуры:

$$R(H \neq 0) = \frac{2R_{\uparrow}R_{\downarrow}}{R_{\uparrow} + R_{\downarrow}}. \quad (3)$$

При отсутствии внешнего магнитного поля намагниченности двух магнитными слоев ориентированы антипараллельно (антиферромагнитная конфигурация). Общее сопротивление будет равно:

$$R(H=0) = \frac{R_{\uparrow} + R_{\downarrow}}{2}. \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент магнитосопротивления можно вычислить по формуле:

$$\rho = \frac{(R_{\uparrow} - R_{\downarrow})^2}{4R_{\uparrow}R_{\downarrow}} = \frac{(J_{\uparrow} - J_{\downarrow})^2}{4J_{\uparrow}J_{\downarrow}}, \quad (5)$$

где $J_{\uparrow,\downarrow} = en_{\uparrow,\downarrow} \langle V_{\uparrow,\downarrow} \rangle$ – плотность тока. Здесь $n_{\uparrow,\downarrow}$ – концентрация электронов с проекциями спинов на ось $z + 1/2$ и $-1/2$, $n = n_{\uparrow} + n_{\downarrow}$ – полная концентрация электронов, $\langle V_{\uparrow,\downarrow} \rangle$ – средние скорости электронов с соответствующими проекциями спинов. Концентрацию электронов можно выразить через намагниченность пленки $n_{\uparrow,\downarrow}/n = (1 \pm m)/2$, определяемую в процессе Монте-Карло моделирования ее магнитных свойств. Среднюю скорость электронов $\langle V \rangle$ можно выразить через подвижность электронов и напряженность внешнего электрического поля, а затем через вероятность перескока электрона в единицу времени из ячейки с номером i в соседнюю ячейку $i + 1$ по направлению электрического поля вдоль оси ОХ.

$$\langle V \rangle = \mu_{\uparrow,\downarrow} E = \frac{e}{T} E \langle e^{-\frac{\Delta E_i}{T}} \rangle, \quad (6)$$

где ΔE_i - изменение энергии электронов ячейки при их переходе в соседнюю ячейку. E_i определяется соотношением:

$$E_i = -\mp J \left[\sum_{j \neq i} S_j^z (n_{j,\uparrow} - \alpha n_{j,\downarrow}) + S_i^z (n_{i,\uparrow} - \alpha n_{i,\downarrow}) \right]. \quad (7)$$

где i – номер рассматриваемой ячейки, j – ближайший сосед i ячейки вдоль оси X , расположенной в плоскости пленки, S_j^z – проекция магнитного момента j ячейки на ось z , $0 < \alpha < 1$ – параметр, характеризующий процессы рассеяния с переворотом спина. В данном выражении реализована фундаментальная идея Н. Мотта, согласно которой электроны различных спиновых подзон осуществляют направленный перенос заряда, только если их проекция спина совпадает по направлению с локальной намагниченностью материала.

После достижения системой состояния равновесия на каждом шаге Монте-Карло вычисляется вероятность перехода электронов из i ячейки в $i+1$ (индекс i задает положение ячейки вдоль оси OX).

Если новая конфигурация принимается, электронная плотность переходит из i ячейки в $i+1$.

$$\begin{aligned} n_{i+1,\uparrow\downarrow} &= n_{i+1,\uparrow\downarrow} + n_{i,\uparrow\downarrow}, \\ n_{i,\uparrow\downarrow} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

При расчетах пренебрегалось движением электронов в плоскости YZ и движением в сторону, противоположную направлению электрического поля. По окончании моделирования, усредненные по шагам Монте-Карло значения плотностей тока подставляются в формулу для коэффициента магнитосопротивления. Моделирование проводилось для различных значений параметра α , после чего выбиралось значение, дающее лучшее согласие с экспериментом.

На основе представленных выше соотношений был осуществлен расчет температурной зависимости коэффициента магнитосопротивления для трехслойной магнитной структуры Fe/Cr(100)/Fe при толщине ферромагнитных слоев $N = 3$ нм.

Результаты расчета коэффициента магнитосопротивления в случае ТВП геометрии методами Монте-Карло

На рис.2 представлен график вычисленной температурной зависимости коэффициента магнитосопротивления для структуры Fe/Cr с толщиной пленок железа $N=10$ монослоев при задании шкалы температур через величину интеграла обменного взаимодействия $J = 1.7 \cdot 10^{-14}$ эрг для различных значений параметра α . Также на рисунке приведены результаты экспериментального измерения температурной зависимости коэффициента магнитосопротивления для мультислойной структуры Fe/Cr при толщине пленок железа в 3 нм, соответствующей $N=10$ [5]. Видно, что рассчитанная температурная зависимость коэффициента магнитосопротивления находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными при значении параметра $\alpha = 0.45$.

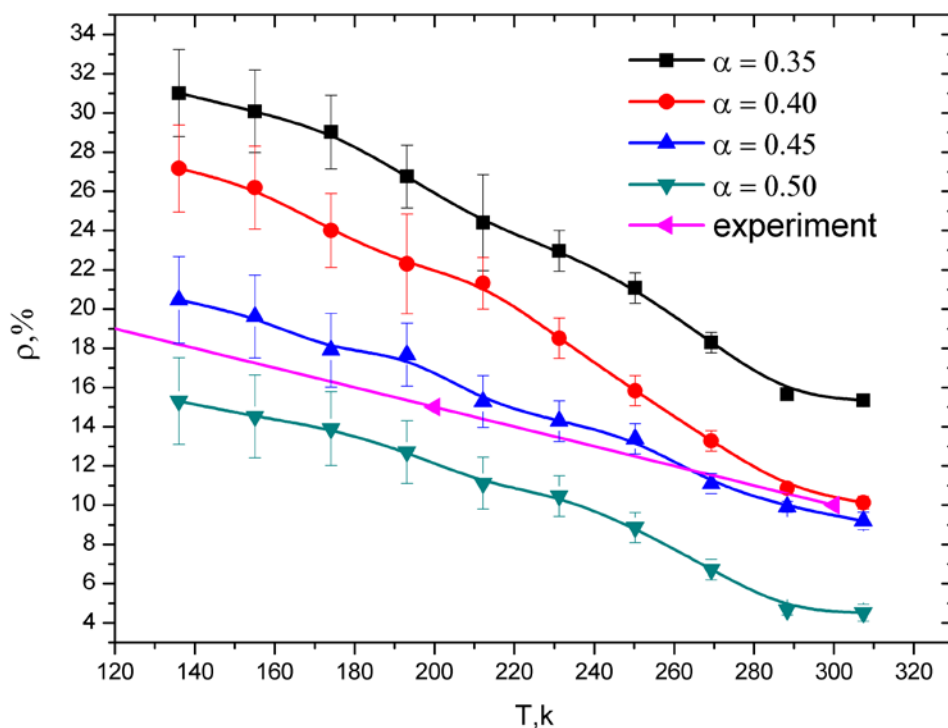


Рис. 2. Зависимость коэффициента магнитосопротивления трехслойной структуры Fe(100)/Cr(100), состоящей из двух ферромагнитных пленок, разделенных немагнитной, от температуры, вычисленная методами Монте-Карло для различных значений параметра α и полученная экспериментально [5]

Заключение

В представленной работе разработана методика Монте-Карло вычисления коэффициента магнитосопротивления в случае ТВП геометрии в мультислойных магнитных структурах, обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления, с использованием анизотропной модели Гейзенберга для задания магнитных свойств тонких ферромагнитных пленок, образующих данные структуры. Осуществлено моделирование магнитных свойств структуры из двух ферромагнитных пленок, разделенных немагнитной пленкой. Показано, что рассчитанная температурная зависимость коэффициента магнитосопротивления находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными, полученными для мультислойных магнитных структур Fe/Cr [5].

Библиографический список

1. Parkin S. S. P., Wessels B. W., Alto Ed. Giant magnetoresistance in magnetic nanostructures // Annual Review of Materials Science, CA: Annual Reviews Inc., 1995. Vol. 25. pp.357–388.
2. Wu S. M., Cybart Shane A., Yu P. [et al.] Reversible electric control of exchange bias in a multiferroic field-effect device // Nature Materials 9, 756–761 (2010).
3. Binder K., Landau D. P., // Phys. Rev. B 13, 1140 (1976).
4. Romanovskiy D. E., Mamonova M. V., Prudnikov V. V., Prudnikov P. V. Monte Carlo Simulation of Magnetic Multilayered Structures with the Effects of Giant Magnetoresistance // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2017, 10(1). P. 65–70.
5. Bass J., Pratt W. P. Jr. Current-perpendicular (CPP) magnetoresistance in magnetic metallic multilayers // JMMM 200 (1999). P. 274–289.

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ ПОДКОРПУСНОГО ПРОСТРАНСТВА МИКРОСХЕМ

Аннотация. Предложена реализация масс-спектрометрического контроля надёжности отбраковки продукции микроэлектронной промышленности. Рассмотрены факторы, влияющие на надёжность работы интегральных схем (ИС) и резонаторов. Проанализированы изделия микроэлектроники, образцы КРТ (кварцевый резонатор термостатированный) для изделия «Агат». Проверено качество исходных материалов, выявлены негативные факторы, влияющие на надёжность продукции. Установлено наличие в остаточной атмосфере подкорпусного пространства образцов пропаргила и пропаргилового спирта. Предложены меры для улучшения качества продукции.

Ключевые слова: масс-спектрометрия, подкорпусное пространство микросхемы, кварцевый резонатор термостатированный.

Увеличение степени интеграции современных микросхем предъявляет повышенные требования к качеству поверхности кристаллов и внутренних поверхностей корпусов для ограничения негативных поверхностных процессов, приводящих к деградации электрических параметров, и коррозии металлических контактов и проводников. Деструктивные характеристики среды, в том числе глубокий вакуум, большой перепад температур, механические или химические факторы могут негативно повлиять на электрические параметры изделия [1]. На работу микроэлектронных устройств негативно влияют адсорбаты, конденсат влаги, водород, кислород, углеводороды, аммиак, галогениды и другие летучие вещества [2, 3]. Масс-спектрометрический анализ газов подкорпусного пространства, выделяемых материалами, используемыми при монтаже устройства, позволит определить вещества с наибольшим газовыделением и, по возможности, исключить или, по крайней мере, минимизировать их присутствие.

Целью работы является исследование остаточных газов подкорпусного пространства кварцевых резонаторов термостатированных (КРТ) с установленными дефектами масс-спектрометрическим методом.

Для проведения исследования подкорпусных газов были получены 3 образца КРТ для изделия «Агат». Они содержат резонатор и схему управления. Одним из контролируемых параметров опорных генераторов на основе КРТ является стабильность частоты, которая задается с точностью до 10^{-9} на протяжении всего срока эксплуатации изделия, поэтому необходимо определить причины отклонения частоты от рабочего значения. Возможными причинами отклонений могут быть адсорбированные на поверхности кристалла КРТ газовые продукты выделения из материалов, используемых при монтаже резонатора и корпусировании [4]. Для определения состава адсорбатов и возможных химически активных частиц проводятся исследования спектра остаточных газов подкорпусного пространства микросхем. Для проведения экспериментов были получены образцы №315, 343, 435, имеющие различные неисправности: образец №315 – нестабильность рабочей частоты, №343 – отсутствие генерации, №435 – невыход на рабочую частоту.

Процесс проведения измерений: испытываемая микросхема помещается в вакуумную систему, после откачки до высокого вакуума происходит нагрев до 80°C (рабочий режим), затем до 160°C (режим отжига). В камере вскрытия находится ионный источник масс-спектрометра. По достижении необходимого уровня фона прокалывающее устройство создаёт микротечь в корпусе микросхемы. Парогазовая смесь через отверстие попадает в

область ионизации масс-спектрометра. После этого происходит контрольный нагрев образца до 80⁰С и снятие спектра масс.

Вакуумная система (рис.1) состояла из высоковакуумного насоса НМДО-0.25-1 (НОРД 250), магнетронного датчика в составе вакуумметра ВМБ-8, форвакуумного насоса 2НВР-5ДМ, квадрупольного масс-спектрометра ХТ-100, камеры вскрытия, зонда, соединительных фланцев и вентилях.

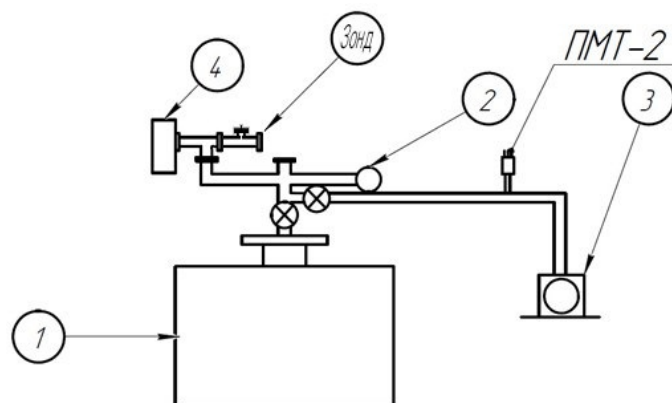


Рис.1. Схема лабораторного станда: 1 – насос НОРД-250; 2 – вакуумметр ВМБ-8; 3 – насос 2НВР-5ДМ; 4 – масс-спектрометр ХТ-100, камера вскрытия и зонд

Для исследования образцов к масс-спектрометру смонтирован зонд (1) (рис.2). Зонд состоит из нагревателя с медь-константановой термопарой (не изображены), корпуса камеры вскрытия (2), иглы для прокола (3) и микросхемы (4). Зонд с образцом помещается в камеру вскрытия, после чего происходит откачка до $\sim 10^{-7}$ Торр, затем происходит снятие спектров остаточных газов.

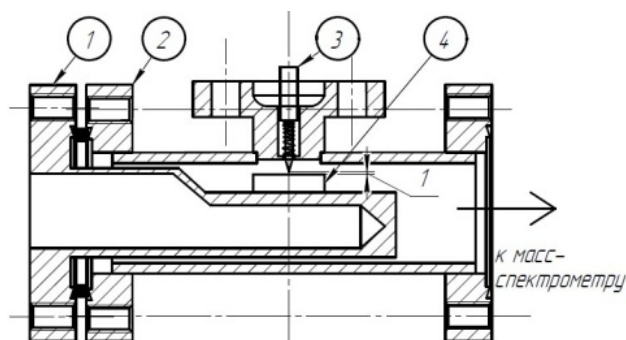


Рис.2. Схема зонда: 1 – зонд с нагревателем и термопарой, 2 – корпус зонда, 3 – игла, 4 – корпус микросхемы

Результаты и их обсуждение

После помещения зонда с корпусом образца № 435 был произведен отжиг при 160⁰С, затем был выполнен прокол образца при 20⁰С (рис.3) с последующим нагревом до 160⁰С. Из графика видно увеличение пика воды 17 массы, азота 28 массы, а так же 39 массы, что говорит об испарении данных веществ с внутреннего объема генератора. На рис. 4 представлены парциальные давления молекул с массами 17, 28 и 39 в зависимости от температуры. Из графика видно увеличение паров вещества 17, 28 массы с ростом температуры, 39 масса сначала растет при увеличении температуры, а затем наблюдается снижение вследствие откачки насосом. Хорошо виден значительный рост парциального давления, отвечающего 17 массе, после 120⁰С, также наблюдается значительный скачок ($\sim$ в 3 раза) парциального давления молекулярного азота после прокола.

На рис. 5 представлен масс-спектр образца № 315 в зависимости от температуры после прокола. Из спектра видно увеличение пиков 17 массы (H_2O) и 28 (N_2) с ростом температуры, пик 39 массы сначала увеличивается с ростом температуры, затем уменьшается после $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ вследствие откачки магниторазрядным насосом, а также снижения потока загрязняющей примеси из подкорпусного пространства генератора. Данные тенденции продемонстрированы также на рис.6. Из приведенных рисунков (рис.3 – рис.6) видно, что неисправности образцов №435 и №315 схожи и вызваны большим количеством паров воды. Также необходимо отметить скачок паров азота после прокола в образце №435, что может говорить о низком вакууме в подкорпусном пространстве микросхемы.

