

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

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

Кафедра «Физика»

# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ**

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

**(Омск, 29 мая 2020 года)**

Научное текстовое электронное издание  
локального распространения

Омск  
Издательство ОмГТУ  
2020

УДК 001  
ББК 72  
А43

Редакционная коллегия:

*А. И. Блесман*, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой физики ОмГТУ;

*В. А. Егорова*, канд. техн. наук, доцент кафедры физики ОмГТУ;

*О. М. Сухарева*, ст. преподаватель кафедры физики ОмГТУ

**Актуальные проблемы современной науки** [Электронный ресурс] : материалы IX Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, 29 мая 2020 г.) / Минобрнауки России, ОмГТУ ; [редкол.: А. И. Блесман, В. А. Егорова, О. М. Сухарева]. – Электрон. текст. дан. (5,13 Мб). – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2020. – 1 электрон. опт. диск. – 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. – ISBN 978-5-8149-3075-0.

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

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

*Ответственность за содержание материалов несут авторы*

*Издается в авторской редакции*

*Компьютерная верстка О. М. Сухаревой*

*Для дизайна этикетки использованы материалы  
из открытых интернет-источников*

*Секция 1*  
**Материаловедение и нанотехнологии**

УДК 620.17

*Р.О. Дзивульский, Т.А. Чуранкина, В.Г. Чуранкин, А.М. Ласица*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЕ ИЗ ТВЕРДОГО СПЛАВА ПРИ ОБРАБОТКЕ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ**

**Аннотация.** В статье рассматривается распределение нагрузок на режущей пластине из твердого сплава ВК8 при обработке аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Проведен расчет компонентов силы резания, методом конечных элементов рассчитаны напряжения и смещения в материале треугольной режущей пластины TPUN 160338. Показано, что возникающие напряжения превышают предел текучести материала, и релаксация напряжений идет в кобальтовой связке.

**Ключевые слова:** режущий инструмент, твердый сплав, аустенитные стали, нержавеющей стали, ВК8.

**Введение**

Для повышения эффективности, производительности и экономичности процесса резания все более широко используют автоматические линии, металлообрабатывающие комплексы с ЧПУ и гибкие производственные системы (ГПС). Однако это оборудование в сочетании с современными системами управления требует очень значительных финансовых затрат. Поэтому необходимым условием продуктивного использования оборудования является высокий уровень режущего инструмента, способного обеспечить увеличенные сроки службы, гарантию высокой производительности и качества получаемой продукции, а также снижение вспомогательного времени на замену и переналадку инструмента при его эксплуатации. Роль режущего инструмента дополнительно возрастает при операциях механической обработки, характеризующихся повышенными силовыми и температурными нагрузками, при резании на высокой скорости, при обработке материалов высокой твердости, коррозионностойких сталей, титановых сплавов и сплавов на основе никеля («суперсплавов»), а также углепластиков и композиционных материалов.

Работоспособность режущего инструмента во многом определяется свойствами его режущего клина. Следовательно, повышение износостойкости рабочих поверхностей клина режущего инструмента, изготовленных из современных инструментальных материалов, является эффективным способом повышения их работоспособности. На сегодняшний день ни отечественные, ни зарубежные производители режущего инструмента не смогли разработать и внедрить в массовое производство универсальный материал, обеспечивающий прогнозируемый срок службы инструмента, точность размеров и заданную шероховатость при различных условиях его эксплуатации.

Влияние физико-механических свойств материала режущей части инструмента, таких как прочность на растяжение и сжатие, твердость, теплопроводность и т.д., является основополагающим и должно быть учтено при изучении процесса резания и способов повышения характеристик инструмента. Оценка методами компьютерного моделирования возникающих нагрузок на контактных площадках режущего инструмента позволяет понять, какие процессы будут протекать в материале на микро- и наноуровнях, подбирать оптимальные режимы резания, разрабатывать и применять различные методы поверхностной упрочняющей обработки (химико-термической, деформационной, нанесением

износостойких покрытий, модификацией свойств поверхностного слоя инструмента и другими способами).

### Определение сил резания

Существует несколько методик вычисления сил резания, наибольшее распространение в нашей стране получила методика, предложенная в [1]. В данном случае силы вычисляются на основе соотношений:

$$P_{z,y,x} = 10 \times C_x \times t^x \times s^y \times v^n \times K_p \quad (1)$$

и

$$K_p = K_{mp} \times K_{jp} \times K_{gp} \times K_{lp} \times K_{rp} \quad (2)$$

Коэффициенты  $C_p$ ,  $K_{п}$  зависят от материалов режущего инструмента и обрабатываемой детали, геометрии инструмента, режима обработки. Значения коэффициентов, используемых для обработки изделий из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T и режущей пластины TPUN 160308, приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Значения коэффициентов, используемых для обработки**

	$C_p$	x	y	n	$K_{fp}$	$K_{gp}$	$K_{lp}$	$K_{mp}$	$K_{rp}$
$P_z$	204	1	0,75	-0,15	0,89	1,1	1	0,79	1
$P_y$	125	0,9	0,75	-0,3	0,5	1,4	1	0,79	1
$P_x$	67	1,2	0,65	-0,4	1,17	1,4	1	0,79	1

Расчеты сил резания проводились в Matlab 2019b, график зависимости сил резания от скорости резания приведен на рис. 1.

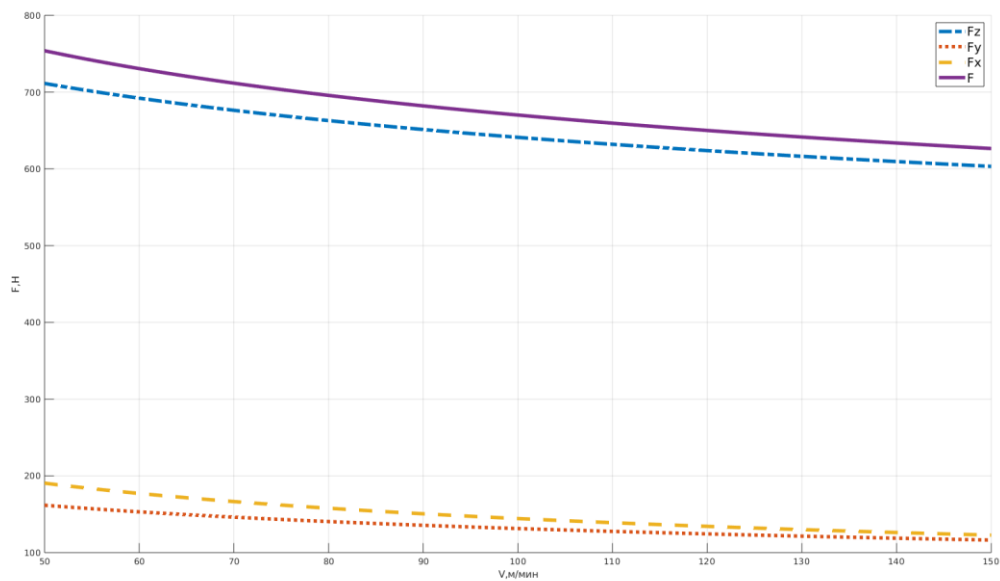


Рис. 1. График зависимости сил резания от скорости резания

### Определение напряжений и смещений в режущей пластине

Для определения напряжений и смещений, возникающих в режущей пластине TPUN 160308, создавалась ее трехмерная модель в САПР Solidworks. В соответствии с общепринятой практикой толщина области нагружения для  $P_z$  принималась равной подаче на один оборот, ширина принималась равной глубине точения. Контактные площадки для  $P_y$  и  $P_x$  вычислялись из геометрии режущей пластины и приведены на рис. 2.

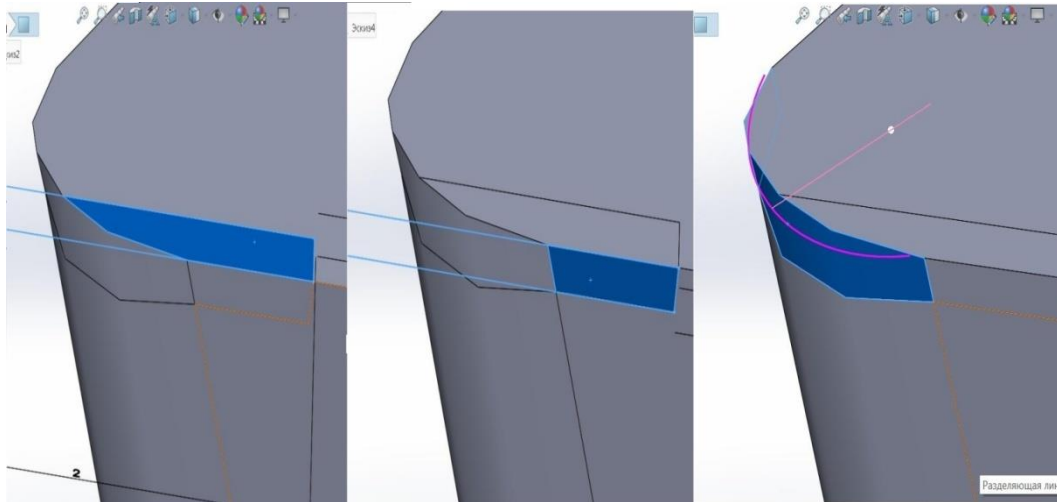


Рис. 2. Контактные площадки приложения сил

Дальнейший расчет напряжений и смещений проводился методом конечных элементов. Значения физических констант материалов взяты в [2, 3]. Эпюра распределения напряжений приведена на рис. 3.