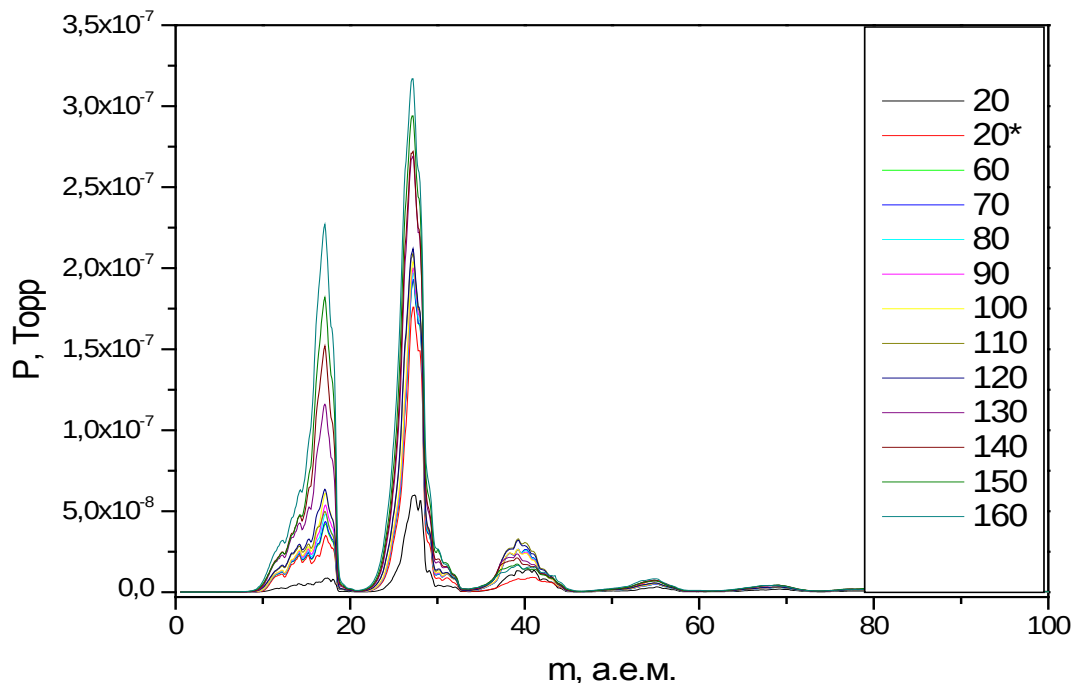


Рис. 3. Спектр остаточных газов образца № 435 в зависимости от температуры после прокола. 20 до прокола, 20* – после

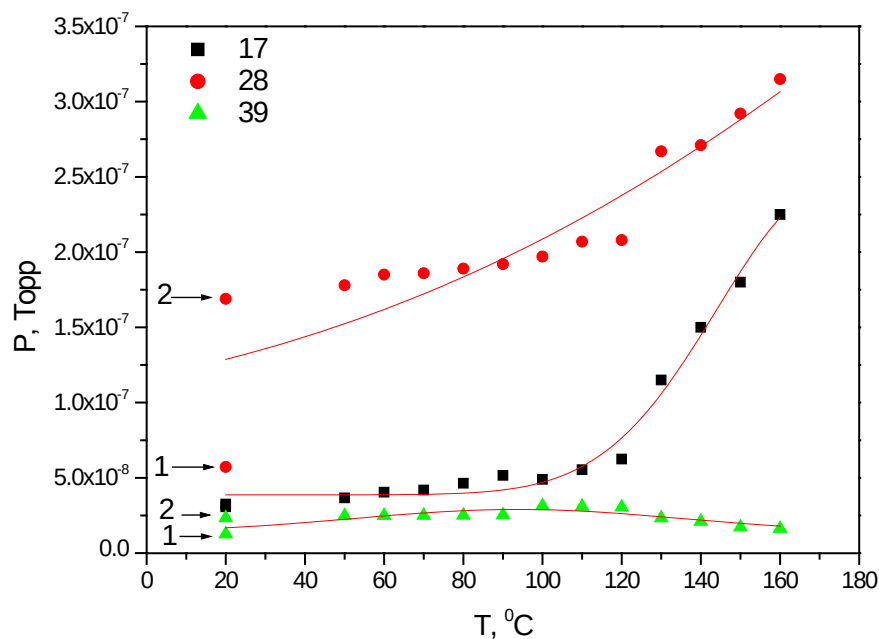


Рис. 4. Парциальные давления молекул с массами 17, 28 и 39 в зависимости от температуры. 1 – до прокола, 2 – после

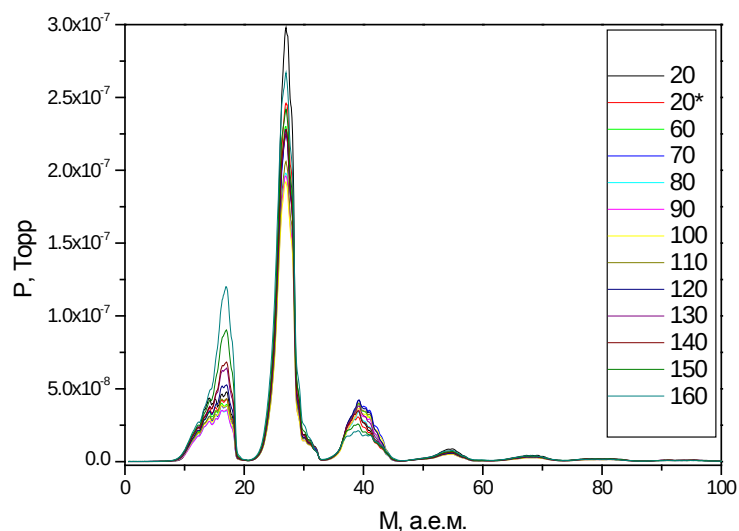


Рис. 5. Спектр остаточных газов образца № 315 в зависимости от температуры после прокола

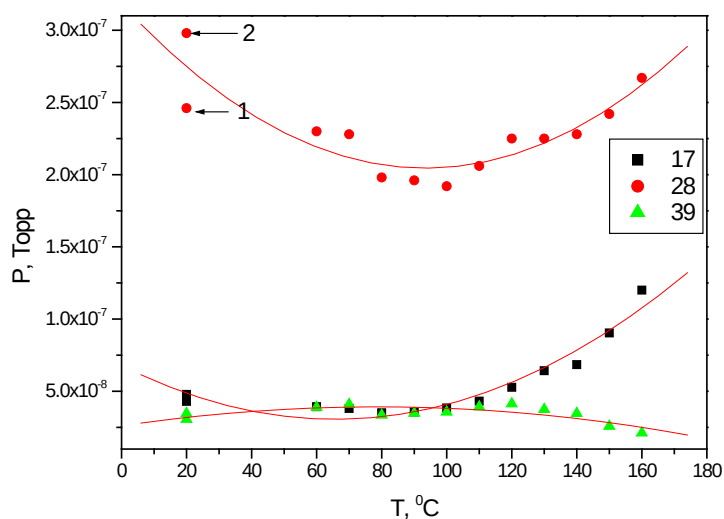


Рис. 6. Парциальные давления молекул с массами 17 , 28 и 39 в зависимости от температуры. 1 – до прокола, 2 – после

На рис.7 и рис.8 представлен масс-спектр остаточных газов образца №343 до и после прокола и динамика парциальных давлений молекул. Из графиков видно незначительное увеличение паров воды по сравнению с образцами №315,435, что говорит о наличии другой неисправности. Поиск 39 массы по базе NIST2008 (NationalInstituteStandardandTechnology) позволил выявить соединение, которое могло попасть внутрь корпуса в процессе подготовки и изготовления КРТ [5]. Возможно, это соединение C_3H_3 (пропаргил) – одноатомный непредельный радикал (C_3H_3), или, подробнее, $(HC\equiv C-CH_2)$, представляющий собой остаток углеводорода аллилена. Важнейшими из соединений этого радикала, так называемых пропаргильных соединений, являются пропаргильный спирт C_3H_3-OH , который используется в качестве протравы для гальванических покрытий поверхностей металлов, ингибитора коррозии, как растворитель полиамидов, ацетатов целлюлозы и других полимеров [6]. На рис. 9 представлен участок спектра масс остаточного газа после прокола образцов. Хорошо видно, что парциальное давление, отвечающее 39 массе, для образца №343 интенсивнее почти в 2 раза, чем для образца №315. Кроме того, следует отметить, что для образца №343 парциальное давление 17 массы после нагрева от 100 до 160 °C возрастает в 4 раза, а также и интенсивность пика для 55 массы (C_3H_3-OH) – выше, чем в других образцах.

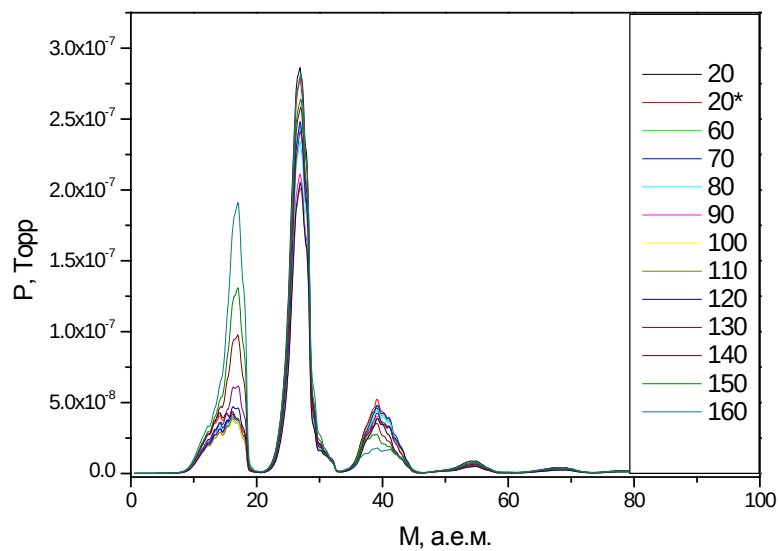


Рис. 7. Спектр остаточных газов образца № 343 в зависимости от температуры до и после прокола

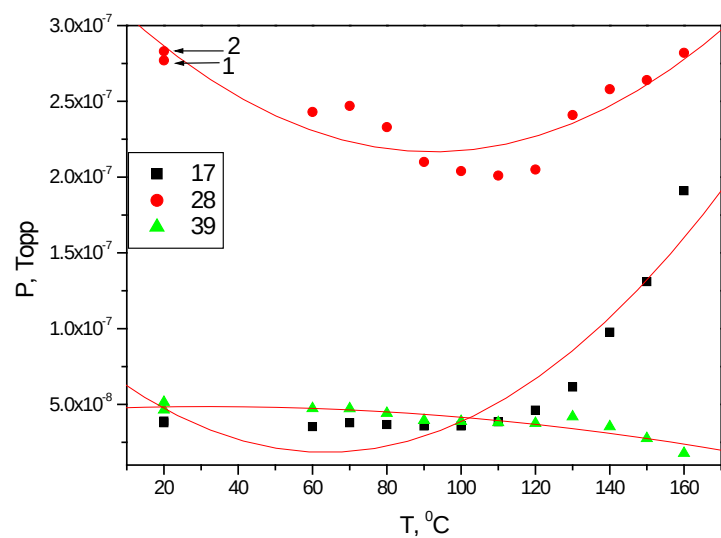


Рис. 8. Парциальные давления молекул с массами 17 , 28 и 39 в зависимости от температуры, после прокола

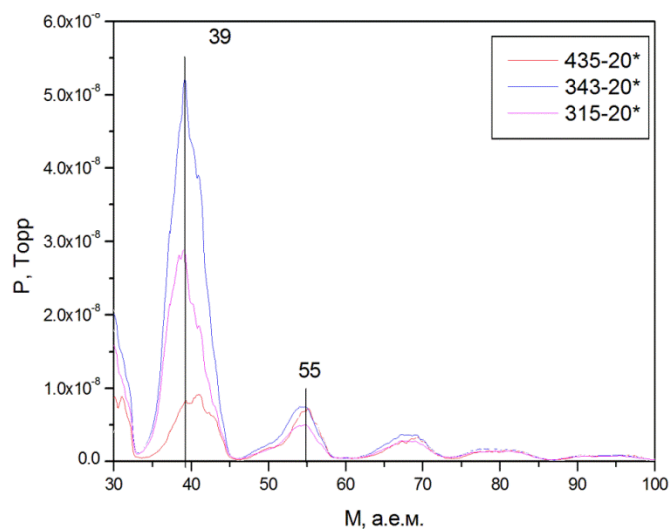


Рис. 9. Участок спектра масс остаточной атмосферы в подкорпусном пространстве микросхем

В результате проведенного анализа спектров установлено, что основными загрязняющими веществами являются азотсодержащие соединения и пары воды. Для устранения паров воды, достаточно выдержать микросхему при 120–130 °С в течение длительного времени. Удаление азотсодержащих соединений требует отжига микросхемы при температурах, близких к 160 °С. Показано, что спектры для различных неисправностей по частоте тоже различаются. Высокое содержание в остаточной атмосфере образца №343 пропаргила и пропаргилового спирта, возможно, является причиной отсутствия генерации рабочей частоты КРТ. Конкретный ответ может дать эксперимент, целью которого является выявление подобной закономерности.

Библиографический список

1. Орлов В. И., Федосов В. В. Качество электронной компонентной базы – залог длительной работоспособности космических аппаратов // Решетневские чтения / Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнева (Красноярск). 2013. С. 238–241.
2. Lowry R. K., Kullberg R. C., Rossiter D. J. Harsh environments and volatiles in sealed enclosures // Surface Mount Technology Association International Technical Conference, October 24-28, 2010, Orlando, FL, PP. 380–386.
3. Федичкин И. Л., Тюкальцев Р. В., Романов П. А. [и др.] Новый методологический подход к контролю качества электронной продукции для космических систем с использованием масс-спектрометрического комплекса МКМ-1. 2013. С. 1–11. URL: <http://www.spectromass.ru/publikatsii/>
4. Федичкин И. Л., Тюкальцев Р. В., Никитина Т. А. Масс-спектрометрический метод определения концентрации паров воды в подкорпусном пространстве. Комплекс МКМ-1 // Труды первой Российско-Белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной конференции». 2013. С. 217–220.
5. URL: <http://www.nist.gov/srd/chemistry.cfm>
6. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0527.html>

УДК 533.9.01

В.И. Струнин, Д.Б. Карабаева, Г.Ж. Худайберген

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

КИНЕТИКА ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА АРГОН-АЗОТ-АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАЗМЫ

Аннотация.Целью исследования функции электронов по энергиям (ФРЭЭ) является определение транспортных коэффициентов и коэффициентов скоростей плазмохимических процессов аргон-азотной плазмы с примесью паров алюминия. В данной работе проведено моделирование кинетики электронного газа плазмы газового разряда с различным содержанием аргона в смеси аргон–азот–алюминий. Установлено, что даже небольшая добавка аргона (5%) в разряд увеличивает температуру электронного газа, а при равном количестве аргона и азота дает прибавку к средней энергии электронов на 2–2.5 эВ. Результаты данного моделирования могут быть использованы при получении тонких пленок нитрида алюминия.

Ключевые слова: ФРЭЭ, нитрид алюминия, плазма, кинетика электронов.

Нитрид алюминия имеет ряд привлекательных физических свойств, таких как высокая прочность, теплопроводность, высокая диэлектрическая константа, а также высокая

стойкость к едким химикатам. Благодаря таким свойствам тонкие пленки AlN находят свое применение в микроэлектронной промышленности как низлежащий вспомогательный слой в изготовлении оптических устройств на основе AlGaIn[1]. Данные по кинетике взаимодействия Al с N₂ немногочисленны и не позволяют составить полного представления о закономерностях протекания реакции[2]. Моделирование кинетики электронного газа является эффективным средством исследования механизмов роста пленок нитрида алюминия и позволяет оптимизировать соответствующие технологические процессы.

На основе программы Kinetica[3] получены константы скоростей электронно-индуцированных процессов и определены транспортные коэффициенты, информация о которых существенна для определения состава плазмы и процессов переноса. Для определения ФРЭЭ была использована программа решения кинетического уравнения Больцмана, в которой выбран и использован способ, основанный на разложении функции распределения по сферическим гармоникам [4].

На рис.1 представлены сечения рассеяния электронов на N₂, основной вклад в диссипацию энергии электронов вносят колебательные и электронно-возбужденные уровни азота [5]. Особое внимание уделялось сечению диссоциации N₂, поскольку в реакции синтеза нитрида алюминия участвует именно атомарный азот. На рис.2 представлено полное сечение диссоциации N₂.

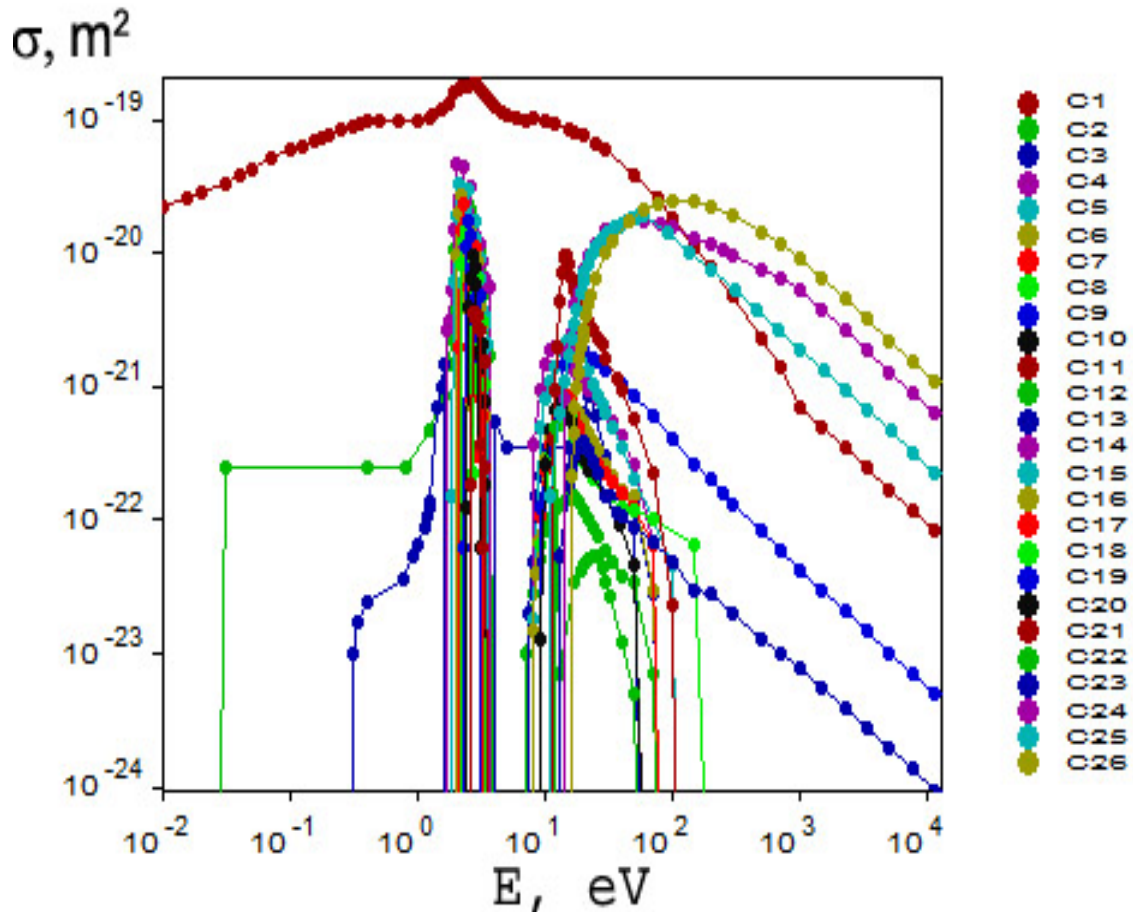


Рис.1. Сечения рассеяния молекулярного азота от энергии электронов

При этом следует отметить, что диссоциация N₂ объясняется преддиссоциацией из всевозможных электронно-возбужденных состояний, в силу высокого порога процесса. В области энергии электронов $E=10-13$ эВ основной вклад дает преддиссоциация из состояния $a^1\Pi_g$, а при $E>13$ эВ из $b^1\Pi_u$ и синглетных ридберговских состояний с $\Delta E>13$ эВ [6].

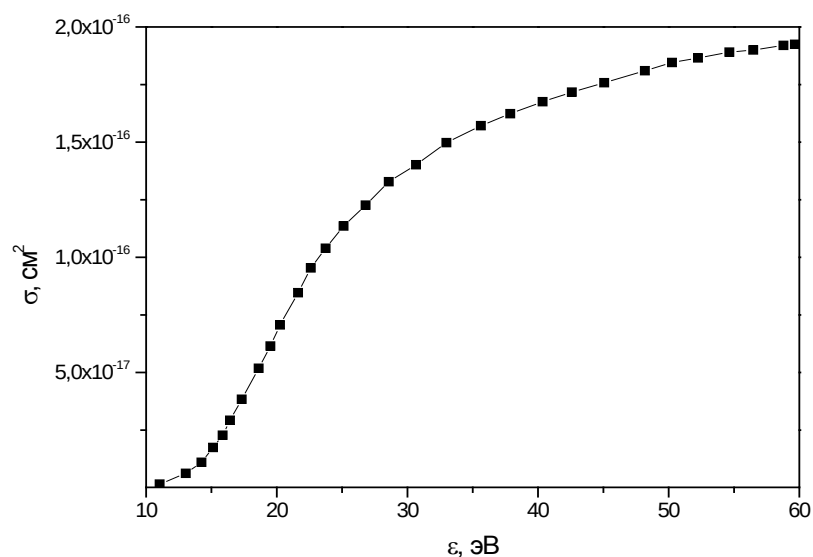


Рис.2. Полное сечение диссоциации молекулярного азота

На рис.3 представлены ФРЭЭ для азот-алюминиевой плазмы разряда постоянного тока в диапазоне давлений от $P=0.1-0.5$ Torr ($E=100\text{В/см}$). Видно, что с ростом давления доля высокоэнергетичных электронов снижается, а максимум распределения смещается в область низких энергий. Поскольку средняя энергия газовых разрядов обычно невелика, порядка 3–4 эВ, то энергии электронов будет недостаточно для эффективной диссоциации азота, кроме этого, для магнетронного распыления необходимо участие частиц с большей массой, имеющих большие коэффициенты распыления по сравнению с ионами азота. Чаще всего в качестве такого газа используют аргон [7]. Кроме того, аргон обладает метастабильными состояниями (11,5 эВ), через которые возможна диссоциация азота через сверхупругие соударения с электронами, а также разбавление аргоном позволит повысить среднюю энергию электронов [8].

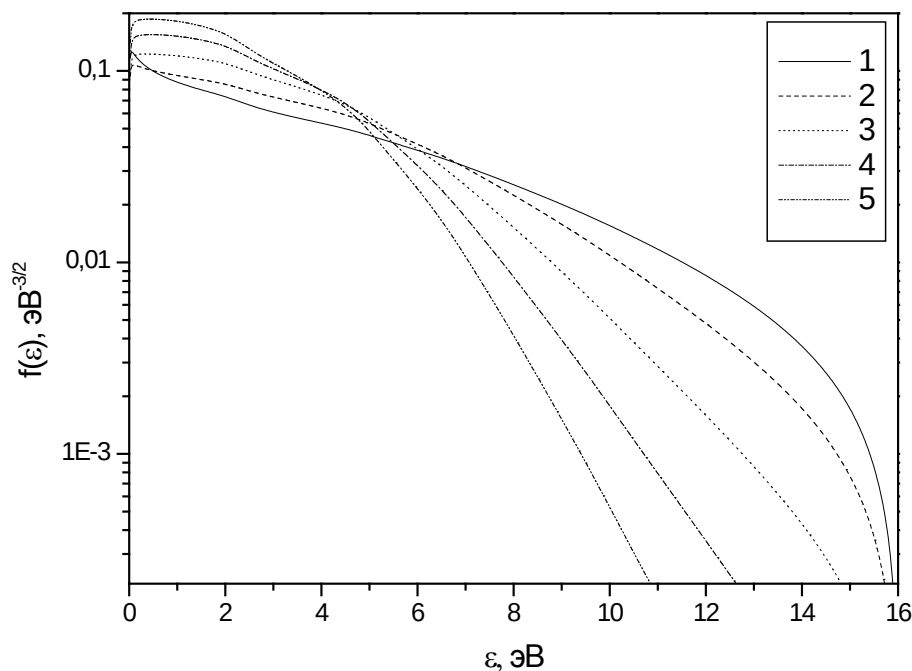


Рис.3. ФРЭЭ азот-алюминиевой плазмы.
1 – $P=0.1$ Torr, 2 – 0.2, 3 – 0.3, 4 – 0.4, 5 – 0.5

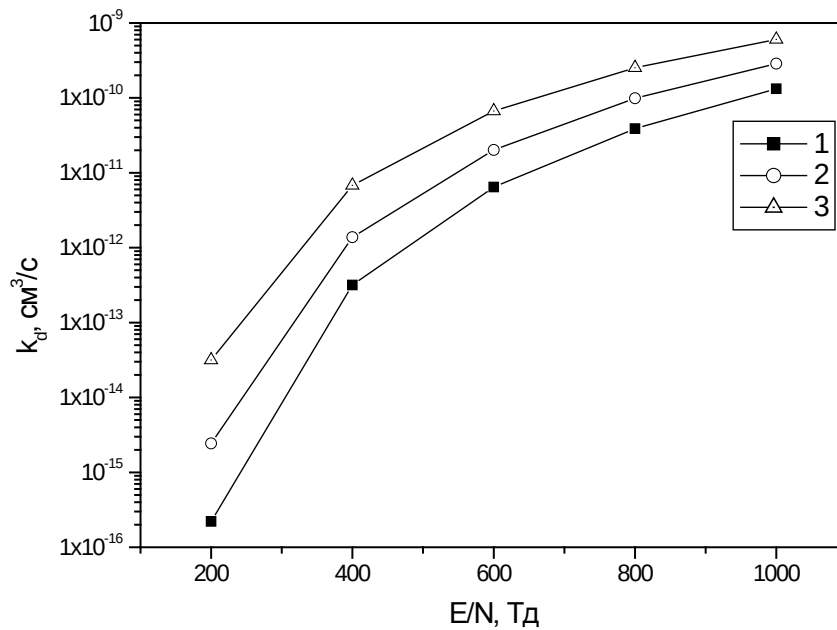


Рис. 4. Константа скорости диссоциации азота в смеси:
1 – 50%N₂-Al, 2 – 25%N₂-25%Ar-Al, 3 – 45%N₂-5%Ar-Al

На рис. 4,5 представлены константа скорости диссоциации азота и температуры электронов от различного газового состава. Хорошо видно, что даже небольшая добавка аргона (5%) в разряд увеличивает T_e , а при равном количестве аргона и азота дает прибавку к средней энергии на 2-2.5 эВ. Увеличение доли аргона (см. рис.6) в смеси от 5% до 25% ведет к росту константы скорости диссоциации, значительный рост (на 2 порядка) отмечается в области низких значений приложенного поля ($E/N < 600$ Td), что объясняется высокой эффективностью передачи возбуждения через метастабильные состояния аргона. Это хорошо видно на рис. 7, увеличение доли аргона в смеси значительно увеличивает скорость возбуждения Ar_m , что повышает вероятность диссоциации N₂ через эти состояния, тем самым увеличивая эффективность синтеза нитрида алюминия.

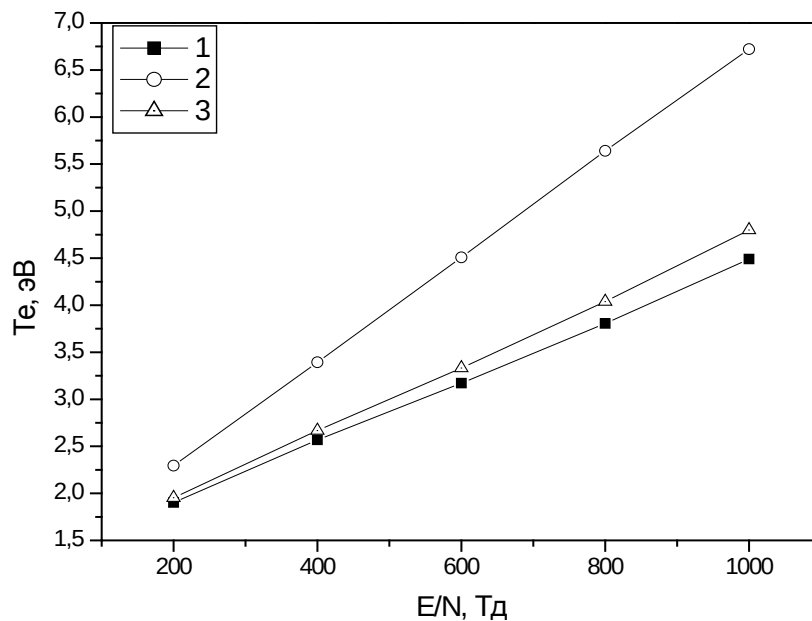


Рис.5. Температура электронов в смеси:
1 – 50% N₂-Al, 2 – 25% N₂-25% Ar-Al, 3 – 45% N₂-5% Ar-Al

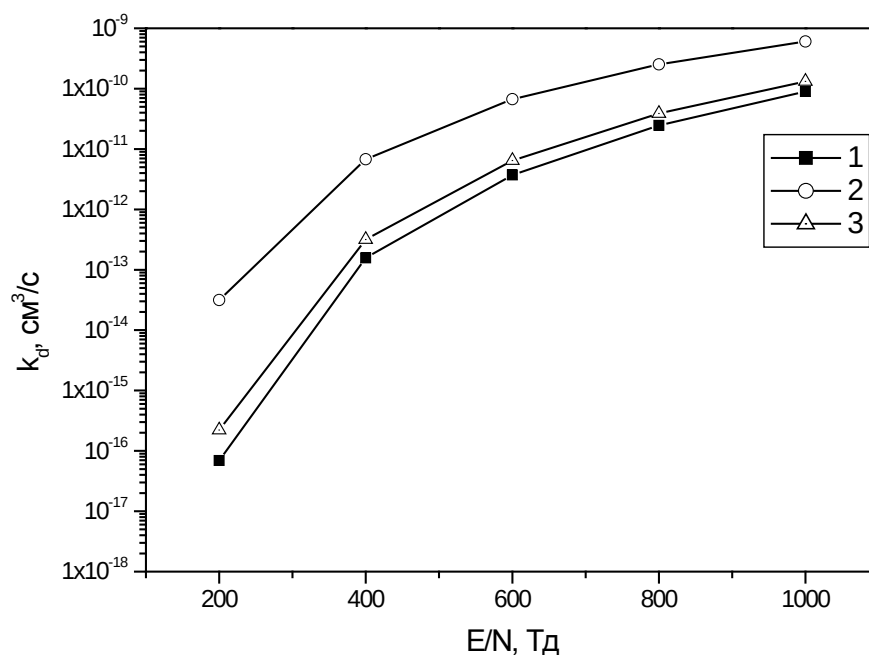


Рис.6. Константа скорости диссоциации азота при разной концентрации аргона в смеси азот–алюминий–аргон. 1 – 5% Ar, 2 – 15%Ar, 3 – 25%Ar

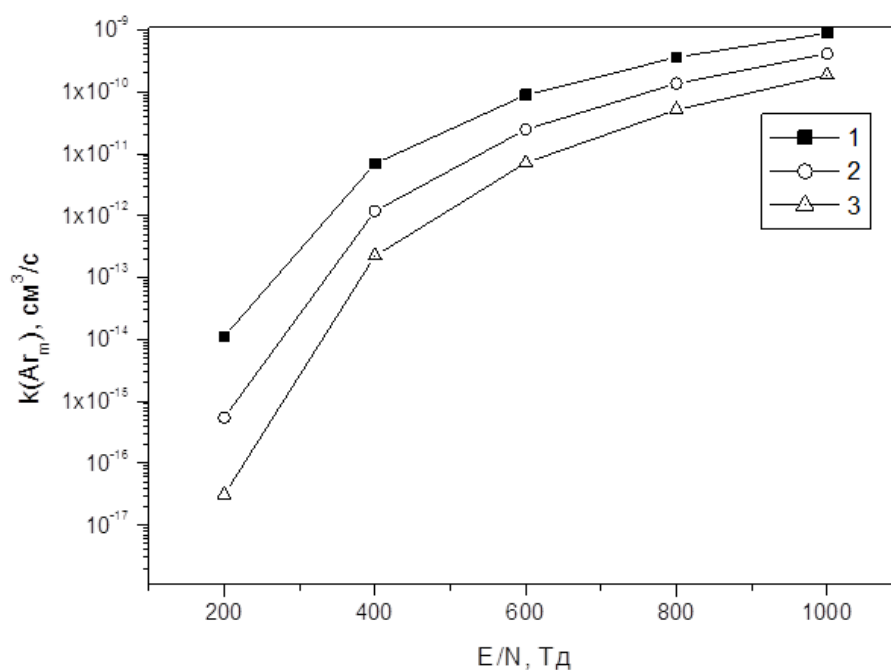


Рис. 7. Константа скорости возбуждения метастабильного состояния аргона для разной концентрации аргона в смеси. 1 – 25%Ar, 2 – 15%Ar, 3 – 5%Ar

Библиографический список.