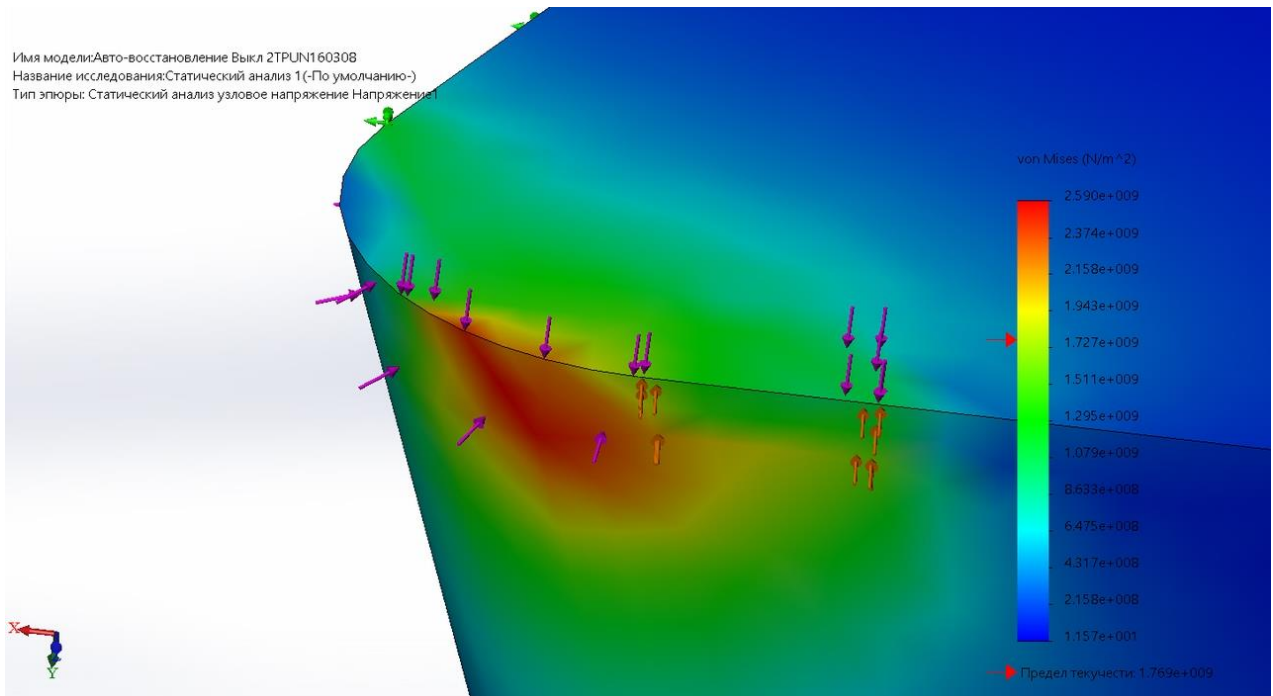


Рис. 3. Эпюра распределения напряжений

Для подачи  $s=0.3$  мм/об. проводился расчет максимальных напряжений, соответствующих используемому в промышленности диапазону скоростей резания для данной пластины и материала. Величины сил резания и напряжений приведены в таблице 2.

Величины сил резания и напряжений

V	100	110	120	130	140	150
$P_z$	641,078	631,978	623,783	616,339	609,525	603,25
$P_y$	131,342	127,64	124,351	121,4	118,731	116,299
$P_x$	144,338	138,939	134,184	129,958	126,162	122,728
Sigma(МПа)	2643,5	2615,5	2590	2566,6	2544,9	2524,8

На рис. 4 представлена зависимость напряжений от скорости резания. Из расчетов видно, что значение возникающих напряжений превышает предел текучести для данного материала, что неизбежно должно приводить к возникновению компенсирующих смещений.

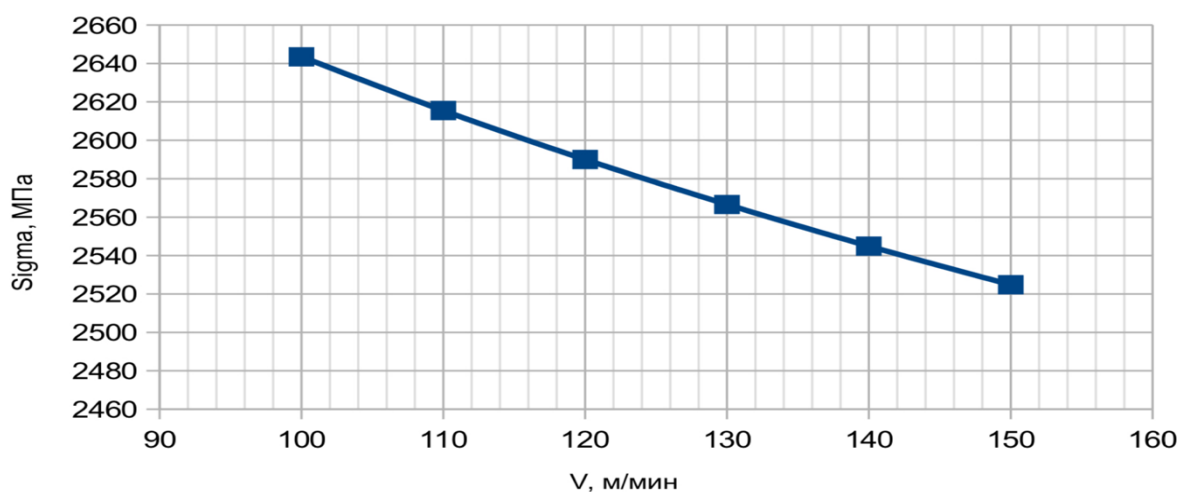


Рис. 4. Зависимость напряжений от скорости резания

Эпюра смещений приведена на рис. 5.

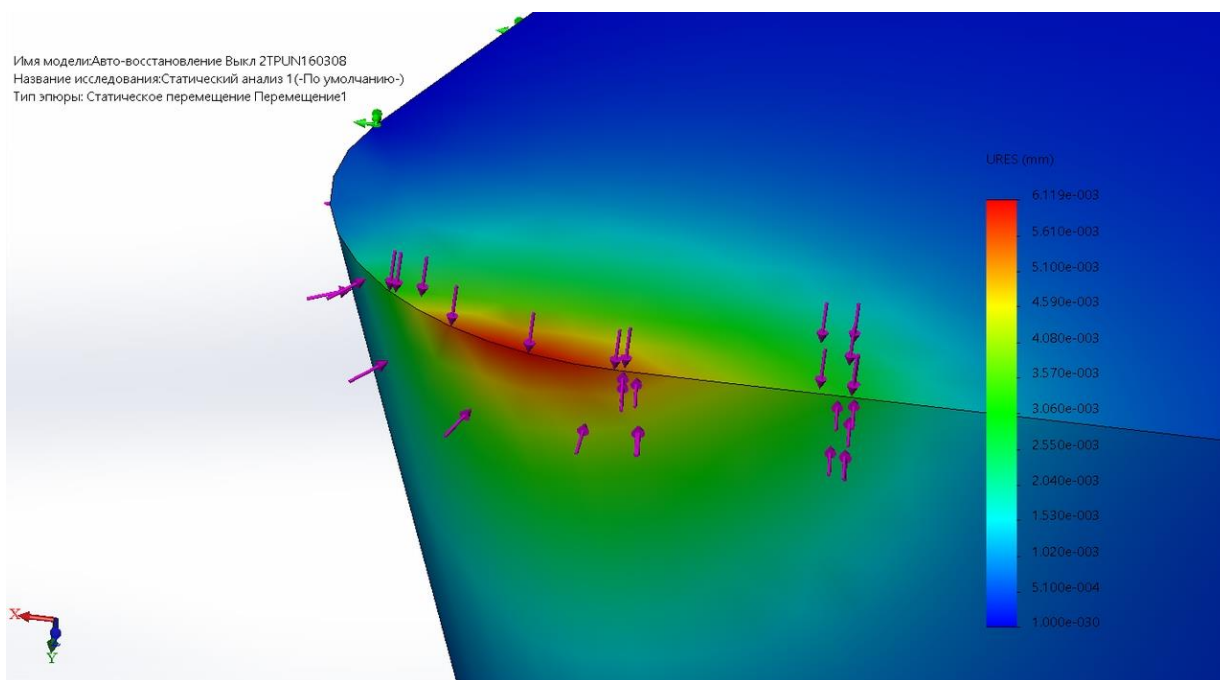


Рис. 5. Эпюра смещений

Расчетные смещения составляют по величине единицы микрометров, что соответствует величине зерна карбидной фазы.