1. Trolrier-McKinstry S., Muralt P. Thin Film Piezoelectrics for MEMS // Journal of Electroceramics (2004), Volume 12(1), pp 7–17.
2. Словецкий Д. И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М.: Наука, 1980. 310 с.
3. Ляхов А. А., Худайбергенов Г. Ж. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001611223 «Kinetica» (2001).

4. Смит К., Томпсон Р. Численное моделирование газовых лазеров // М.: Мир, 1981. 130 с.
5. Phelps A. V., Pitchford L. C. Anisotropic scattering of electrons by N₂ and its effect on electron transport // Phys. Rev. A 31, 2932 (1985).
6. Полак Л. С. Моделирование и методы расчета физико-химических процессов в низкотемпературной плазме. – М.: «Наука», 1974. 38с.
7. Yamabe C., Buckman S. J., Phelps A. V. Measurement of free-free emission from low-energy-electron collisions with Ar // Phys. Rev. A 27, 1983, 1345.
8. Auger M. A., Vázquez L., Sánchez O. [et al.] Growth dynamics of reactive-sputtering-deposited AlN films // J. Appl. Phys. 97, 123528 (2005).

УДК 372.853:355.23

Н.А. Толмачева, Е.В. Шлякова

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ ИНОСТРАННЫМ ВОЕННОСЛУЖАЩИМ В ВОЕННОМ ВУЗЕ

Аннотация. В статье рассматривается проблема методики преподавания физики в военных вузах иностранным военнослужащим, описаны методические подходы к проведению лекционных, практических и лабораторных занятий, показаны роль интерактивных методов и средств обучения в процессе формирования предметных знаний и компетенций, обоснован комплексный и системный подход к управлению обучением иностранных военнослужащих при проведении занятий по физике, позволяющий индивидуализировать и дифференцировать процесс обучения, сделать интересной образовательную деятельность для обоих участников этого процесса.

Ключевые слова: обучение физике, методика преподавания физики, иностранные военнослужащие, военные вузы.

Профессиональная подготовка иностранных военнослужащих в российских военных вузах является важным направлением военно-технического сотрудничества Министерства обороны Российской Федерации с зарубежными странами. Подготовка и обучение иностранных специалистов осуществляется по тем же специальностям, по которым осуществляется подготовка российских военнослужащих. Разница лишь в объеме и качестве передаваемой им информации.

Важной особенностью подготовки иностранных военнослужащих является то, что весь учебный процесс с ними планируется и проводится дифференцированно, с учетом национального состава обучаемых, уровня их довузовской подготовки.

В Омском автобронетанковом инженерном институте (ОАБИИ) обучаются иностранные военнослужащие ближнего и дальнего зарубежья. Обучение зарубежных специалистов в ОАБИИ имеет свои организационные, содержательные и методические особенности и осуществляется на основании заключенных Минобороны России контрактов с зарубежными партнерами. Обучение иностранных специалистов является целенаправленным и систематическим педагогическим процессом взаимодействия главного командования, руководящего и преподавательского состава вуза и стран-заказчиков по высококачественной подготовке специалистов заказчика к будущей профессиональной деятельности. Большое внимание уделяется инновационным технологиям, но инновационная деятельность

невозможна без фундаментальной естественнонаучной и математической подготовки, поэтому дисциплинам естественнонаучного цикла уделяется большое внимание.

Иностранные военнослужащие изучают физику на русском языке. В соответствии с целями, особенностями содержания учебного материала, современными требованиями к фундаментальным дисциплинам, методами и средствами обучения выбираются организационные формы обучения. Традиционно в высшей школе основными организационными формами занятий являются: лекции, практические занятия, лабораторные работы. Лекция в вузе занимает ведущее место в учебно-воспитательном процессе. Она способствует активизации мышления, пробуждает интерес к приобретению знаний, к самостоятельной деятельности, способствует рождению творческого начала. От организации лекционного занятия зависит эффективность решения проблемы формирования системы знаний и компетенций.

Для повышения эффективности обучения лекционные потоки иностранных обучающихся не превышают 25 человек, при чтении лекций учитывается:

1) возможность демонстрировать физические приборы, явления, законы. В работе с иностранными военнослужащими опора на образы – это наиболее верный и надежный способ подачи учебной информации, особенно на начальном этапе. Использование картинок, плакатов, демонстрационного эксперимента активизирует зрительную память, дает пространственное представление об изучаемом. Использование слайдовых демонстраций и видеоматериалов на лекционных занятиях позволяет более наглядно продемонстрировать различные процессы в природе и технике. Видеоролики в сочетании со звуковым сопровождением подключают к процессу запоминания и слуховую память, воздействуют на эмоциональную сферу сознания, вызывают размышления, формируют вопросы, что в целом активизирует познавательную деятельность иностранных военнослужащих. Особенно важно их применение в тех случаях, когда нельзя осуществить прямой эксперимент. Примером может служить демонстрация с помощью средств мультимедиа кинетических процессов в газах, молекулярных явлений в жидкостях, квантовых явлений в микромире и т.п. Моделирование позволяет продемонстрировать и исследовать основные свойства физических объектов, выяснить границы применимости той или иной теории. Такое комплексное воздействие на разные виды памяти формирует в разных отделах коры головного мозга общую картину, состоящую из множества информационных блоков и связей между ними. В момент «выпадения» одного из блоков в процессе забывания, общая картина сохраняется и восстанавливается в памяти гораздо легче, если она состоит из большого количества информационных единиц;

2) важность и полезность использования средств мультимедиа. Средства мультимедиа экономят аудиторное время, визуализируют учебный материал, повышают заинтересованность и мотивацию иностранных военнослужащих, разнообразят учебный процесс, задействуют все виды памяти и, возможно, приносят еще массу положительных моментов в учебный процесс. Мультимедийное компьютерное сопровождение лекций выполнено для всего курса физики по разделам «Физические основы механики», «Статистическая физика и термодинамика», «Электричество и магнетизм», «Физика колебаний и волн», «Элементы атомной и квантовой физики». Мультимедиа-лекции представлены в виде презентаций, состоящих из последовательных слайдов, отражающих законченный фрагмент («порцию», «квант» учебного материала). Распечатав слайды презентаций, можно получить раздаточный материал для курсантов – своеобразные опорные конспекты для иностранных военнослужащих;

3) возможность в любое время вернуться к изученному материалу для напоминания, уточнения логических и математических связей; преподнесение информации в виде таблиц и схем с целью ее систематизации. При систематизации реализуются такие мыслительные операции как анализ и синтез, сравнение и классификация, при этом иностранные военнослужащие выделяют сходства и различия с выбранными признаками или основаниями, устанавливают причинно-следственные связи, сущностные отношения между

объектами и явлениями. В процессе систематизации знаний устанавливаются смысловые и причинно-следственные связи. Анализ таблиц, схем, опорных конспектов показывает, что в основном они представляют логику изучаемой теории и ее содержание в частично сокращенном и закодированном виде, что, безусловно, является шагом вперед по сравнению с традиционным изучением;

4) наличие комплексного методического обеспечения курса, включающего в себя курс лекций в твердой копии, а также в компьютерном варианте (курс лекций и/или учебное пособие, адаптированное для иностранных военнослужащих). Накануне лекции иностранным военнослужащим выдается бумажный вариант конспекта лекции, содержащий наиболее важные моменты учебного материала. Такие материалы позволяют обучающимся самостоятельно подготовиться к лекции, посмотреть незнакомые слова, вспомнить необходимый материал из других дисциплин. Читать классические лекции иностранным военнослужащим на первом курсе труднее, чем русскоязычным, так как преподавателю приходится больше работать на доске, больше писать предложений. Но цель оправдывает средства. По истечении некоторого времени иностранные военнослужащие овладевают навыками конспектирования устной речи преподавателя, что стимулирует развитие у самих военнослужащих навыков не только письменной, но и устной речи [1].

Исходя из принципа учета уровня владения языком обучения и особенностей преподавания физики иностранным военнослужащим, наиболее продуктивными являются активные формы обучения, а именно: выполнение упражнений, лабораторные работы, составление таблиц, беседы и дискуссии, работа с книгой. Такие пассивные формы, как рассказ, лекция, наблюдение не являются результативными и должны иметь место лишь в конце изучения курса физики. Гармоничное сочетание индивидуальной, групповой, парной, фронтальной и коллективной форм обучения является необходимым условием качественной естественнонаучной подготовки иностранных военнослужащих [2].

Практическое занятие – форма учебного занятия, в рамках которой преподаватель организует детальное рассмотрение обучающимися отдельных теоретических положений учебной дисциплины и формирует умения и навыки их практического применения. Для иностранных военнослужащих наиболее продуктивными формами занятий являются именно практические занятия, поэтому они требуют особого внимания. Методика подготовки и проведения практических занятий должна быть различна в зависимости от промежуточных целей и этапа обучения иностранных военнослужащих. Это предполагает продуманную подготовку преподавателя к практической работе. Речь идет о пересмотре программы, учебника, пособий, инструкций и методических разработок по теме занятия, что позволяет преподавателю уточнить содержание учебного материала и контрольных вопросов, адаптировать учебно-методический материал до уровня каждой конкретной группы, учесть национально-культурные особенности обучающихся, внести в работу элементы нового.

Повторение изученного материала является особенно важным в работе с иностранными военнослужащими при проведении практических занятий. Поскольку военнослужащие учатся на неродном языке, на практических занятиях как можно чаще должна повторяться новая лексика, чтобы она перешла в активный словарный запас обучающихся. При повторении используются различные формы учебной деятельности: письменные индивидуальные задания, работа в парах (вопрос-ответ), диалог с преподавателем, когда педагог ставит вопрос каждому обучающемуся, учитывая его языковые возможности и общий уровень подготовки, диктанты, работа с книгой, компьютерные тренировочные упражнения и т.п.

Выбор формы проверки заданий опирается на национальные особенности обучающихся. Так, известно, что вьетнамским и лаосским военнослужащим сложнее даются устные задания, они трудно воспринимают на слух русский язык, поэтому именно этот момент необходимо отрабатывать, но в очень медленном темпе, с постепенным наращиванием сложности. Арабские студенты, наоборот, в большинстве с легкостью справляются с устными заданиями, однако письменные выполняют очень невнимательно и

небрежно. Привлечение большого количества арабских студентов к дискуссии по причине их национальной психологической возбудимости может перерасти в конфликт, и преподаватель рискует потерять контроль над аудиторией. Поэтому такие формы учебной деятельности в арабской аудитории рекомендуется ограничить и проводить под усиленным контролем преподавателя. При повторении пройденного материала очень хорошо давать иностранным военнослужащим разные по сложности задания, учитывая их языковые способности и уровень общенаучной подготовки [3]. Кроме того, при повторении вскрываются пробелы в знаниях, что дает информацию преподавателю для планирования и структурирования дальнейших занятий.

Значимым для успешного проведения практических занятий является подготовка и применение методических разработок (карты, схемы, слайды, презентации, материалы с применением информационных коммуникативных технологий и т.п.), которые позволяют осуществить индивидуальный подход к обучению иностранных военнослужащих.

Лабораторная работа – форма учебного занятия, при которой иностранный военнослужащий под руководством преподавателя проводит реальные или имитационные эксперименты, опыты с целью подтверждения отдельных теоретических положений конкретной учебной дисциплины, приобретает практические навыки работы с лабораторным оборудованием, вычислительной техникой, измерительной аппаратурой, методикой экспериментальных исследований. Основными задачами лабораторных занятий являются: углубление и конкретизация знаний, полученных ранее; формирование интеллектуальных умений, навыков планирования лабораторного эксперимента, анализа и обобщения его результатов, овладение навыками работы с приборами и лабораторным оборудованием и т.п.

Качество проведения конкретного лабораторного занятия зависит от его подготовки, которая включает: глубокое изучение иностранными военнослужащими теоретического материала, подготовку необходимой учебно-методической базы и документации инструкций, методических разработок и т.д.; подготовку преподавателя, вспомогательного персонала.

Успех лабораторного занятия зависит не только от материального его обеспечения, но и от организации, методики и инструкции к его проведению. Учитывая специфику подготовки иностранных военнослужащих, целью лабораторных работ является не только углубление, уточнение теоретических знаний по дисциплине и формирование практических умений и навыков, но и усвоение специальной лексики, необходимой для выполнения лабораторных работ в дальнейшем (названия лабораторного оборудования, химической посуды; лексика, необходимая для описания проведения работы и т.п.). Особое место занимают виртуальные лабораторные работы, которые позволяют охватывать больший объем экспериментального материала, что повышает точность и обоснованность оценки результатов экспериментов, позволяют моделировать реальные физические явления и процессы.

Практические и лабораторные занятия проводятся небольшими группами по 8-10 человек, что позволяет преподавателю уделять больше внимания каждому обучающемуся.

Но, несмотря на то что иностранным военнослужащим создаются благоприятные коммуникативные условия, у них возникает ряд трудностей при изучении физики:

- большой объем физических (специальных) терминов;
- проблемы, связанные с речевой деятельностью (русский как иностранный).

Для облегчения подготовки к занятиям для иностранных военнослужащих в локальной сети размещается интерактивный учебный курс по физике, включающий теоретический материал, алгоритм решения задач, натурные и виртуальные демонстрации, тестовые задания. Данный курс используется преподавателями при чтении лекций, на практических и лабораторных занятиях, а обучающимся – для самостоятельной работы. Дидактический материал, представленный в виде интерактивного курса, помогает иностранным военнослужащим при подготовке к сдаче рубежных контролей, выполнении лабораторных работ и индивидуальных заданий.

Используемая система, хотя и требует от обучающихся и преподавателей дополнительных усилий и затрат времени, позволяет развивать речевую деятельность иностранных военнослужащих и способствует их успешному обучению в вузе.

Таким образом, комплексный и системный подход к управлению обучением иностранных военнослужащих при проведении занятий по физике позволяет повысить качество предоставляемых образовательных услуг, индивидуализировать и дифференцировать процесс обучения, корректировать действия в зависимости от полученных результатов, а также сделать интересной образовательную деятельность для обоих участников этого процесса.

Библиографический список

1. Косарева И. А., Новичкова Н. Н., Шилова Т. В. О специфике методики преподавания физики иностранным студентам на подготовительном факультете // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 116. С.66–69.

2. Макиенко А. В. Физика и физические термины в системе предвузовской подготовки иностранных студентов // Методология обучения и повышения эффективности академической, социально-культурной и психологической адаптации иностранных студентов в российском вузе: теоретические и прикладные аспекты: материалы Всероссийского семинара. Томск, 2008. Том 1. С. 251–253.

3. Капитонова Т. И., Кутузова Г. И., Стародуб В.В. Методические рекомендации по обучению иностранных студентов общеобразовательным дисциплинам на русском языке (этап предвузовской подготовки). СПб.: СПбГТУ, 1996. 26 с.

УДК 536.2

А.В. Тюкин¹, С.В. Бирюков^{1,2}, Л.В. Тюкина²

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

²Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БИНАРНЫХ СИСТЕМ МЕТАЛЛ–МЕТАЛЛ

Аннотация. Эффективная защита металлических конструкций в различных отраслях промышленности является актуальной задачей. Одним из способов защиты металла является способ нанесения на металл тонкопленочных металлических покрытий. Данный метод изменения свойств поверхности материала является более дешевым, чем использование цельных материалов с необходимыми свойствами. При нанесении покрытий можно создать материал, который будет отличаться по свойствам от своего предыдущего состояния без покрытия.

Известно, что срок службы металлических тонкопленочных покрытий зависит от адгезионной прочности с подложкой. Анализ экспериментальных исследований показывает, что на адгезию большое влияние оказывает температура, поэтому знание о тепловой напряженности и температурном градиенте в бинарных системах металл–металл позволит создать необходимые условия для увеличения их долговечности.