### **Заключение**

Для корректной интерпретации полученных результатов следует учитывать тот факт, что при моделировании в САПР Solidworks материал режущей пластины рассматривается как однородная среда, что не соответствует действительности. При превышении предела текучести в материале, смещения развиваются преимущественно в кобальтовой связке, обладающей меньшей твердостью по сравнению с твердостью карбидной фазы. Сами величины смещений, соизмеримые по размерам со средними размерами зерна карбидной фазы, очевидно должны приводить к разрушению режущей пластины, что наблюдается в процессе износа. Определенные методом компьютерного моделирования области максимальных смещений и деформаций соответствуют областям интенсивного износа режущих пластин TPUN 160308. Определение скорости изнашивания требует выполнения динамических расчетов, что возможно только для материалов с предварительно идентифицированной структурой и требует использования специализированного программного обеспечения.

### **Библиографический список**

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. Т.2 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. М: Машиностроение, 2003. 944 с.
2. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев: Наукова думка. 1984. 328 с.
3. Карбид вольфрама // Википедия. [2019]. Дата обновления: 03.12.2019. URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=103680540> (дата обращения: 12.04.2020).

УДК 533.72:621.9.04.87

*А.А. Зайцев*

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь

### **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ**

**Аннотация.** В настоящее время кремнийорганические тонкие покрытия широко используются при решении сложных технических и технологических задач. Кремнийорганические покрытия имеют комплекс высоких физико-механических свойств, поэтому создание на их основе композиционных систем, а также исследование, разработка методов и оптимизация технологических приемов их формирования является в наше время важной задачей. В работе было произведено исследование кинетических особенностей электронно-лучевого диспергирования мишеней на основе кремнийорганической смолы.

**Ключевые слова:** кремнийорганические покрытия, низкоэнергетичный поток, смола К42, политетрафторэтилен, диспергирование.

Существует значительное количество технологических способов нанесения тонких кремнийорганических покрытий, позволяющих осаждать слои различного назначения.

Так, для формирования кремнийорганических медьсодержащих слоев в изученной работе [1] был использован гексаметилдисилоксан ( $\text{Si}_2\text{O}_6\text{H}_{18}$ ). Металлсодержащие тонкие слои формировались путем активации кремнийорганического соединения в аргоновой плазме магнетронного распылительного источника. Общее давление в вакуумной камере при нанесении составляло 10 Па. Методика позволяла легко варьировать химический состав осаждаемых покрытий (параметрами магнетронного распылительного источника, частотой впрыска кремнийорганического прекурсора) а, соответственно, их механические и антибактериальные свойства.

Одним из наиболее распространенных методов формирования кремнийорганических слоев является высокочастотный метод [2]. Летучие кремнийорганические соединения (мономеры) под действием активных компонентов плазмы вступают в реакции полимеризации на подложке. Давление при осаждении покрытий не превышает 0,1 мм. рт. ст. Параметры процесса: входная мощность, частота источника плазмы, общее давление, скорость потока газов, температура подложки, величина потенциала смещения на подложке и др., определяют структуру и свойства осаждаемых покрытий. Авторами отмечена различная плотность кремнийорганического слоя по толщине. Подобное изменение обусловлено процессами сшивки фрагментов макромолекул в результате ультрафиолетовой обработки растущего слоя и воздействия заряженных частиц. Процессы сшивки протекают одновременно с процессами диффузии низкомолекулярных соединений с объема на поверхность растущего слоя. Плазменная обработка может также инициировать реакции фотолиза кремнийорганических соединений. Отмечены высокие гидрофобные свойства осаждаемых слоев, адгезия к кремнийсодержащим материалам (образование химических связей  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ ). Авторами выявлены три этапа термического разложения тонких покрытий на основе кремнийорганических соединений [2, 3]. На первом этапе, при температуре ниже  $250^\circ\text{C}$ , изменение веса обусловлено потерей низкомолекулярных фрагментов. На втором этапе, при температуре до  $600^\circ\text{C}$ , происходит разрушение связи  $\text{Si}-\text{CH}_3$  с выделением водорода и углеводородов (метан, этан, этилен и др.). При температуре до  $780^\circ\text{C}$  образуется матрица, образованная  $\text{Si}-\text{C}$  и  $\text{Si}-\text{N}$  связями (отщепление заместителей от основной цепочки). Термическая обработка кремнийорганических покрытий сопровождается заметным повышением адгезионной прочности к металлическим подложкам и увеличением значения поверхностной энергии.

Кремнийорганические покрытия, сформированные из плазмы высокочастотного разряда, характеризуются величиной диэлектрической проницаемости более 4 (для  $\text{SiO}_2$  указанная величина равна 4) [4]. Отжиг тонких покрытий сопровождается снижением диэлектрической проницаемости, что связано с уменьшением общей ненасыщенности и дефектности в тонком слое. Увеличение диэлектрической проницаемости наблюдается при повышении воздействия на растущий слой ультрафиолетового излучения и ионной бомбардировки, нанесении покрытий с использованием кислорода. При использовании кислорода формируемые покрытия характеризуются более высоким содержанием гидроксильных групп. При отжиге гидроксильные группы участвуют в процессах образования химических сшивок. Наименьшей диэлектрической проницаемостью обладали покрытия, сформированные в среде водорода.

Покрытия на основе гексаметилдисилоксана, сформированные в высокочастотном разряде, представляют собой сшитые кремнийорганические структуры [5]. Химические сшивки, в большинстве случаев, образованы  $\text{Si}-\text{O}$  связями. Помимо  $\text{Si}-\text{O}$  связей в образовании сшитой структуры принимают участие химические связи  $\text{Si}-\text{CH}_2-\text{Si}$  и  $\text{Si}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Si}$ . В молекулярной структуре тонких слоев  $\text{Si}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{Si}$  цепочек выявлено не было. Авторами было отмечено, что процесс отщепления метильных групп от конкретного атома  $\text{Si}$  с последующим возникновением  $\text{Si}-\text{O}$  является случайным и зависящим от мощности разряда.



Известны технологические способы формирования кремнийорганических слоев при атмосферном давлении. В сравнении с вакуумными методами осаждения подобные методики имеют ряд преимуществ: низкая потребляемая мощность, высокие скорости осаждения ( $\sim 100\div 1000$  нм/с) в сравнении с вакуумными способами ( $\sim 1$  нм/с), технологическая простота нанесения. В качестве исходного кремнийорганического соединения используют низкомолекулярные кремнийорганические соединения, в частности гексаэтилдисилоксан  $(\text{CH}_3)_3\text{SiOSi}(\text{CH}_3)_3$ . Расстояние между соплом плазмотрона и поверхностью подложки определяет температуру формируемой струи. Регулируя параметры процесса, можно легко управлять морфологией (шероховатостью) осаждаемого слоя. Также покрытия формируются с использованием реактора, состоящего из двух плоских металлических электродов, покрытых боросиликатным стеклом, расстояние между которыми соответствовало 1 мм. Перед нанесением покрытия рабочий объем откачивался до 1 кПа и затем заполнялся смесью азота с гексаметилдисилазаном ( $\text{C}_6\text{H}_{19}\text{Si}_2\text{N}$ ) и гексаметилдисилоксаном ( $\text{C}_6\text{H}_{18}\text{Si}_2\text{O}$ ) до давления 101 кПа. Высокое напряжение с частотой 6 кГц было использовано для генерации шнурового разряда. Плотность мощности соответствовала  $10$  Вт/см<sup>3</sup>. Наносимые покрытия являлись полимерподобными и прозрачными в видимом диапазоне. Твердость пленок варьировалась от 0,3 до 0,6 ГПа, в зависимости от условий осаждения, модуль упругости – в диапазоне  $15\div 28$  ГПа, поверхностная энергия –  $30\div 45$  мДж/м<sup>2</sup> (на основе гексаметилдисилоксана),  $26\div 40$  мДж/м<sup>2</sup> (на основе гексаметилдисилазана). Существует аналогичный метод формирования в плазме барьерного разряда (dielectric-barrier discharge AP-DBD). При формировании кремнийорганических слоев в реактор запускали газовую смесь на основе гексаметилдисилоксана, азота и кислорода. Состав и структуру осаждаемых покрытий регулировали путем изменения концентрации кислорода в газовом потоке. Влияние кислорода проявлялось в снижении содержания Si – CH<sub>3</sub> и повышении доли Si – O связей в структуре тонкого слоя. Плотность кремнийорганических слоев, нанесенных с использованием малой концентрации кислорода в газовой смеси, соответствовала  $1,4$  г/см<sup>3</sup>. При высокой концентрации кислорода –  $2,2$  г/см<sup>3</sup>. Химический состав определяет гидрофобные свойства тонких слоев. Отмечено, что гидрофобные свойства покрытий на основе полидиметилсилоксана определяются содержанием Si – CH<sub>3</sub> групп. Соответственно, покрытия более высокой плотности характеризуется более низкими гидрофобными свойствами, но существенно более высокими барьерными и коррозионностойкими свойствами. Авторами отмечено, что для сшитых SiO<sub>x</sub>-подобных пленок характерны высокие внутренние напряжения, которые могут приводить к их растрескиванию. Показано, что высокая адгезия кремнийорганических покрытий к алюминиевым подложкам обусловлена образованием Al – O – Si связей.

В исследуемой работе был проведен сравнительный анализ структуры и свойств кремнийорганических слоев, сформированных различными методами: полимеризацией в плазме СВЧ (2,45 ГГц) и ВЧ (13,56 МГц) гексаметилдисилоксана и N<sub>2</sub>-PACVD (электронно-циклотронный резонанс) разряда 1,1,3,3-тетраметилдисилоксана. Давление газов при нанесении в плазме СВЧ и ВЧ разрядов соответствовало 0,27 Па, при реализации N<sub>2</sub>-PACVD способа – 560 Па. Показано, что покрытия, сформированные N<sub>2</sub>-PACVD способом, являются трехмерными сшитыми структурами, образованными длинными силоксановыми цепочками. Структуру тонких слоев, сформированных в плазме СВЧ и ВЧ разрядов, образуют слабосшитые через кислород кремнийорганические олигомеры. Сшивка в значительной степени реализуется через группы Si – CH<sub>2</sub> – Si. Плотность покрытий 1,1,3,3-тетраметилдисилоксана, нанесенных ВЧ и N<sub>2</sub>-PACVD методами значительно уступает плотности слоев, сформированных в СВЧ плазме (1,45). Это обусловлено более высокой плотностью сшивок Si – CH<sub>2</sub> – Si, активируемой интенсивной ионной бомбардировкой растущего слоя. Независимо от метода осаждения все покрытия характеризуются низкими

значениями поверхностной энергии. Авторами это было связано с присутствием неполярных метильных групп на поверхности осаждаемых слоев.

Формирование кремнийорганических слоев может осуществляться с использованием метода термокаталитического химического осаждения из газовой фазы (Hot-wire chemical vapor deposition (HWCVD, iCVD)). Метод заключается в термическом разложении октаметилциклотетрасилоксана на вольфрамовой сетке при температуре 800 – 1000 °С. При реализации данного способа нанесения растущий слой не подвержен воздействию со стороны потока энергетичных ионов и УФ излучения. Таким образом, устраняется причина появления в тонком покрытии различного рода структурных дефектов. Авторами отмечено, что рост покрытия происходит в отсутствие ионной бомбардировки. Ранее при рассмотрении плазменно-химического метода осаждения (plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD)) считалось, что возникновение активных центров, ответственных за рост тонкого слоя, невозможно в отсутствие ионной бомбардировки.

Многие покрытия формируются с помощью каскадного дугового источника. В качестве кремнийорганического прекурсора был использован гексаметилдисилоксан, смешиваемый с кислородом. Взаимодействие ионов и электронов аргоновой плазмы инициирует реакции диссоциации инжектированных газов. Кислород был необходим для удаления метильных групп из структуры прекурсора и формирования покрытий со стехиометрическим соотношением, характерным для SiO<sub>2</sub>. Способ нанесения позволял осаждавать покрытия с высокими скоростями >60 нм/с. Показатель преломления тонких слоев близок к показателю преломления чистого оксида кремния. Отличие обусловлено наличием пор и метильных групп в тонком слое. Термообработка сформированных сопровождается снижением плотности пор.

Следует отметить, что практически во всех технологических способах формирования кремнийорганических слоев используются низкомолекулярные соединения, технологические газы. Это делает технологические способы осаждения технически более сложными, так как требует соответствующего оборудования. Электронно-лучевое нанесение позволяет использовать в качестве мишени кремнийорганические смолы или полимер, механические их смеси с различными высокомолекулярными соединениями. Подобное существенно упрощает сам способ осаждения, позволяет управлять структурой осаждаемого слоя путем направленного инициирования химических взаимодействий между компонентами мишени. Способ электронно-лучевого диспергирования легко интегрируем с другими технологическими методами нанесения, в частности лазерным диспергированием, плазменной активацией продуктов диспергирования. В представленной работе рассмотрены особенности воздействия потока электронов на кремнийорганическую смолу, молекулярной структуры и свойств осаждаемых покрытий.

### Библиографический список

1. Daniel A., Le Pen C., Archambeau C., Reniers F. Use of a PECVD–PVD process for the deposition of copper containing organosilicon thin films on steel // *Applied Surface Science*. 2009. Vol. 256. P. 82–85.
2. Wrobel A. M., Kryszewski M. Preparation, structure, and some properties of organosilicon thin polymer films obtained by plasma polymerization // *Progr. Colloid. Polym. Sci.* 1991. Vol. 85. P. 91–101.
3. Wrobel A. M., Kowalski J., Grebowicz J., Kryszewski M. Thermal Decomposition of Plasma-Polymerized Organosilicon Thin Films // *J. Macromol. Sci-Chem., A*. 1982. Vol. 17. P. 433–452.
4. Casserly T. B., Gleason K. K. Chemical Vapor Deposition of Organosilicon Thin Films from Methylmethoxysilanes // *Plasma Process. Polym.* 2005. Vol. 2. P. 679–687.

5. Coopes I. H., Griesser H. J. The Structure of Organosilicon Plasma-Polymerized Coatings on Metal Substrates // Journal of Applied Polymer Science. 1989. Vol. 37. P. 3413–3422.

УДК 620.186.14

*А.О. Лептюк<sup>1</sup>, А.Д. Гусакова<sup>1</sup>, А.А. Горячкина<sup>1</sup>, А.С. Васянович<sup>1</sup>, Е.А. Рогачев<sup>1</sup>, Н.А. Погорелова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия

## **СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗЦОВ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ, ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ**

**Аннотация.** Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) установлены характерные структурные особенности образцов бактериальной целлюлозы (БЦ), полученных в среде с присутствием глицерина, пектина и отрубей. Установлено, что волокна БЦ имеют сложную фибриллярную структуру, толщиной фибрилл около 150 нм. Сами фибриллы представляют собой переплетение более мелких фибрилл, толщиной порядка 40 нм. Пространственная ориентация фибрилл, полученных в различных питательных средах, различна. Так, БЦ, выращенная в среде глицерин, обладает наибольшей пространственной упорядоченностью, что, вероятно, будет способствовать большей анизотропии свойств.

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, полуконтактный метод, бактериальная целлюлоза, структура.

Бактериальная целлюлоза является перспективным материалом медицинского и промышленного назначения. Она является биоразлагаемым материалом, ее можно применять для создания укрывного материала для заживления ран, в качестве базы для нанесения косметических средств, как материал для создания упаковки и даже как пищевую добавку. На сегодняшний день большое внимание уделяется исследованию методов выращивания БЦ и ее физическим свойствам, которые во многом обуславливаются ее структурой.

Целью данной работы является исследование методом атомно-силовой микроскопии структурных особенностей БЦ, выращенной в разных питательных средах.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи.

1. Изучить методы получения и основные физические свойства БЦ.
2. Изучить полуконтактную методику, реализуемую на атомно-силовом микроскопе NTEGRA фирмы NTMDT.
3. Исследовать данным методом структуру образцов БЦ, выращенной в различных питательных средах.

Бактериальная целлюлоза (БЦ) – органический материал, синтезируемый микроорганизмами. Можно применять в разных отраслях промышленности. Микроорганизмы различных видов изготавливают внеклеточную целлюлозу в виде гелевой пленки на поверхности питательной среды. Получение БЦ – непростой, а также продолжительный процесс. Целлюлоза представляет собой основной конструкционный материал большинства растений. Бактериальная целлюлоза характеризуется химической чистотой, в ней отсутствуют примеси лигнина, гемицеллюлоз и иных компонентов, сопутствующих растительной целлюлозе. Молекулярная формула, а также полимерный состав БЦ, соответствуют целлюлозе, выделенной из растительного сырья, однако при этом БЦ обладает более высокой кристаллическостью, модулем прочности на разрыв, влагопоглощающей способностью, пластичностью, а также характеризуется биоразлагаемостью.

В ходе биосинтеза микроорганизмы акцентируют наноразмерное волокно целлюлозы, и, так как все это происходит в гидрофитной среде, содержание в ней влаги составляет 99%. Способность полученного материала поглощать и удерживать воду столь велика, что осушить ее удастся исключительно при температуре выше 90 °С и при заморозке от –12 °С до –30 °С. В отличие от медицинских изделий из растительной целлюлозы, изделия из бактериальной наноцеллюлозы наиболее совместимы с человеческим организмом. Гель-пленку можно использовать для возобновления или замены твердой мозговой оболочки, а также в качестве заживляющих покрытий при ожогах и обширных ранах.