Ключевые слова: бинарные системы, металлические покрытия, температурное поле, теплопроводность.

Процесс теплопроводности неразрывно связан с распределением температуры в теле или системе. Возникающее в теле или системе температурное поле является совокупностью значений температуры во всех точках тела в данный момент времени и математически описывается уравнением:

$$t = f(x, y, z, m). \quad (1)$$

Явление теплопроводности в твердых телах характеризуется плотностью теплового потока q , пропорциональной градиенту температуры и коэффициенту теплопроводности вещества λ [1]:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad (2)$$

Решение задачи, связанной с распределением температуры при стационарном режиме, сводится к расчету распространения теплоты через бинарную систему, состоящую из двух разнородных материалов (рис.1), имеющих толщины δ_1 и δ_2 ; коэффициенты теплопроводности λ_1 и λ_2 [2].

Если коэффициент теплопроводности не зависит от температуры, то распределение температуры в системе металл–металлическое покрытие изменяется линейно, а при рассмотрении системы в целом – температурная кривая представляет ломаную линию [3]. Более значительно температура меняется в слое металла с меньшей теплопроводностью. На рис.1 представлена система, у которой коэффициент теплопроводности металлической пленки λ_2 больше коэффициента теплопроводности металлической конструкции λ_1 . Такое распределение температуры наблюдается, например, для системы сталь–медь (для стали $\lambda_1 = 52 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$, для меди $\lambda_2 = 380 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$). Однако, учитывая, что металлическое покрытие имеет малую толщину, размеры которого не превышают 100 мкм, можно допустить, что температура покрытия будет равна температуре верхнего слоя стальной подложки.

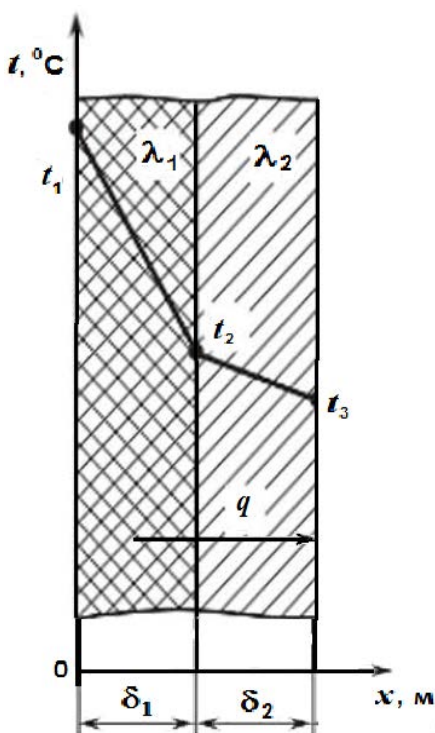


Рис.1. Бинарная система металл–металлическое покрытие

Стоит отметить, что опытные данные указывают на возрастание коэффициента теплопроводности λ для большинства металлов с повышением температуры, а зависимость $\lambda(t)$ описывается уравнением вида:

$$\lambda = \lambda_0(1 + b \cdot t), \quad (3)$$

где λ_0 – значение коэффициента теплопроводности при $t = 0$ °C; b – постоянная, определяемая опытным путем.

С учетом зависимости коэффициента теплопроводности λ от температуры, уравнение температурной кривой будет иметь вид:

$$t_x = -\frac{1}{b} + \sqrt{\left(\frac{1}{b} + t_1\right)^2 - \frac{2qx}{b\lambda}} \quad (4)$$

Но даже с учетом уравнения (3) погрешность результата изменения температуры в системе незначительна.

Предложенный стандартный метод расчета позволяет определить изменение температуры в системе металл–металлическое покрытие, но он имеет ряд недостатков. Например, метод не учитывает такие факторы как возникновение в бинарной системе поля механических напряжений и деформаций [4]. Указанный тип задачи является сложным для аналитического решения, а его экспериментальная реализация в некоторых случаях требует больших затрат. Поэтому для решения такой задачи очень часто используют компьютерное моделирование.

Рассмотрим решение вышеприведенной задачи с помощью программы ANSYS, которая относится к классу сложных систем и имеет расширенные вычислительные возможности. Программа была использована для проектирования и расчета, связанного междисциплинарного анализа Steady-StateThermal – StaticStructural, в основе которой лежит метод конечных элементов МКЭ [5].

На рис.2 представлено окно анализа, включающее в себя геометрическую модель, модель и настройки термического анализа и связанного с ним окна настроек статического анализа.

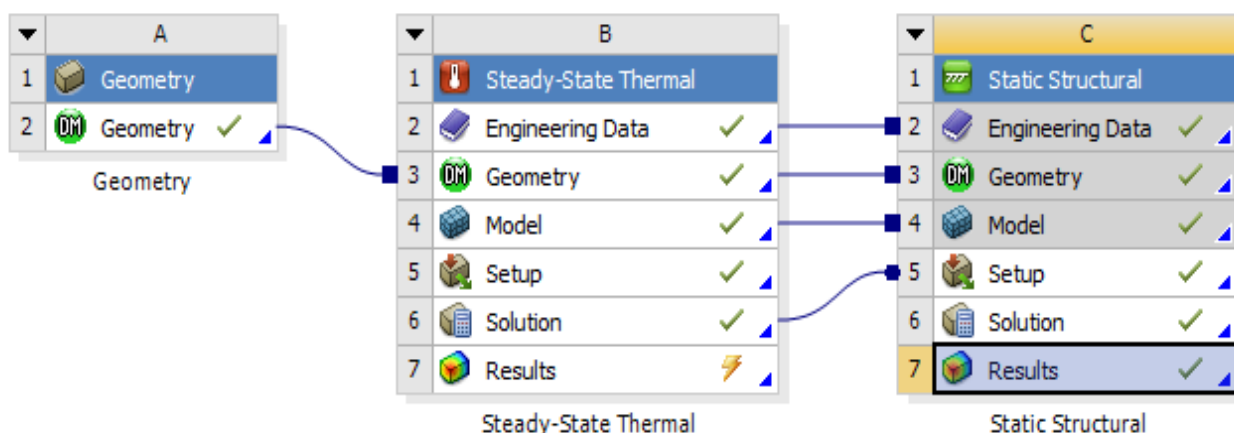


Рис. 2. Окно анализа Steady-State Thermal – Static Structural

Приведем пример расчета температурного поля в бинарной системе сталь–медь. В качестве начальных условий были выбраны следующие параметры: размер стальной пластины составлял 100x100x10мм, размер медного покрытия – 100x100мм при толщине покрытия 100 мкм, медная пластина охлаждалась конвекционным потоком воздуха, температура окружающей среды составляла 25 °C, а приложенная температура к нижней грани стальной подложки 200 °C.

На рис. 3 представлено окно программы анализа Steady-StateThermal. Вид температурного поля подтверждает правильность вывода о том, что покрытие в силу малой толщины имеет такую же температуру, что и верхние слои стальной подложки.

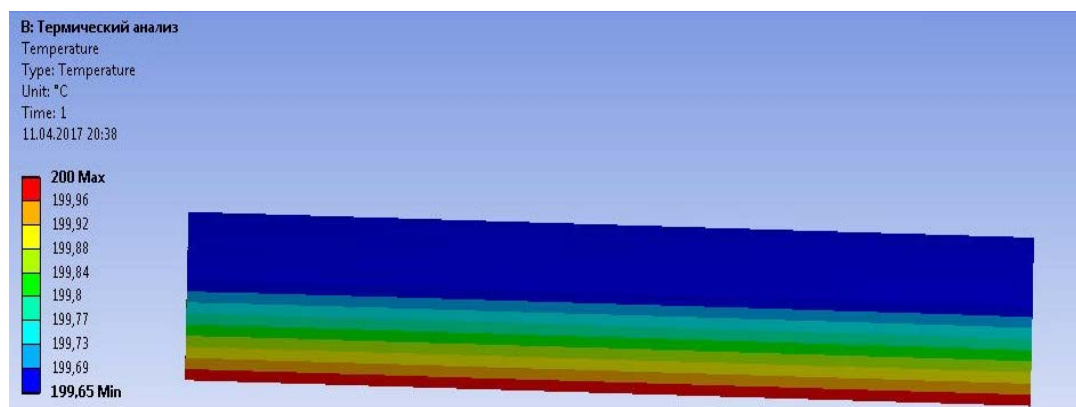


Рис. 3. Распределение температуры в системе сталь–медь

Результаты проведенного связанного анализа свидетельствуют о сложном характере взаимодействия системы покрытие–подложка [6]. Изменяющаяся со временем температура действительно оказывает влияние на такие характеристики как механическое напряжение и деформация. На рис. 4 представлена деформация и механическое напряжение в бинарной системе.

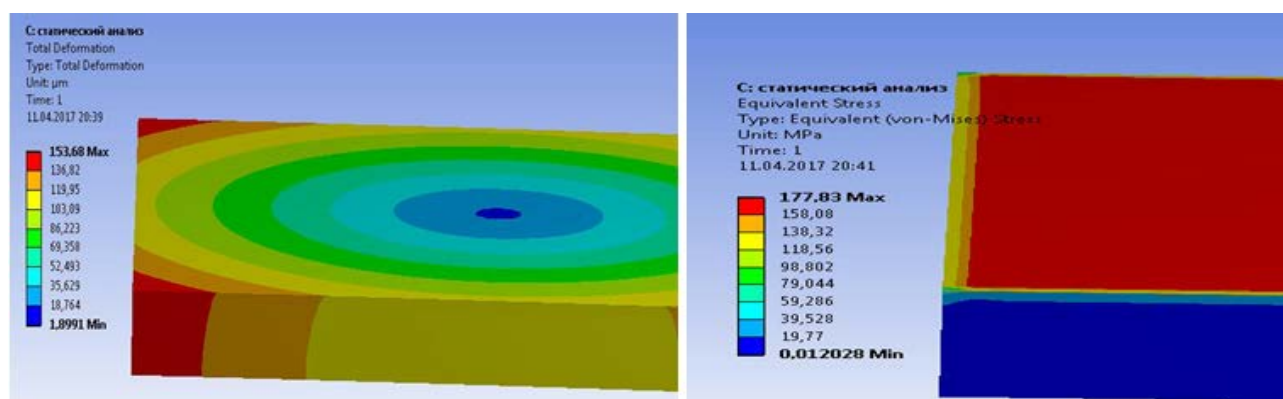


Рис.4. Объемная деформация и механическое напряжение в бинарной системе сталь-медь

Наглядное представление связанного междисциплинарного анализа Steady-StateThermal – StaticStructural дает ряд преимуществ, одним из которых является возможность определения адгезионной прочности. Сравнивая значения допустимого напряжения материала покрытия с полученным расчетным напряжением, можно делать выводы о запасе прочности, качестве и надежности такой бинарной системы.

По результатам анализа можно сделать следующие выводы:

1. Распределение температуры в системе сталь–медное покрытие, полученное с помощью программы ANSYS, имеет линейный характер, также как и в предложенном выше стандартном методе расчета. Исходя из этого, для оперативного расчета распределения температуры в системе можно воспользоваться формулой (4).

2. Примененный статический анализ для расчета деформаций в системе показывает, что минимальное значение деформации приходится на центральную часть системы сталь–медное покрытие и увеличивается по направлению к внешним границам системы.

3. Результаты анализа механического напряжения показывают, что, независимо от характера распределения деформации в системе, максимальное напряжение приходится на медное покрытие.

4. Сравнивая допустимое напряжение на растяжение (сжатие) для меди, равное 110 МПа, с расчетным значением механического напряжения 177,83 МПа (рис.4), можно сделать вывод о том, что при данных условиях эксперимента произойдет отслоение медного покрытия.

Библиографический список

1. Плотников А. В. Моделирование процесса теплопроводности полосы высокотемпературного металла // Современная металлургия нового тысячелетия. 2015. С. 237–241.
2. Белолипецкий В. М., Пискажова Т. В., Портянкин А. А. Модель скоростного конвективного нагрева металла для использования в алгоритмах АСУТП // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2016. №3. С. 544–561.
3. Мажукин В. И., Шапранов А. В. Математическое моделирование процессов нагрева и плавления металлов. Часть 1. Модель и вычислительный алгоритм // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. № 31. С.1–27.
4. Мурашов М. В., Панин С. Д. Особенности численного решения задачи контактного деформирования шероховатых тел в ANSYS // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 1. С. 129–142.
5. Иванок В. А., Еркаев Н. В. Анализ упругих деформаций в подшипнике скольжения // Фундаментальные исследования. 2015. № 6(2). С. 241–245.
6. Медникова В. А., Плешивцева Ю. Э. Моделирование процесса непрерывного индукционного нагрева металла в программном пакете ANSYS // Наука, технологии, инновации: матер.Всероссийской научной конференции молодых ученых /минобрнауки России. Новосибирский государственный технический университет. 2013. С. 127–131.

УДК 539.16

М.В. Чушнякова¹, И.И. Гончар^{1,2}, Р.А. Кузякин³

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

³Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПАДА МЕТАСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

Аннотация. В работе представлены результаты компьютерного моделирования распада метастабильного состояния, выполненного с помощью двух методов: 1) численного решения уравнения Фоккера-Планка и 2) численного решения стохастических дифференциальных уравнений. Проведено сравнение временной эволюции скоростей распада и их квазистационарных значений. Обсуждаются преимущества и недостатки этих двух методов моделирования.

Ключевые слова: распад метастабильного состояния, броуновское движение, уравнение Фоккера-Планка, стохастические дифференциальные уравнения.

Что может быть общего между делением атомных ядер в реакторе под действием нейтронов, диссоциацией молекул, ростом коллоидной частицы в насыщенном растворе и проводимостью джозефсоновского перехода? А между тем, для описания всех этих явлений используется одна и та же модель: тепловой распад метастабильного состояния. Это один из случаев броуновского движения (в обобщённом смысле) в поле внешней силы [1-5]. Соответствующая модель представляет собой невзаимодействующие броуновские частицы, находящиеся в потенциальной яме. Эта яма отделена барьером от области, где частиц нет совсем или очень мало. Частицы преодолевают барьер благодаря тепловым флуктуациям.

Основной количественной характеристикой этого явления служит зависящая от времени скорость распада $R(t)$, определение которой выражается формулой

$$R(t) = \frac{1}{N_0 - N(t)} \frac{dN}{dt}. \quad (1)$$

Здесь dN – число частиц, покинувших потенциальную яму за промежуток времени dt , N_0 – начальное число частиц в яме, $N(t)$ – число частиц, покинувших яму к моменту времени t .

Если высота барьера ΔU_b значительно превосходит среднюю энергию теплового движения $k_B T$, то после некоторой релаксации скорость распада достигает квазистационарного значения R_Q . Именно это значение наиболее интересно в приложениях теории (достаточно вспомнить, какую роль играет скорость химических реакций).

Определить значение R_Q можно, моделируя процесс динамически с помощью двух подходов. В первом подходе распад описывается диффузионным уравнением Фоккера-Планка (УФП) [6, 7]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial J_x}{\partial x} - \frac{\partial J_p}{\partial p}. \quad (2)$$

Здесь $\rho(x, p, t)$ – плотность вероятности, которая зависит от координаты x , импульса p и времени, а потоки J_x и J_p определяются выражениями

$$J_p = \left(-\frac{p^2}{2} \frac{dm^{-1}}{dx} - \frac{\eta}{m} p + K \right) \rho - D_p \frac{\partial \rho}{\partial p}, \quad (3)$$

$$J_x = \frac{p \rho}{m}. \quad (4)$$

Здесь m и η – инерционный и фрикционный параметры, которые могут зависеть от координаты [7], K – обобщённая сила (часто говорят «движущая» сила, driving force). D_p – коэффициент диффузии в пространстве импульсов. Когда найдено решение УФП, скорость распада (СР) вычисляется по методу “поток, делённый на населённость” (flux over population):

$$R_{FP}(t) = \frac{1}{m} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} dp p \rho(x_b, p, t) \right] \left[\int_{-\infty}^{+\infty} dp \int_{-\infty}^{x_b} dx \rho(x, p, t) \right]^{-1}. \quad (5)$$

Здесь индекс « b » соответствует барьеру потенциальной энергии.

Во втором подходе динамика процесса описывается стохастическими уравнениями ланжевеновского типа (УЛ) [4, 8-10]

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p^2}{2} \frac{dm^{-1}}{dx} - \frac{\eta}{m} p + K + \Gamma, \quad \frac{dx}{dt} = \frac{p}{m}. \quad (6)$$

Здесь x и p имеют смысл координаты и импульса броуновской частицы; случайная сила $\Gamma(t)$ представляет собой белый шум:

$$\langle \Gamma(t) \rangle = 0, \quad \langle \Gamma(t_1) \Gamma(t_2) \rangle = 2D_p \delta(t_1 - t_2). \quad (7)$$

Скорость распада $R_{LE}(t)$, полученная в данном подходе (будем называть её ланжевеновской СР), вычисляется по формуле (1), технические детали этих вычислений обсуждаются в [11].

Наряду с динамическими подходами, для вычисления квазистационарной скорости распада уже много лет используется приближённая формула Крамерса [1]

$$R_K = \frac{\omega_c}{2\pi\omega_b} \left\{ \left[\frac{\beta^2}{4} + \omega_b^2 \right]^{1/2} - \frac{\beta^2}{4} \right\} \exp\left(-\frac{\Delta U_b}{k_B T}\right). \quad (8)$$

Здесь коэффициент затухания $\beta = \frac{\eta}{m}$, $\omega_{b(c)} = \left[\left(\frac{d^2 U}{dx^2} \right)_{b(c)} / m_{b(c)} \right]^{1/2}$; индекс «с» соответствует дну потенциальной ямы. Точность формулы Крамерса (8) исследовалась неоднократно [2, 4, 10, 12], в некоторых случаях она даёт результат, отличающийся от точного (динамического) на 20-40%.

В данной работе нас интересует соотношение между R_K , R_{LEQ} и R_{FPQ} . Мы рассматриваем простейший случай, когда потенциал гладко сшит из двух парабол, а транспортные коэффициенты не зависят от координат.

Для решения УФП (2) применяется следующая численная схема

$$\frac{\rho_{ij}^1 - \rho_{ij}^0}{h_t} = \beta \rho_{ij}^0 + (\beta p_j - K_i) \frac{\rho_{ij+1}^1 - \rho_{ij-1}^1}{2h_p} + D_p \frac{\rho_{ij+1}^1 - 2\rho_{ij}^1 + \rho_{ij-1}^1}{h_p^2} - p_j \frac{\rho_{i+1j}^0 - \rho_{i-1j}^0}{2mh_x}. \quad (9)$$

Здесь h_t , h_x и h_p – шаги сеток по времени, координате и импульсу соответственно; $K_i = K(x_i)$, $\rho_{ij}^0 = \rho(t, x_i, p_j)$, $\rho_{ij}^1 = \rho(t + h_t, x_i, p_j)$, $\rho_{ij+1}^1 = \rho(t + h_t, x_i, p_j + h_p)$, $\rho_{i+1j}^0 = \rho(t, x_i + h_x, p_j)$ и т.д. Таким образом, УФП сведено к системе линейных алгебраических уравнений с неизвестными ρ_{ij}^1 , ρ_{ij-1}^1 , ρ_{ij+1}^1 . Матрица коэффициентов при неизвестных является трёхдиагональной, и система решается методом прогонки [13].

Стохастические УЛ (6) моделируются с помощью схемы Эйлера-Маруямы [14]

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} + \Delta p^{(n)}, \quad (10)$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} + \Delta x, \quad (11)$$

$$\Delta p^{(n)} = -\{\beta p - K\}\tau + b\sqrt{D_p\tau}, \quad (12)$$

$$\Delta x = \frac{(p^{(n)} + p^{(n+1)})}{2\tau}. \quad (13)$$

Здесь верхние индексы маркируют последовательные моменты времени $t^{(n)} = n\tau$, все величины в правой части формулы (12) берутся в момент времени $t^{(n)}$; $b^{(n)}$ – случайные числа, имеющие нормальное распределение с нулевым средним и дисперсией 2. Они получены по методу Марсаглиа [14]. Для этого применялся генератор однородно распределённых случайных чисел, построенный нами с использованием работы [15]. Поскольку в основе этого генератора лежат целые числа удвоенной длины (longint на языке «С»), период его оценивается как $2^{64} = 1.84 \cdot 10^{19}$, что перекрывает наши потребности. Заметим, что при использовании стандартного генератора, основанного на целых числах обычной длины, мы иногда сталкивались с проявлением периодичности.

Результаты динамических расчётов скорости распада показаны на рис. 1.

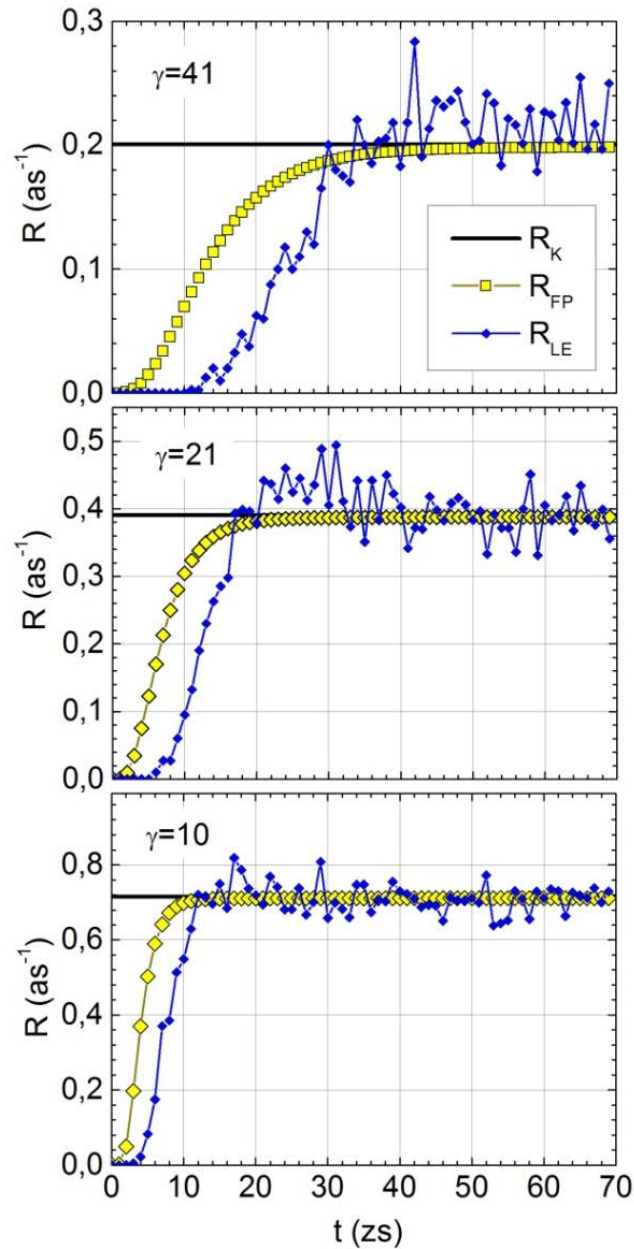


Рис. 1. Динамические скорости распада R_{LE} и R_{FP} как функции времени для трёх значений параметра γ , которые указаны на рисунке. Показана также кramerсова скорость R_K

Скорости деления здесь соответствуют трём разным значениям коэффициента затухания. Его удобно характеризовать безразмерной величиной $\gamma = \beta \Delta U_b / (\omega_c k_B T)$. Расчёты, представленные на рис. 1, выполнены при $\gamma = 10, 21, 41$. Отношение $\Delta U_b / (k_B T)$, которое определяет применимость формулы Крамерса (8), составляет 4.04.

На стадии релаксации кривые, соответствующие УФП и УЛ, не совпадают, они сдвинуты друг относительно друга. Это обусловлено тем, что при решении УФП фактически определяется скорость преодоления барьера (см. уравнение (5)). Тогда как при решении УЛ моделирование отдельной траектории прекращается, когда броуновская частица достигает поглощающей границы, находящейся заметно за барьером. Понятно, что броуновские частицы в среднем позже достигают точки, расположенной дальше от x_c . Именно поэтому кривые со сплошными символами на рис. 1 достигают квазистационарного значения позже. К тому же в этих двух подходах используются неодинаковые начальные условия: при решении УЛ все броуновские частицы покоятся в основном состоянии, тогда как при решении УФП предполагается некоторое распределение по координатам и импульсам.

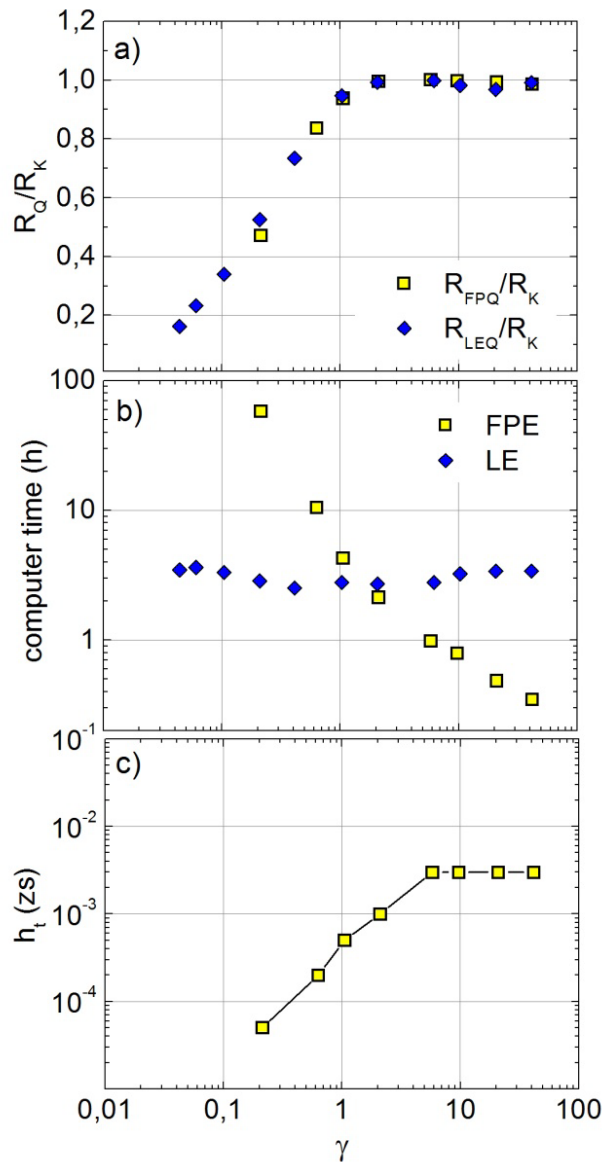


Рис. 2. В зависимости от безразмерной величины γ , характеризующей затухание, показаны: а) отношение квазистационарных динамических скоростей R_{LEQ} и R_{FPQ} к аналитической R_K ; б) затраты компьютерного времени (в часах) при двух методах моделирования; в) шаг сетки по времени при решении УФП

Из рис. 1 видно, что квазистационарные значения скоростей распада, полученные с помощью УФП (R_{FPQ}) и УЛ (R_{LEQ}), хорошо согласуются друг с другом и с R_K : типичное различие при данных значениях параметров составляет меньше 2%. Это соответствует области большой и средней диссипации ($\gamma > 1$), так как именно в этом приближении выведена формула Крамерса (8). При меньшем затухании согласие с аналитической формулой разрушается, однако, как показано на рис. 2а, согласие между R_{FPQ} и R_{LEQ} сохраняется. Таким образом, вопрос о том, какой из подходов предпочтительнее, решается исключительно на основе анализа затрат компьютерного времени.

На рис. 2б представлены результаты такого анализа: показано, сколько времени требуется для получения скоростей распада с приемлемой точностью обсуждаемыми двумя методами. Из рисунка видно, что это время при решении УФП сильно зависит от коэффициента затухания (или от γ). Дело в том, что при уменьшении коэффициента затухания приходится уменьшать шаг сетки по времени. В противном случае

$R_{FP}(t)$ нерегулярно осциллирует, что не имеет никакого физического смысла. Какой шаг использовался в расчётах, показано на рис. 2с.

Рис. 2b показывает, что при больших коэффициентах затухания метод, опирающийся на решение УФП, более эффективен: он позволяет получить результат почти в десять раз быстрее. К тому же преимуществом этого метода является тот факт, что найденные скорости не осциллируют случайным образом, а выходят на стационарное значение гладко.

При моделировании уравнений Ланжевена точность скорости распада определяется количеством вовлечённых траекторий (т.е. количеством броуновских частиц). При большей диссипации их общее число приходится увеличивать, так как всё меньше частиц достигает поглощающей границы к заданному моменту времени. В этом методе каждый раз приходится оценивать величину погрешности, с которой определена любая физическая величина – в нашем случае R_{LEQ} . Однако эта особенность одновременно является и преимуществом метода: можно сделать «пристрелочный» расчёт с небольшим числом траекторий и быстро получить результат, пусть и с большой погрешностью. Это особенно ценно для отладки, а также при подготовке длительных расчётов.

Библиографический список

1. Kramers H. A. Brownian motion in a field of force and the diffusion model of chemical reactions // *Physica*. 1940. Vol. 7. P. 284–304. Doi: 10.1016/S0031-8914(40)90098-2.
2. Büttiker M., Harris E. P., Landauer R. Thermal activation in extremely underdamped Josephson-junction circuits // *Physical Review B*. 1983. Vol. 28. P. 1268. Doi: 10.1103/PhysRevB.28.1268
3. Hanggi P., Talkner P., Borkovec M. Reaction-rate theory: fifty years after Kramers // *Review of Modern Physics*. 1990. Vol. 62. P. 251–341. Doi: 10.1103/RevModPhys.62.251.
4. Gonchar I. I., Kosenko G. I. Is the Kramers formula applicable for describing the decay of highly excited nuclear systems? // *Soviet Journal of Nuclear Physics*. 1991. Vol. 53. P. 133–142.
5. Jiang Z., Smelyanskiy V. N., Isakov S. V. [et al.] Scaling analysis and instantons for thermally assisted tunneling and quantum Monte Carlo simulations // *Physical Review A*. 2017. Vol. 95. P. 012322. Doi: 10.1103/PhysRevA.95.012322.
6. Risken H. The Fokker-Planck equation. Methods of Solution and Applications. Berlin: Springer. 1996. 472 p. Doi: 10.1007/978-3-642-61544-3.
7. Adeev G. D., Gontchar I. I., Pashkevich V. V. [et al.] Diffusion Model of Formation of Fission-Fragment Distributions // *Soviet Journal of Particles and Nuclei*. 1988. Vol. 19. P. 529.
8. Abe Y., Gregoire C., Delagrange H. Langevin approach to nuclear dissipative dynamics // *Journal de Physique Colloques (Paris)*. 1986. Vol. 47. P. 329. Doi: 10.1051/jphyscol:1986436.
9. Frobrich P., Xu S.Y. The treatment of heavy-ion collisions by Langevin equations // *Nuclear Physics A*. 1988. Vol. 477. P. 143-161. Doi: 10.1016/0375-9474(88)90366-1.
10. Gontchar I. I., Chushnyakova M. V., Aktaev N. E. [et al.] Disentangling effects of potential shape in the fission rate of heated nuclei // *Physical Review C*. 2010. Vol. 82. P. 064606. Doi: 10.1103/PhysRevC.82.064606.
11. Гончар И. И., Крохин С. Н. Прецизионные вычисления скорости деления возбуждённых атомных ядер // *Вестник Омского Университета*. 2012. Т. 4. С. 84-87.
12. Edholm O., Leimar O. The accuracy of Kramers' theory of chemical kinetics // *Physica A*. 1979. Vol. 98. P. 313–324. Doi: 10.1016/0378-4371(79)90182-1.
13. Турчак Л. И., Плотников П. В. Основы численных методов. М.: Физматлит. 2003. 304 с.
14. Kloeden P. E., Platen E., Schurz H. Numerical solution of SDE through computer experiments. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1994. 270 p. Doi:10.1007/978-3-642-57913-4.
15. Marsaglia G. Xorshift Random Number Generators // *Journal of Statistical Software*. 2003. Doi: 10.18637/jss.v008.i14.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Аннотация. В данной статье представлена проблема измерения напряженности электрического поля промышленной частоты. Описаны главные трудности таких измерений и современные методы их решения. Отображены основные конструктивные решения и определены основополагающие тенденции дальнейшего развития данной области. Целью данного исследования является выявление наиболее точных и простых способов реализации прибора для измерения заданной физической величины. В ходе данной работы были установлены ведущие направления развития инженерной мысли в данной сфере.