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) принадлежит к классу сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) высокого разрешения. Уникальность метода заключается в высоком пространственном разрешении, неразрушающем характере анализа, способности работы не только в условиях вакуума, но также в среде, и еще в получении трехмерного изображения рельефа.

АСМ используется для исследования рельефа поверхностей как проводящих аналогично непроводящим образцам (в отличие от туннельного микроскопа) с разрешением от десятка до доли ангстрем.

В основе работы микроскопа лежит взаимодействие зонда – кантилевера – с поверхностью исследуемого образца. Под взаимодействием понимается возникновение преобладающих попеременно сил отталкивания зонда и образца и сил притяжения, обусловленных силами Ван-дер-Ваальса (рис. 1). В полуконтактном режиме происходит «постукивание» зондом по поверхности образца, которое возбуждается внешним пьезоэлементом на резонансной частоте. При достаточно сильной амплитуде кантилевер прекращает установившуюся связь с образцом на каждом периоде «постукивания», следовательно, нивелируется воздействие сил трения и капиллярного залипания. В отличие от сканирующего туннельного микроскопа, с помощью АСМ можно анализировать как проводящие, так и непроводящие поверхности.

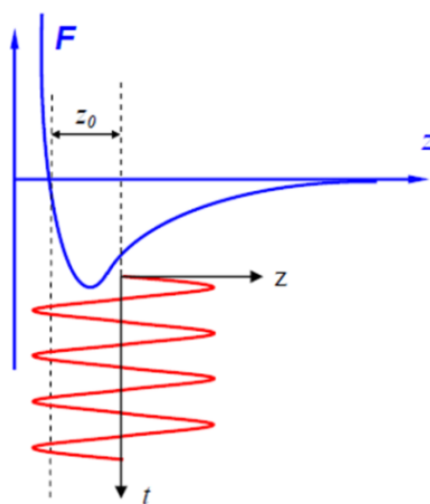


Рис. 1. Силовая кривая взаимодействия зонда с образцом

Полуконтактным методом исследуются незакрепленные на подложке хрупкие и трудно исследуемые прочими АСМ методиками образцы. При использовании данного способа давление кантилевера на поверхность образца существенно ниже, что позволяет взаимодействовать с наиболее мягкими и легко разрушающимися материалами, такими как полимеры, биоматериалы, клетки и другие живые объекты.

В данной работе исследовались образцы БЦ, полученные в пектиновой среде и среде с присутствием отрубей. Структура их поверхностей показана на рисунках ниже.

Микроструктура поверхности БЦ, синтезированной в среде на основе пектина, представлена на рис. 2.

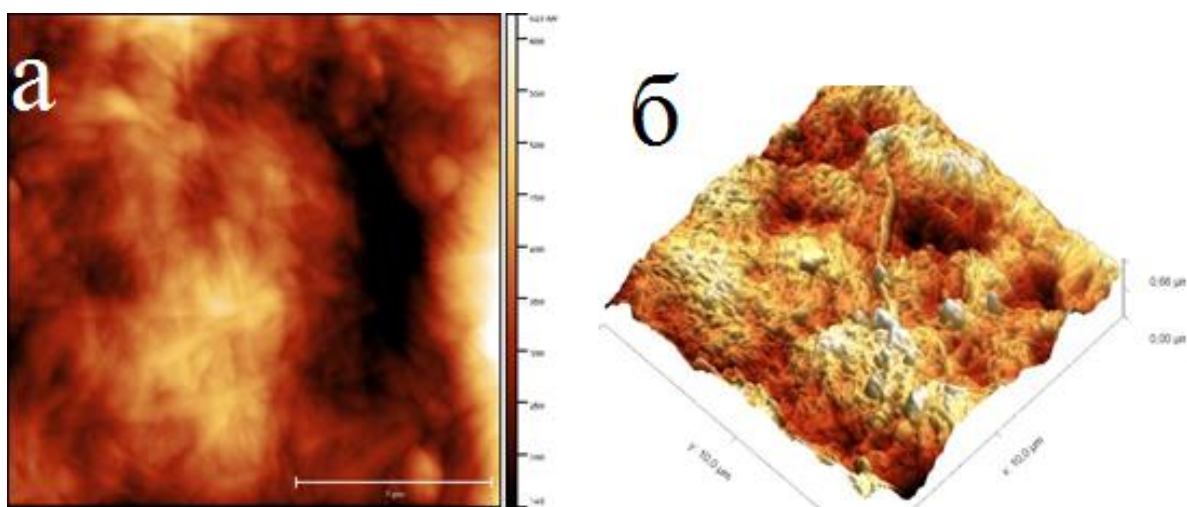


Рис. 2. Изображение топографии поверхности БЦ, синтезированной в среде на основе пектина: а) 2d–изображение, б) 3d–изображение

Из рис. 2 следует, что поверхность БЦ состоит из плотно упакованных микрофибрилл, макрорельеф разветвлённый, что является следствием неравномерности толщины образованной в процессе продуцирования гелеобразной пленки БЦ. Сами микрофибриллы хаотично переплетены, видимая длина их сегментов составляет около 1 мкм.

Ниже, на рис. 3, представлена микрофотография БЦ, полученная в питательной среде на основе отрубей.

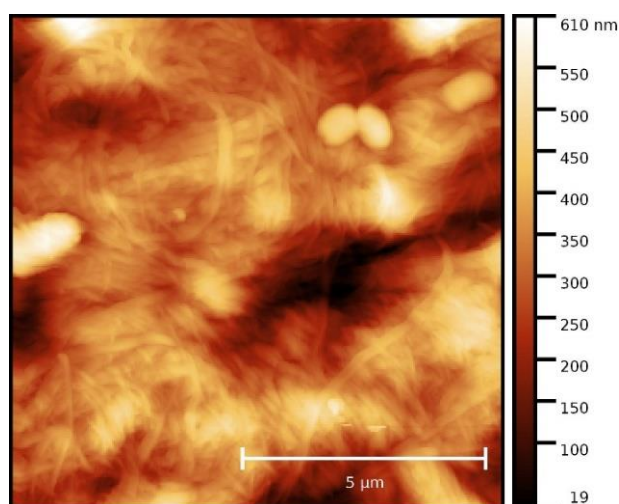


Рис.3. Микроструктура пленки, синтезируемой на основе отрубей

На данном рисунке видно присутствие остатков бактерий – продуцентов. Длина видимой части микрофибрилл значительно выше тех, что наблюдались в предыдущем образце, и составляет величину порядка 2–3 мкм. Сами микрофибриллы имеют также плотную упаковку, однако, несмотря на общую разупорядоченность направлений их пространственной ориентации, наблюдается формирование кластеров с преимущественной направленностью фибрилл. Данный факт может повлиять на различие физических свойств данных пленок, а именно их влагоудерживающей способности, их прочности.

Для повышения наглядности различия образцов, синтезированных в рассматриваемых средах, ниже на рис. 4 сопоставлены микрофотографии характерных участков исследуемых образцов.

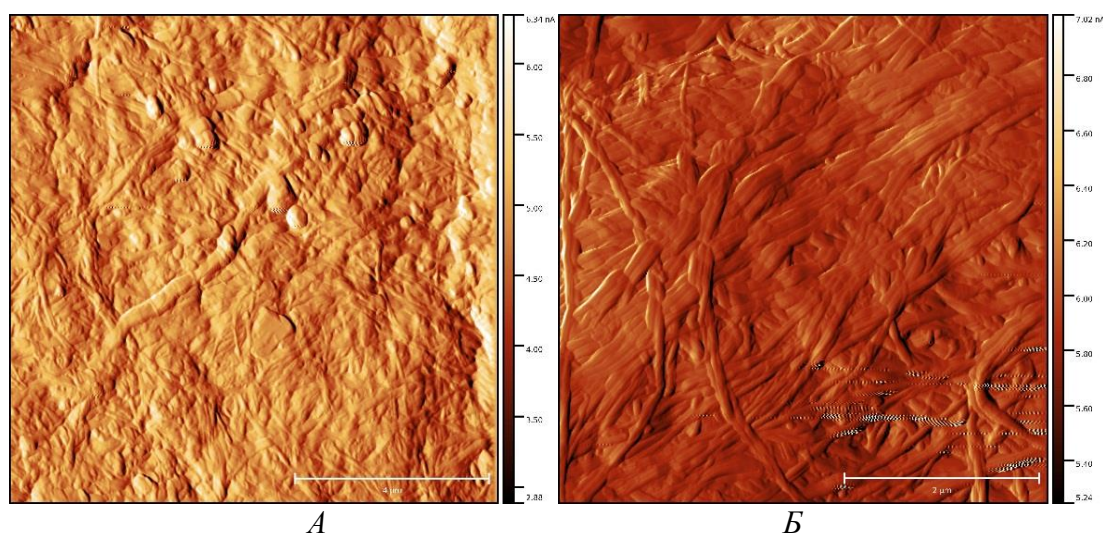


Рис.4. Различия по структуре и плотности клеток в БЦ на основе пектина (А) и БЦ на основе отрубей (Б)

Таким образом, в ходе данной работы была исследована микроструктура образцов БЦ, выращенных в двух вариантах питательных сред. Показано, что структура микрофибрилл образцов существенно не отличается. Однако их пространственная ориентация, наоборот, различается значительно. Предположительно, это повлияет на физико-механические характеристики данных образцов, такие как прочность, влагопитывающая и влагоудерживающая способность и т.д. Изучение данных различий является предметом дальнейших исследований этих образцов.