Ключевые слова: напряженность, электрическое поле, измерение, оптические измерения, оптический датчик, конструкция датчика.

В современном обществе существует потребность измерять различные параметры электромагнитных полей. Данное исследование посвящено описанию методов измерения напряженности электрической составляющей поля. Электромагнитное поле оказывает значительное влияние на различные электронные приборы. При определенном уровне напряженности существует вероятность искажения сигналов, возникновения наводок и пробоев. Кроме того, электрическое поле оказывает отрицательное влияние на организм человека. Все чаще в обществе стала подниматься проблема электромагнитного загрязнения окружающей среды. Поэтому существует необходимость знать уровень напряженности вблизи точных электрических приборов, а также вблизи мест постоянного проживания людей. Данная работа посвящена средствам и методам измерения электрических полей промышленной частоты, в России это частота порядка 50 Гц. Сложность таких измерений сводится к тому, что необходимо иметь строго однозначную зависимость напряженности поля от информативного параметра, а также необходимо избежать внесения значительных искажений в существующее поле. Этими факторами определяется точность измерения. В статье будут представлены современные методы измерения напряженности и конкретные конструкции датчиков и приборов, основанные на оптическом методе, представленные в течение последних 10 лет исследований в данной области.

В настоящее время существуют различные методы измерения напряженности электрического поля. В ходе исследований были найдены следующие методы [6]: электроиндукционный метод, электропространственный метод, электромеханический метод, газоразрядный метод, емкостной метод, оптический метод.

В данной работе для более детального рассмотрения был выбран оптический метод. Данный метод прост в конструировании средств измерений, позволяет сделать портативное устройство для измерения напряженности вдали от источников питания, имеет широкий спектр эффектов, пригодных для данной цели, в наименьшей степени искажает исследуемое поле, что приводит к улучшению точности в сравнении с другими методами.

Для построения датчика электрического поля необходимо иметь объект, параметры которого будут меняться под действием этого поля. В качестве такого объекта чаще всего используются электрооптические кристаллы. В данных структурах можно наблюдать следующие физические эффекты:

- Эффект Поккельса (линейный электрооптический эффект) [6];
- Эффект Керра (квадратичный электрооптический эффект) [6];

Эффект Поккельса заключается в изменении показателя преломления света в кристаллах под действием электрического поля. Изменение данного показателя происходит

пропорционально напряженности поля, вследствие чего происходит двойное лучепреломление, при этом изменяется и скорость движения волны. Объясняется это тем, что под действием электрического поля меняется поляризуемость кристалла, а как следствие, и показатель преломления. Данный эффект достаточно широко используется в данной области, многие современные приборы для измерения напряженности электрического поля построены именно на нем.

Эффект Керра схож с эффектом Поккельса. Различие заключается лишь в среде, в которой наблюдается данное явление. Эффект Керра наиболее выражен в кристаллах, имеющих центр симметрии, или изотропных средах. Преломление, в отличие от линейного электрооптического эффекта, пропорционально квадрату напряженности поля, откуда и следует второе название – квадратичный электрооптический эффект.

Рассмотрим подробнее современные приборы и датчики для измерения напряженности электрического поля.

Первый вид датчиков, основанный на эффекте Поккельса, представлен следующим механизмом (рис.1). Луч от лазерного светодиода поступает на поляризатор, плоско поляризованный луч проходит через ячейку Поккельса, попадает на анализатор, а затем на фотодиод. На фотодиоде оптический сигнал преобразуется в электрический, усиливается и подается на микроконтроллер для обработки и преобразования его в величину напряженности поля.

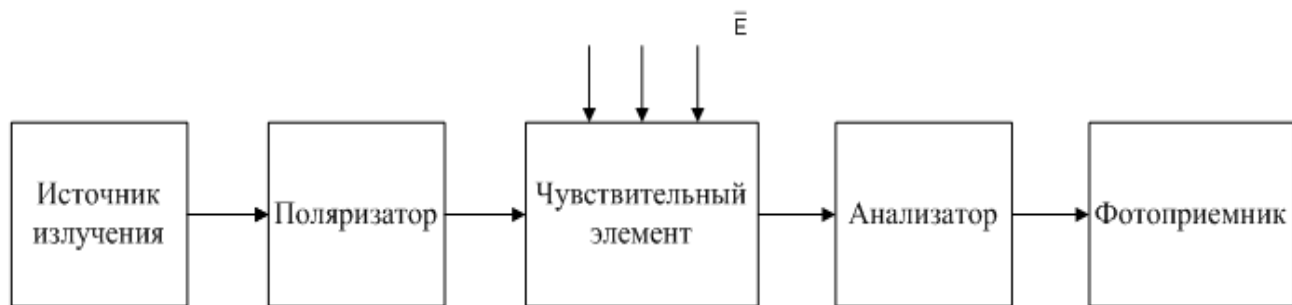


Рис.1. Измерительная цепь 1

Уравнение преобразования выглядит следующим образом:

$$\Delta\varphi = 2 \cdot S \cdot k \cdot l,$$

где $\Delta\varphi$ – фазовый сдвиг; S – значение напряженности электрического поля; k – коэффициент чувствительности изменения фазы; l – длина чувствительного элемента.

Для увеличения точности вводят источник света, который облучает кристалл вдоль трех ортогональных друг другу направлений, показания снимаются также с трех направлений [3]. Это позволяет сделать прибор, показания которого не будут зависеть от его ориентации в пространстве, что приведет к уменьшению погрешности. Существует множество конструкций такого типа, имеющие небольшие различия в своем строении, однако схожие в их принципе работы [1, 2].

Зависимость скорости распространения плоскополяризованного луча в электрооптическом кристалле от напряженности приложенного к нему поля также используется для подобного рода измерений. Можно привести в качестве примера следующую измерительную цепь (рис.2). Имеется источник оптического излучения, свет от которого через оптическое волокно попадает на коллиматорную линзу. Линза формирует два параллельных друг другу пучка. Оба пучка проходят через поляризатор, приобретая линейную поляризацию, которая далее преобразуется в круговую. После лучи проходят через кристалл и поляризационный оптический разветвитель. В кристалле под действием внешнего приложенного электрического поля появляется сдвиг фазы. Далее уже две волны с различными

поляризациями и сдвинутые по фазе относительно первоначального сигнала подаются на фотоприемники и на блок обработки, где и определяется напряженность поля. В данном устройстве измерительный датчик и блок обработки с источником оптического излучения пространственно разделены. Связь осуществляется при помощи оптического волокна [5].

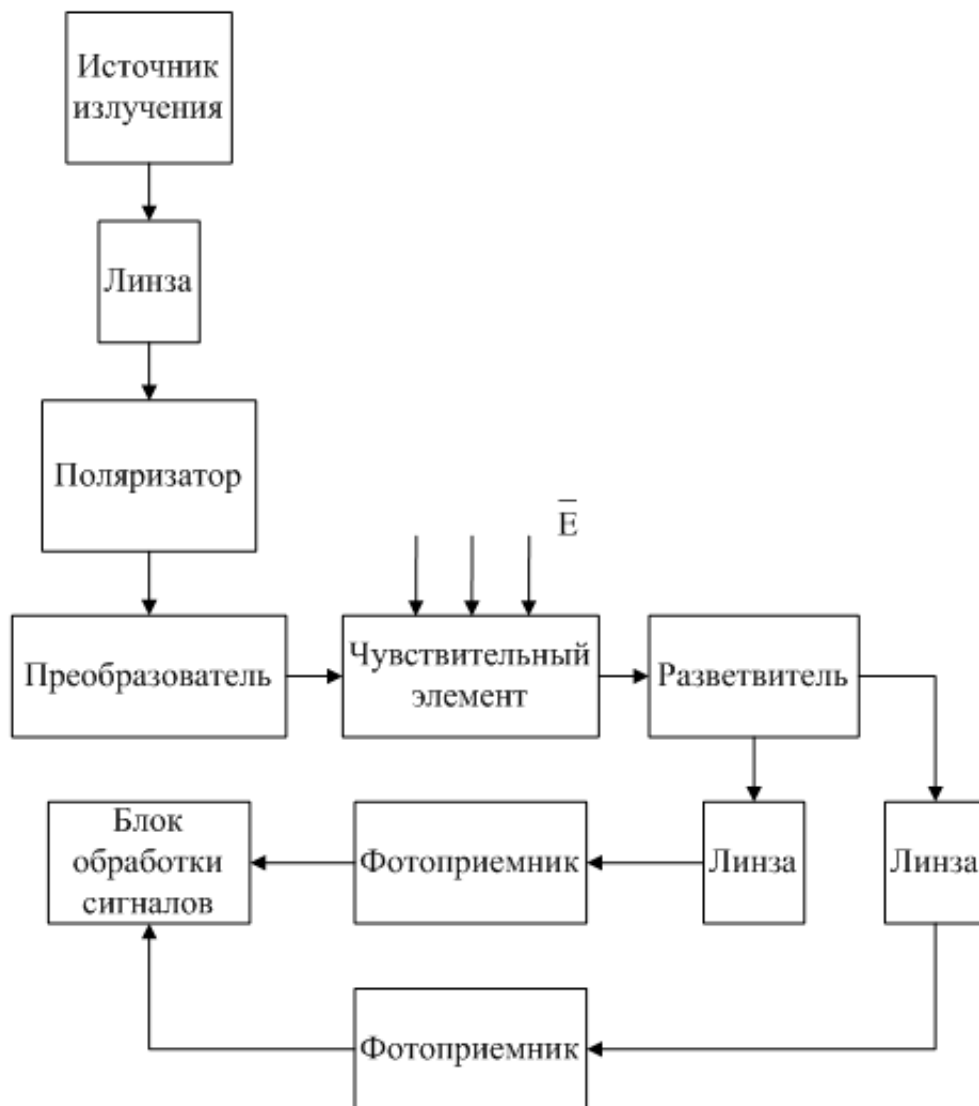


Рис.2. Измерительная цепь 2

Передаточная функция для данного устройства может быть представлена следующим образом:

$$S_A = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \cdot \sin \left(\frac{\pi E}{E_g} + \Delta \varphi_0 \right) \right],$$

где E_g – показатель чувствительности; E – напряженность электрического поля; α – показатель качества чувствительного элемента; $\Delta \varphi_0$ – первичный фазовый сдвиг в датчике.

Существует еще одно средство измерений (рис.3). Данная модель рассчитана на более высокие частоты, но также относится к электрооптическим измерительным приборам для определения уровня напряженности. Возможности этого устройства гораздо шире, чем у других приборов данного класса. С помощью этого средства измерений возможно определить амплитуду, фазу, поляризацию, а также угол падения электромагнитной волны

на приемную поверхность (датчик). На противоположных концах световода расположены источник и приемник световой волны, в центре находится чувствительный элемент, в котором в результате эффекта Керра происходит модуляция световой волны. Электромагнитная волна попадает на кристалл через Люнебергскую линзу, которая фокусирует волну на чувствительном элементе. Таким образом, мы можем судить о характеристиках электрического поля [4].

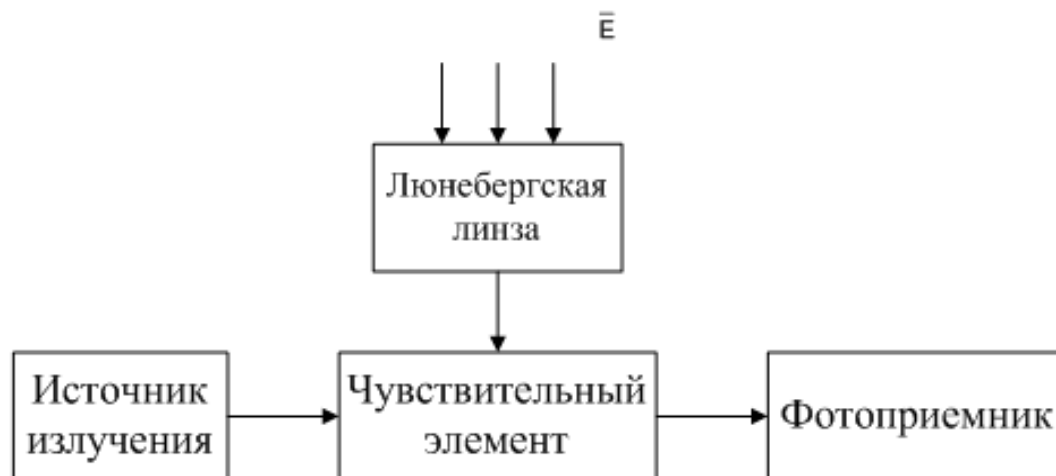


Рис.3. Измерительная цепь 3

Стоит отметить, что для измерения напряженности полей высоких частот существует гораздо более широкий спектр приборов, среди которых оптические средства измерения занимают не такую объемную долю, как для измерения полей промышленной частоты.

Подводя итог данной работы, можно прийти к заключению, что оптический метод широко используется в современных приборах. В основном, обладатели патентов отдают предпочтение эффекту Погекельса, хотя и регистрируют его разными способами. Также стараются пространственно разделять чувствительный элемент и блок обработки сигналов. Общая тенденция направлена на использование лазерных источников и оптоволоконна, что уменьшает искажение исследуемого поля прибором и увеличивает точность измерений.

Библиографический список

1. Пат. 2539130 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Волоконно-оптическое устройство для измерения напряженности электрического поля / В.Е. Стригалева, С.М. Аксарин, И.К. Мешковский №2013136095/28; заявл. 31.07.13, опубл. 10.01.15, Бюл.№1.
2. Пат. JP2014215140A Япония. Electric field measuring apparatus // Yoshikazu Toba, Atsushi Ichijo; заявл. 25.04.13, опубл. 17.11.14.
3. Пат. JP2006145244A Япония. Electric field measuring apparatus // Nakamatsu Shin, Onishi Teruo, Kamibayashi Shinji; заявл. 25.05.06, опубл. 06.12.07.
4. Пат. US5384458A США. Photonic electromagnetic field sensor for use in a missile // Donald P. Hilliard, Dean L. Mensa; заявл. 01.07.93, опубл. 24.01.95.
5. Ураксеев М.А., Закурдаева Т.А. Принципы построения и конструирования электрооптических систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т.11, № 4. С. 115–124.
6. Бирюков С.В. Физические основы измерения параметров электрических полей: моногр. Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. 112 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УЧЕБНОЙ МОТИВАЦИИ СТУДЕНТОВ ПРИ ОБУЧЕНИИ ФИЗИКЕ В ГРУППАХ С ВЫСОКИМИ И НИЗКИМИ УЧЕБНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования направленности и уровня развития внутренней мотивации учебной деятельности учащихся при изучении физики, а также преобладающие мотивы учебной деятельности. В исследовании приняли участие студенты технических направлений подготовки, обучающиеся в группах с высокими и низкими учебными возможностями. В статье приводится сравнительный анализ полученных результатов.

Ключевые слова: мотивация, внутренние и внешние мотивы, уровень внутренней мотивации, высокие и низкие учебные возможности студентов, ведущие мотивы.

В соответствии с новыми федеральными государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования, были разработаны и утверждены новые основные образовательные программы (ООП) по техническим направлениям подготовки. Согласно новым ООП резко сократилось количество часов на аудиторные занятия по физике. По большинству технических направлений в среднем количество аудиторных занятий уменьшилось в 2 раза. При этом содержание рабочих программ по физике, а также требования к формированию определенных умений и навыков у студентов остались практически без изменений. Еще острее, чем раньше встала проблема повышения эффективности преподавания учебных дисциплин и поиска резервов ее повышения, оптимизации учебного процесса. Один из аспектов этой проблемы – необходимость поиска таких способов активизации учебной деятельности студентов, которые позволили бы за меньшее количество часов сформировать у учащихся необходимые знания, умения и компетенции, а также необходимый объем знаний по предмету.