#### Библиографический список

1. Гладышева Е.К. Биосинтез бактериальной целлюлозы культурой *Medusomyces Gisevii* // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 3 (65). С. 149-156.
2. Громовых Т.И., Садыкова В.С., Луценко С.В. и др. Бактериальная целлюлоза, синтезируемая *Gluconacetobacter Hansenii*, для использования в медицине // Прикладная биохимия и микробиология. 2017. Т. 53, № 1. С. 69-75.
3. Ревин В.В. и др. Выделение и характеристика штаммов – продуцентов бактериальной целлюлозы // Микробиология. 2020. Т. 89. № 1. С. 88-98.
4. Чернигова С.В., Чернигов Ю.В., Погорелова Н.А., Горбатенко А.В. Наноматериал из бактериальной целлюлозы – современное средство для изготовления имплантатов трахеи // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 10 (180). С. 110-117.

*А. К. Насырова*

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО–ФАЗОВОГО СОСТАВА И МИКРОТВЕРДОСТИ ТЕРМОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ 7YSZ, ПОЛУЧЕННЫХ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

**Аннотация.** Рассмотрены структура и фазовый состав керамических термозащитных покрытий (ТЗП), полученных на сборке «керамика» плазматрона «Термоплазма 50-01». Рентгенофазовый анализ показал, что полученные покрытия содержат только тетрагональную фазу. Результаты измерения микротвердости показали, что режим напыления влияет на свойства покрытий.

**Ключевые слова:** термозащитные покрытия, диоксид циркония, лопатки газотурбинного двигателя, рентгенофазовый анализ, микротвердость.

Одним из основных элементов самолетов является газотурбинный двигатель. Газотурбинный двигатель работает за счет энергии сжатого и нагретого газа, которая преобразуется в механическую энергию с помощью вращения лопаток. Таким образом, лопатки газотурбинного двигателя подвергаются воздействию больших термических и механических нагрузок. Лопатки работают при высокой температуре в газовой среде, содержащей агрессивно действующие вещества, которые способствуют возникновению газовой коррозии, разрушающей лопатки. Жаростойкие и жаропрочные никелевые сплавы получили широкое распространение для изготовления лопаток. Однако температура, при которой лопатки двигателя способны сохранять свою работоспособность, ограничена температурой плавления никелевых сплавов. Наиболее эффективным способом защиты лопаток является нанесение керамических термозащитных покрытий (ТЗП).

В качестве материала ТЗП широко используется диоксид циркония  $ZrO_2$ . Данный материал имеет один из самых низких из всех керамических материалов коэффициент удельной теплопроводности, что имеет большое значение при выборе материала для ТЗП [1]. Диоксид циркония существует в трех модификациях: моноклинной ( $m-ZrO_2$ ), тетрагональной ( $t-ZrO_2$ ) и кубической ( $c-ZrO_2$ ). Большое значение для получения термозащитных покрытий имеет  $t-ZrO_2$ , т.к.  $m-ZrO_2$  является низкотемпературной фазой, а  $c-ZrO_2$  обладает низкой трещиностойкостью [2]. Для обеспечения возможности применения  $t-ZrO_2$  необходимо стабилизировать его оксидом иттрия  $Y_2O_3$ . Данный оксид образует твердый раствор с диоксидом циркония, что является одной из причин выбора стабилизирующего оксида [3]. Диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, является общераспространённым материалом для напыления ТЗП. Широкое распространение получили термозащитные покрытия, стабилизированные 7-8 %  $Y_2O_3$ .

В настоящее время в промышленности широко применяются плазменные методы напыления покрытий. Структура термозащитных плазменных покрытий представляет собой слоистый материал, образованный из деформированных частиц (ламелей), толщина которых достигает несколько микрон. Покрытия с данной структурой характеризуются небольшим сроком службы из-за микротрещин, которые образуются параллельно поверхности подложки. Однако низкая стоимость оборудования и высокая производительность плазменного метода напыления гарантируют данному методу коммерческую привлекательность [4]. Для того чтобы сформировать структуру с желаемыми свойствами, необходимо оптимизировать режимы напыления. Таким образом, изменяя параметры

режимов плазменного напыления, можно минимизировать недостатки структуры ТЗП, полученной плазменным напылением.

Цель данной работы заключается в разработке режимов напыления, которые позволяют получить термозащитные покрытия с улучшенными механическими, физическими и эксплуатационными характеристиками.

В данной работе была исследована структура покрытий из диоксида циркония, стабилизированного 7 % масс. оксидом иттрия (7YSZ). Для нанесения покрытий была использована технология плазменного напыления. Напыление покрытий было проведено в Институте прикладной и теоретической механики СО РАН на установке плазменного напыления порошковых материалов «Термоплазма 50-01». Напыление было проведено на сборке «керамика». Порошок из диоксида циркония напыляли на таблетки из коррозионностойкой стали диаметром 15 мм. Нумерация режимов напыления в зависимости от технологических параметров представлена в таблице 1. Перед напылением диоксида циркония на поверхность подложки нанесли подслоя из порошка ПНХ20К20Ю13 (NiCrAlY), частицы которого имели размеры 20–63 мкм. Металлический подслон уменьшает разницу термического расширения между подложкой и керамическим слоем, тем самым снижая возникающие в покрытии напряжения. Толщина подслоя составила 50–100 мкм.

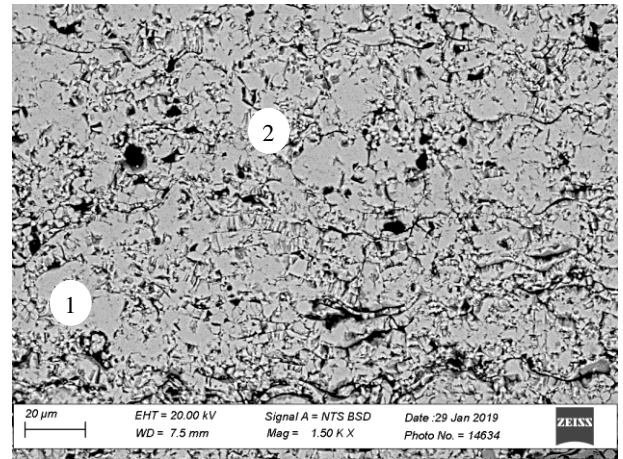
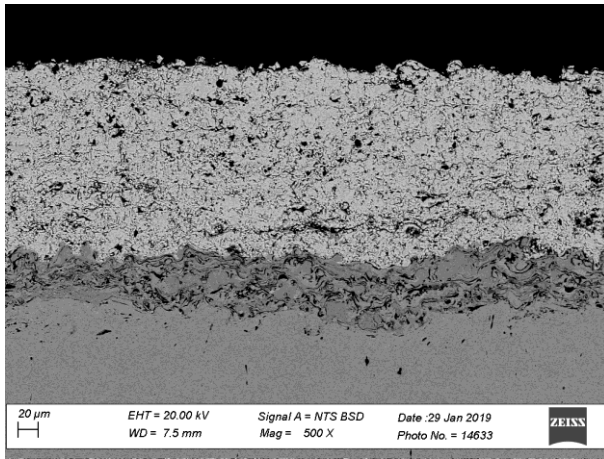
Таблица 1

<b>Режимы плазменного напыления</b>				
Расход порошка ток дуги	Размер порошка			
	20–40 мкм		40–63 мкм	
	Дистанция напыления			
	L=150 мм	L=200 мм	L=150 мм	L=200 мм
	Номер режима			
1.5 г/с 200 А	1	2	3	4
1.25 г/с 200 А	5	6	7	8

Для структурных исследований были подготовлены микрошлифы по стандартной методике. Структурные исследования покрытий проводили на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP. Фазовый состав был определен на дифрактометре Thermo Scientific ARL X'TRA. Измерение микротвердости покрытий проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76. Для проведения исследований был использован микротвердомер Wolpert Group 402MVD.

Структура полученных покрытий практически не отличается. На рис. 1 в качестве примера приведена структура покрытия, полученного на режиме № 5. Видно, что покрытия состоят из частиц  $ZrO_2$ . Во всех покрытиях можно заметить наличие плотных участков (1) и рыхлых участков (2), плотность которых ниже, чем плотность участков (1). В покрытиях, полученных по режимам № 5 и № 8, наблюдается максимальная доля плотных участков. По режиму 5 малая скорость подачи керамического порошка и малый размер частиц 20–40 мкм ведут к более полному нагреву и расплавлению керамических частиц; по режиму 8 – малая скорость подачи керамического порошка. Частицы с большим размером 40–63 мкм не должны были полностью расплавиться, однако более большая дистанция напыления позволяет керамическим частицам полностью расплавиться.