Одним из способов активизации учащихся является повышение уровня мотивации к обучению вообще и повышение уровня мотивации при изучении конкретных дисциплин, в частности, физики, а также поддержание уровня мотивации на достаточно высоком уровне в течение всего процесса обучения. Наиболее обобщенное определение мотивации предложено Р. С. Немовым: «Мотивацию ... можно определить как совокупность причин психологического характера, объясняющих поведение человека, его начало, направленность и активность» [1]. Решению этой психолого-дидактической проблемы посвящено достаточно много исследований. Причем во многих этих исследованиях показано, что наиболее мощным фактором, побуждающим к деятельности вообще и к учению в частности, является внутренняя мотивация, возникающая на основе внутренних потребностей человека. Она более устойчива и может оказывать влияние на деятельность человека достаточно продолжительное время. Если же мотивы возникли под воздействием внешних стимулов, то они менее устойчивы и прекращают действовать, как только исчезает внешний стимул. В статье Т. Д. Дубовицкой [2] дается следующая характеристика внутренним и внешним мотивам учения:

«Внутренние мотивы носят личностно значимый характер, обусловлены познавательной потребностью субъекта, удовольствием, получаемым от процесса познания и реализации своего личностного потенциала. Доминирование внутренней мотивации характеризуется проявлением высокой познавательной активности учащегося в процессе учебной деятельности. Овладение учебным материалом является и мотивом и целью учения.

Учащийся непосредственно вовлечен в процесс познания, и это доставляет ему эмоциональное удовлетворение.

Внешние мотивы характеризуются тем, что овладение содержанием учебного предмета не является целью учения, а выступает средством достижения других целей. Это может быть получение хорошей оценки (аттестата, диплома), получение стипендии, подчинение требованиям учителя или родителей, получение похвалы, признания товарищей и др. При внешней мотивации учащийся, как правило, отчужден от процесса познания, проявляет пассивность, переживает бессмысленность происходящего либо его активность носит вынужденный характер. Содержание учебных предметов не является для учащегося личностно значимым.»

При подготовке к исследованию было выдвинуто несколько гипотез: 1) различные результаты обучения физике у слабых и сильных студентов технического вуза связаны с разным уровнем внутренней мотивации к изучению данной дисциплины, причем, чем выше уровень мотивации, тем успешнее обучение; 2) выявление преобладающего вида мотивации у конкретной группы студентов позволит скорректировать процесс обучения таким образом, чтобы воздействовать на данный вид мотивации.

В эксперименте участвовали две группы испытуемых, обучающихся на втором курсе ОмГТУ по техническим направлениям подготовки: первая группа (15 чел.) – учащиеся с высокими учебными возможностями, вторая группа (15 чел.) – учащиеся со средними и низкими учебными возможностями по физике. Уровень учебных возможностей по физике был определен на основе данных входного контроля и результатов обучения по физике за два предыдущих семестра.

Испытуемым было предложено анонимно ответить на вопросы двух тестов-опросников. Первый – тест-опросник направленности учебной мотивации (ОНУМ), разработанный Т. Д. Дубовицкой [2], который позволяет исследовать направленность и уровень развития внутренней мотивации учебной деятельности учащихся при изучении конкретных учебных предметов. В данном случае тестирование касалось изучения физики.

Полученный в процессе обработки ответов испытуемого результат расшифровывался следующим образом: в тесте при ответе на 20 вопросов можно было набрать от 0 до 20 баллов, где 0–10 баллов соответствует внешней мотивации; 11–20 баллов – внутренняя мотивация. При этом подразумевалось, что чем выше набранный балл, тем выше уровень внутренней мотивации, то есть для определения уровня внутренней мотивации могут быть использованы также следующие нормативные границы: 0–5 баллов – низкий уровень внутренней мотивации; 6–14 баллов – средний уровень внутренней мотивации; 15–20 баллов – высокий уровень внутренней мотивации.

Второй предложенный тест, содержащий 34 вопроса, был модифицирован Н. Ц. Бадмаевой на основе опросника А. А. Реана и В. А. Якунина [3]. В нем содержатся утверждения, характеризующие мотивы учения, подразделяемые на коммуникативные (основываются на потребности в общении), профессиональные (обуславливают выбор профессии и продолжительное выполнение обязанностей, связанных с этой профессией), учебно-познавательные (ориентация на усвоение способов добывания знаний, приемов самостоятельного приобретения знаний), широкие социальные мотивы (связанные с социальными взаимодействиями учащихся), а также мотивы творческой самореализации (связанные со стремлением к более полному выявлению и развитию своих способностей), избегания неудачи и престижа. Этот опросник позволяет выявить наиболее значимые для студентов мотивы учения.

В первой группе испытуемых (с высокими учебными возможностями) внешняя мотивация была выявлена у 7 человек, внутренняя – у 8 человек, при этом средний балл по группе составил 9,8, что соответствует среднему уровню внутренней мотивации. Во второй группе (со средними и низкими учебными возможностями) внешняя мотивация была выявлена у 9 человек, внутренняя – у 6 человек, при этом средний балл по группе составил 8,2, что также соответствует среднему уровню внутренней мотивации.

Анализируя результаты второго теста, было установлено, что в рамках выбранных групп нет принципиальных различий в ведущих мотивах учебной деятельности. В таблице 1 представлены значения процентов от максимально возможного балла, набранного группой по разным видам мотивов.

Таблица 1

	Группа с высокими учебными возможностями	Группа с низкими учебными возможностями
Коммуникативные мотивы	77,7 %	78,0 %
Мотивы избегания	64,8 %	62,4 %
Мотивы престижа	70,9 %	90,4 %
Профессиональные мотивы	77,3 %	90,7 %
Мотивы творческой самореализации	61,3 %	81,3 %
Учебно-познавательные мотивы	72,6 %	78,8 %
Социальные мотивы	74,9 %	83,7 %

В обеих группах испытуемых одну из наименьших значимостей из всех перечисленных имеет мотив избегания неудачи, а максимальную значимость для студентов представляют профессиональные мотивы. Различия по результатам тестирования в данных группах наблюдаются по мотиву творческой реализации: в группе с высокими учебными возможностями этот мотив набрал наименьший процент, в то время как в группе с низкими учебными возможностями этот мотив был одним из самых приоритетных. В целом, вызывает интерес тот факт, что большинство конкретных мотивов в группе с низкими учебными возможностями по результатам теста имеют более высокую значимость, достигая более 90 % от максимально возможного, в то время как в группе с высокими учебными возможностями максимальный процент значимости мотива в группе не превысил 78 %.

Исходя из результатов проведенного исследования, можно сделать некоторые выводы:

1) Нет очевидной связи между уровнем внутренней мотивации и уровнем усвоения учебного материала по физике: как в группах с высокими, так и в группах с низкими учебными возможностями были выявлены студенты с разным уровнем внутренней мотивации. Небольшие различия в среднем балле уровня внутренней мотивации в двух разных группах нельзя считать статистически значимыми.

2) В целом результаты исследования показали большое значение различных мотивов, а также их разнообразие по отношению к учебной деятельности студентов.

3) Выявлены некоторые преобладающие мотивы обучения у конкретных групп студентов. При этом нельзя выделить какой-то один ведущий мотив. Если использовать мотивацию как способ активизации деятельности студентов, то необходимо оказывать комплексное воздействие, затрагивая все мотивы учебной деятельности.

В дальнейшем предполагается продолжить исследование в данном направлении и скорректировать методику проведения практических занятий по физике с учетом преобладающих мотивов учебной деятельности в конкретной группе.

Библиографический список

1. Немов Р. С. Психология / 4-е изд. М.: ВЛАДОС, 2003. Кн. 1. Общие основы психологии URL: <http://dedovkgu.narod.ru/bib/nemov1.htm> (дата обращения 1.04.2017).
2. Дубовицкая Т. Д. Опросник направленности и уровня внутренней учебной мотивации (ОНУМ). URL: http://gatchina-psi.narod.ru/05_arsenal/05-12_onum.htm (дата обращения 1.04.2017).
3. Бадмаева Н. Ц. Методика для диагностики учебной мотивации студентов (А. А. Реан и В. А. Якунин, модификация Н. Ц. Бадмаевой) / Бадмаева Н. Ц. Влияние мотивационного фактора на развитие умственных способностей: Монография. Улан-Удэ, 2004. С. 151–154.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

1. *В.В. Акимов, А.Ф. Мишуков, А.Ю. Грязнов, Я.А. Сидорова*
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия
СНИЖЕНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЛЬНИЦ
УДАРНО-ИНТЕГРАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ TiC–TiNi4
2. *Б.Ш. Алимбаева, М.Ю. Байбарацкая, Е.А. Черкасов*
Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва
(Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия
ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ
ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ В РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ7
3. *А.И. Блесман, Г.Н. Камшилов*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА AG-ПЛЕНКИ, ПОЛУЧЕННОЙ
МАГНЕТРОННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ.....11
4. *А.А. Кабанов, В.Ф. Ковалевский, Ю.А. Фоминых, А.И. Щелканов*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕДУКЦИИ ГИТАРЫ
ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА НА БАЗЕ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ
И ХОЛЛОВСКОГО ДАТЧИКА УГЛОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ.....14
5. *Л.Ф. Калистратова, А.П. Киреев*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ
НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ17
6. *С.Н. Литунов, Д.Б. Пономарев, Ю.Д. Тоцакова*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ КРАСКИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ АКТИВАТОРА22
7. *М.В. Мамонова*
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия
ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ДЛЯ МАГНИТНЫХ СВЕРХСТРУКТУР.....26
8. *Ю.К. Машков, А.С. Рубан¹, С.В. Шилько²*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия
²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук
Беларуси, г. Гомель, Беларусь
ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПТФЭ В ПРОЦЕССЕ
ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.....30
9. *А.А. Николаева*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
НАНОТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
И ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ34

10. Д.Ю. Никонов, С.В. Бирюков Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ТИТАНОВОЙ ПОДЛОЖКЕ.....	38
11. И.А. Прудникова, М.В. Мамонова ¹ Омский государственный аграрный университет имени П.А.Столыпина, г. Омск, Россия ¹ Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК ОТ ОРИЕНТАЦИИ ГРАНЕЙ ПОДЛОЖКИ.....	42
12. А.Н. Пуртов, В.В. Прудников, П.В. Прудников Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия МОНТЕ-КАРЛО ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ СТАРЕНИЯ В ТРЕХПЛЕНОЧНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ.....	47
13. М.В. Рашковец, А.А. Никулина Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ, СФОРМИРОВАННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПРЯМЫМ ЛАЗЕРНЫМ ВЫРАЩИВАНИЕМ	52
14. Н.А. Семенюк, Ю.В. Кузнецова ¹ , Вад. И. Суриков Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ¹ ОАО «Сугутнефтегаз», г. Сургут, Россия ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОМ НА СТРУКТУРУ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ	56
15. Е.П. Целых, С.Я. Ходакова, В.И. Суриков ¹ ФГУП «Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», г. Омск, Россия ¹ Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия СВОЙСТВА РЕЗИНЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОЛЫМИ КОРУНДОВЫМИ МИКРОСФЕРАМИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ	59
16. А.В. Шеина, Е.П. Целых ¹ , Е.А. Рогачев, Вал. И. Суриков Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ¹ ФГУП «Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», г. Омск, Россия СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЛЬФРАМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА РЕЗИНЕ.....	63
17. В.Р. Эдигаров, Б.Ш. Алимбаева, П.С. Перков Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ НАПЫЛЕНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ.....	67

Секция 2. Физика и образование

1. Е.Г. Андреева, А.В. Березовский ¹ Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ¹ Гипермаркет "Лента" (Омск), г. Омск, Россия ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА И РАЗМЕРОВ НА СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА	71
---	----

2.	<i>А.В. Горнова, Н.Ф. Зацепилин, А.А. Кабанов, Г.С. Локисов, А.И. Щелканов</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ФАРТУКА ТОКАРНОГО СТАНКА НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ХОЛЛА	74
3.	<i>А.А. Егорова, Э.В. Логунова</i> Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия ФИЗИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ	76
4.	<i>А.А. Еременко¹, И.И. Гончар^{1,2}, М.В. Чушнякова²</i> ¹ Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия ² Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ: ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ.....	80
5.	<i>А.Е. Исаченко, А.А. Кабанов, Г.В. Никонова, А.С. Рахманова, А.О. Савиди, Л.В. Щапова</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗА	85
6.	<i>А.Е. Исаченко, А.В. Симаков, А.И. Шафеев, А.И.Щелканов</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия БЛОК КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	89
7.	<i>А.А. Кабанов, А.В. Зеленов, А.И. Щелканов</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	91
8.	<i>А.А. Кабанов, А.Ю. Криворучко, А.М. Сембаев, А.И. Щелканов</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ И БЕСПРОВОДНЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ	95
9.	<i>А.А. Кабанов, А.Н. Тамбовцев, А.И. Щелканов</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ИЗМЕРИТЕЛЬ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО СЕНСОРА С ЦИФРОВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ	97
10.	<i>Я.А. Калинина, М.П. Ланкина</i> Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия ФОРМИРОВАНИЕ КОММУНИКАТИВНОЙ КОМПЕТЕНЦИИ У СТУДЕНТОВ НА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЯХ ПО ФИЗИКЕ	100
11.	<i>А.Г. Козлов, Е.А. Фадина</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ИМПЕДАНС ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ С ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫМИ МИКРОЭЛЕКТРОДАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ИССЛЕДУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ	103
12.	<i>А.В. Кормилец, Т.А. Аронова</i> Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ.....	109

13. М.А. Королёва, Л.В. Щапова, С.В. Бирюков Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	113
14. Е.С. Крошка, Т.А. Беляева ¹ , П.П. Бобров ¹ Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия ¹ Омский государственный педагогический университет, г. Омск, Россия ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ЗАМЕРЗАЮЩИХ ПОЧВ И ПОРОД	117
15. В.Л. Литневский, Г.И. Косенко ¹ , Ф.А. Иванюк ² , С.И. Мазур ³ Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия ¹ Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия ² Институт ядерных исследований, г. Киев, Украина ³ Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ЗАВИСИМОСТЬ СЕЧЕНИЙ КАСАНИЯ СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ЯДЕР ОТ ВЫБОРА КРИТЕРИЯ КАСАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РЕАКЦИИ СЛИЯНИЯ ЯДЕР ³⁶ S, ⁴⁸ Ca, ⁴⁸ Ti, ⁶⁴ Ni С ЯДРОМ ²³⁸ U)	122
16. В.Е. Ложников, П.В. Прудников Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В СПИНОВЫХ СИСТЕМАХ МЕТОДОМ ВАНГА-ЛАНДАУ	126
17. С.И. Мазур, Р.С. Курманов ¹ , В.Л. Литневский ¹ , Г.И. Косенко ² Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ¹ Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия ² Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ЯДЕР НА ВЕРОЯТНОСТЬ КАСАНИЯ	129
18. А.С. Наумов, П.П. Бобров ¹ Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия ¹ Омский государственный педагогический университет, г. Омск, Россия ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В НЕНАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРАХ И УГЛЕВОДОРОДАХ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 1 кГц ДО 20 ГГц	134
19. А.К. Паульс, Т.А. Аронова Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СУПЕРИОННЫХ ПРОВОДНИКОВ В ВИДЕ ПЛЕНОК	138
20. И.С. Позыгун, Г.М. Серомян, С.А. Сычев Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УВСО ПЛЕНОК	142
21. Д.Е. Романовский, В.В. Прудников, П.В. Прудников Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ СВЕРХСТРУКТУР С ЭФФЕКТАМИ ГИГАНТСКОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ	147
22. В.И. Струнин, К.А. Белоусов, Г.Ж. Худайберганов Омский государственный университет имени Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ ПОДКОРПУСНОГО ПРОСТРАНСТВА МИКРОСХЕМ	152

23. <i>В.И. Струнин, Д.Б. Карабаева, Г.Ж. Худайберген</i> Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия КИНЕТИКА ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА АРГОН-АЗОТ-АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАЗМЫ	157
24. <i>Н.А. Толмачева, Е.В. Шлякова</i> Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ ИНОСТРАННЫМ ВОЕННОСЛУЖАЩИМ В ВОЕННОМ ВУЗЕ.....	162
25. <i>А.В. Тюкин¹, С.В. Бирюков^{1,2}, Л.В. Тюкина²</i> ¹ Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия ² Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БИНАРНЫХ СИСТЕМ МЕТАЛЛ–МЕТАЛЛ.....	166
26. <i>М.В. Чушнякова¹, И.И. Гончар^{1,2}, Р.А. Кузякин³</i> ¹ Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ² Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия ³ Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПАДА МЕТАСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ	170
27. <i>Л.В. Щапова, М.А. Королёва, С.В. Бирюков</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.....	176
28. <i>Н.Г. Эйсмонт, Т.А. Сазанова, М.С. Седельникова</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УЧЕБНОЙ МОТИВАЦИИ СТУДЕНТОВ ПРИ ОБУЧЕНИИ ФИЗИКЕ В ГРУППАХ С ВЫСОКИМИ И НИЗКИМИ УЧЕБНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ.....	180