а  
б  
Рис. 1. Структура покрытия, полученного по режиму 5

Рентгенофазовым анализом показано, что все покрытия состоят только из тетрагональной фазы диоксида циркония. В качестве примера, на рис. 2 приведена рентгенограмма покрытия, полученного по режиму № 5.

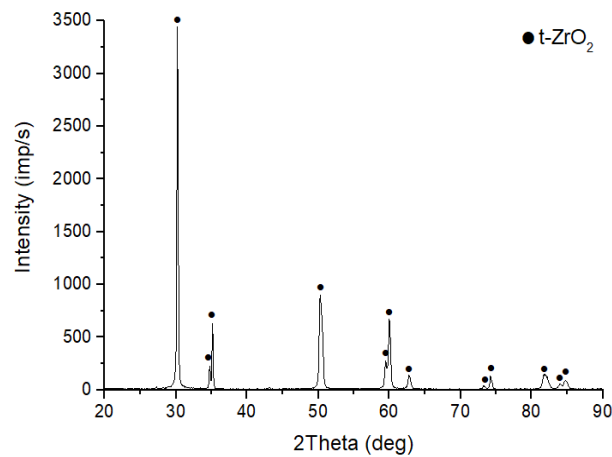


Рис. 2. Рентгенограмма покрытия, полученного по режиму 5

Результаты измерений микротвердости покрытий представлены на рис. 3. Измерения микротвердости показали, что максимальную твердость имеют покрытия, полученные на режимах № 5 и 8, что хорошо согласуется со структурными исследованиями.



Рис. 3. Результаты измерения микротвердости

Таблица 2

**Результаты измерения микротвердости**

Режим	Микротвердость, HV
1	569±89
2	597±143
3	606±139
4	507±120
5	993±53
6	693±121
7	534±77
8	972±42

В заключении можно сделать следующие выводы.

1. Покрытия, полученные на сборке «керамика», состоят только из t-ZrO<sub>2</sub>.
2. Полученные покрытия характеризуются наличием плотных и рыхлых участков. Наибольшее количество плотных участков наблюдалось в покрытиях, полученных на режимах 5 и 8.
3. Максимальными значениями микротвердости обладают покрытия, полученные на режимах 5 и 8.

**Библиографический список**

1. Чубаров С. А., Будиновский С. А. Выбор керамического материала для теплозащитных покрытий лопаток авиационных турбин на рабочие температуры до 140 °С // Труды ВИАМ. 2015. №4. С. 45–53.
2. Green D. J., Hannink R. H. J. Transformation Toughening of Ceramics. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2018. 232 p.
3. Оковитый В. В. Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий // Наука и техника. 2015. № 5. С. 26–32.
4. Будиновский С. А., Чубаров Д. А., Матвеев П. В. Современные способы нанесения теплозащитных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 5. С. 38–44.

УДК 620.186.12

*А.С. Ракитина, С.К. Христофоров, Л.П. Шонина, Е.А. Рогачев*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО-  
ЛЕГИРОВАННОМ МЕТАЛЛЕ, ПОДВЕРЖЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИЮ  
АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ**

**Аннотация.** Методом сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) в контактном режиме исследованы структурные изменения в немодифицированном металле, подверженном коррозионному воздействию, а также металлу с нанесенным гальваническим методом легирующим слоем цинка. Полученные закономерности показывают возможность применения метода СЗМ для оперативной экспресс-оценки степени деструкции материала.

**Ключевые слова:** сканирующая зондовая микроскопия, контактный метод, коррозионное воздействие, легирование.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) – один из мощных современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением. СЗМ имеет множество методов работы. В ходе выполнения данной работы посредством контактного метода были исследованы структурные изменения на поверхности стальных образцов, подверженных воздействию агрессивной среды.

С помощью лазерного анализатора металлов ЛИС-01 установлен состав металлического образца. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Сравнение состава стали 45Г и экспериментального состава образца**

Состав стали 45Г	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
ГОСТ	0,42-0,5	0,17-0,37	0,7-1	До 0,3	До 0,035	До 0,035	До 0,3	До 0,3	~97
Эксперим. данные	0,53 ±0,09	0,19 ±0,04	0,9 ±0,11	0,06 ±0,09	-	-	0,02 ±0,04	0,03 ±0,01	98,27 ±0,1

По данным анализа установлено, что образец изготовлен из стали 45Г. Данный материал применяется в основном для производства коленчатых валов, шатунов, карданных валов, тормозных рычагов, дисков трения, зубчатых колес, шлицевых и шестеренных валов, анкерных болтов [1].

Изделия из этого материала в процессе эксплуатации часто подвергаются воздействию агрессивных сред. В данной работе в качестве агрессивной среды использовалась вода. Воздействие воды на изделие приводит к появлению коррозии. Коррозия — это процесс самопроизвольного разрушения металлов и сплавов под влиянием внешней среды. Ржавчина на поверхности стальных или чугунных изделий – это частный случай коррозии [2].

Основные методы защиты от коррозии следующие: шлифование поверхностей изделия, чтобы на них не задерживалась влага; применение легированных сплавов, содержащих специальные добавки; нанесение защитных покрытий; электрохимические методы защиты; специальная обработка электролита или той среды, в которой находится защищаемая металлическая конструкция [3].

В данной работе в качестве защиты от коррозии был применен метод легирования стали цинком гальваническим способом, как наиболее доступный и простой метод. Стоит заметить, что оцинкованное железо при нарушении целостности защитного покрытия разрушаться не будет (цинк разрушается в первую очередь, как более активный металл).

Цель исследования: изучение возможности применения метода СЗМ для экспресс-диагностики состояния эксплуатируемых изделий, подверженных коррозионному воздействию окружающей среды, а также способов защиты от нее.

Исследование образцов проводилось в режиме к-АСМ на зондовой нанолaborатории NTEGRA. Предварительная подготовка образца заключалась в обработке исследуемой поверхности этиловым спиртом с последующей сушкой.

С целью исследования исходного состояния поверхности было проведено сканирование исходной поверхности образца. Размеры сканирования составили 5x5 мкм, 10x10 мкм, 30x30 мкм, 100x100 мкм. На рис. 1 приведена топография участка поверхности исходного образца размером 10x10 мкм.

Исходная поверхность относительно однородная. Средняя шероховатость  $0,0567 \text{ мкм}$ . На поверхности отмечаются отдельные точечные выступы, диаметром  $0,08 \text{ мкм} - 0,3 \text{ мкм}$ .

На следующем этапе работы стальной образец был подвергнут воздействию агрессивной среды. Для этого образец поместили в воду на 10 дней. Спустя установленное время на образце появились следы коррозионного воздействия. На поверхности материала появился осадок бурой ржавчины. После этого образец снова очистили этиловым спиртом, высушили.

Затем исследовали топографию поверхности с тем же разрешением, что и предыдущий образец. На рис. 2 приведена топография поверхности образца после коррозии.

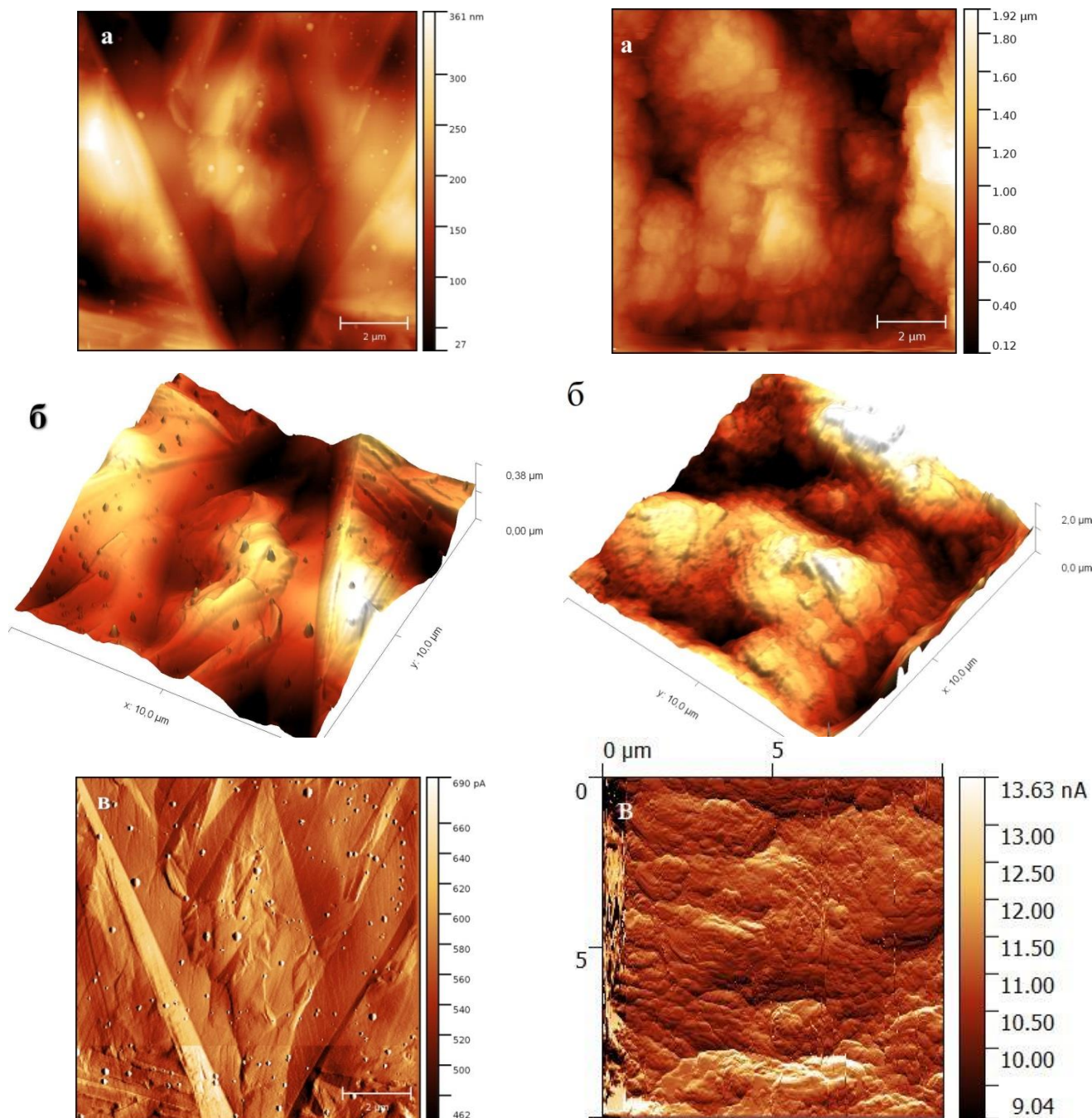


Рис. 1. Топография поверхности исходного образца: (а) 2d-изображение, (б) 3d-изображение, (в) сигнал  $dI$

Рис. 2. Топография поверхности образца после коррозии: (а) 2d-изображение, (б) 3d-изображение, (в) сигнал  $dI$

После химической коррозии структура изменилась, стала более шероховатой, показатель средней шероховатости равен 0,4394 мкм, поверхность приобрела резкие провалы и возвышения. Так, при размерности 10x10 мкм максимальная высота пиков уже достигает значения 1,86 мкм, в сравнении с аналогичным участком исходного образца, где максимальная высота достигала выступов 0,44 мкм.

Оцинковка. Новый образец подготовили к процессу оцинковки: очистили при помощи этилового спирта и высушили. Затем при помощи проводов соединили источник постоянного тока с образцом («-» потенциал) и с цинковым электродом («+» потенциал). На цинковый электрод надели вату, пропитанную ортофосфорной кислотой ( $H_3PO_4$ ). Подавая на электроды напряжение величиной 12 В, водили цинковым электродом по поверхности образца. Поверхность образца сменила цвет на серебристый, появился характерный блеск.

Исследовали топографию полученной поверхности (рис.3).

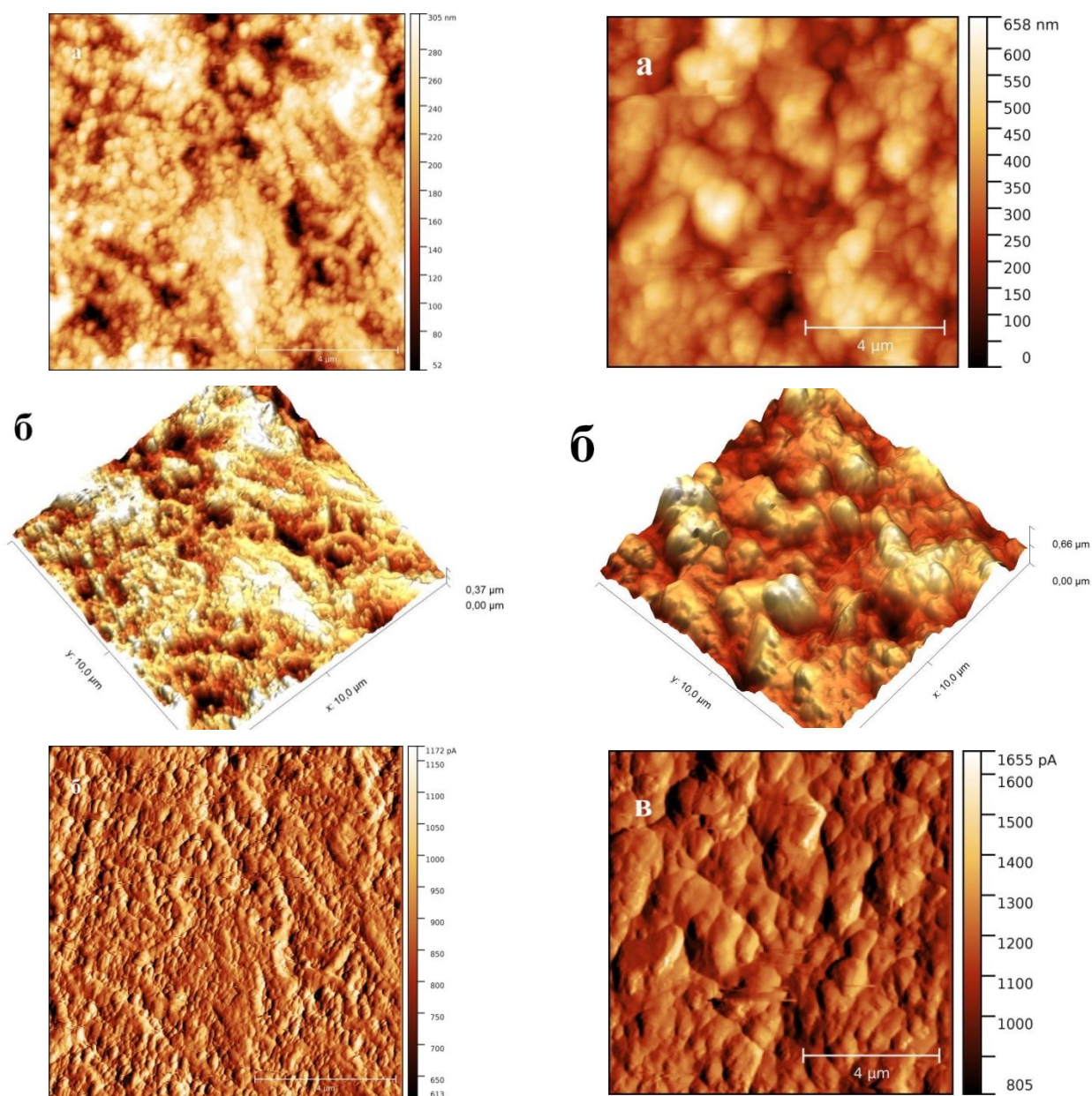


Рис. 3. Топография оцинкованной поверхности образца: (а) 2d–изображение, (б) 3d–изображение, (в) сигнал dfl

Рис. 4. Топография оцинкованной поверхности образца после коррозионного воздействия: (а) 2d–изображение, (б) 3d–изображение, (в) сигнал dfl

Исследование структуры оцинкованной поверхности образца показало, что отдельные точечные выступы имеют ширину 4,9–6,5 мкм. Средняя шероховатость, по сравнению с исходным образцом, выросла более чем в три раза и равна 0,1653 мкм.

На заключительном этапе поместили образец в агрессивную среду (воду) на 10 дней. Спустя установленное время на образце наблюдался осадок белого цвета. Данный осадок являлся продуктом окисления цинка. Следовательно, в опыте 2 разрушившийся металл – цинк, а не железо. Железо, если оно соприкасается с цинком, коррозии не подвергается.

Образец после процесса коррозии очистили при помощи этилового спирта. Затем исследовали топографию поверхности с тем же разрешением, что и предыдущие образцы. На рис. 4 приведена топография поверхности легированного образца после коррозии.

Таблица 2

**Сравнение параметров максимального перепада высот**

Размерность, мкм	Обычная сталь, мкм	Сталь после процесса коррозии, мкм	Оцинкованная сталь, мкм	Оцинкованная сталь после процесса коррозии, мкм
5x5	0,24	1,23	0,25	0,44
10x10	0,44	1,86	0,40	0,65
30x30	0,78	-	1,00	2,56
100x100	1,86	-	1,93	-

Из приведенных данных следует, что поверхность оцинкованного металла после химической коррозии относительно гладкая по сравнению со структурой обычной коррозированной стали, однако появилось больше точечных выступов, поверхность приобрела плавные переходы между высотами и стала более похожей на хлопьевидную. В сравнении со сталью до коррозии, где максимальная высота точечных дефектов достигала 0,44 мкм при размере скана 10x10 мкм, после процесса коррозии, при том же размере скана, высота дефектов достигает 0,65 мкм.

Таким образом, коррозионное разрушение сплавов наносит большой экономический и экологический вред. Затраты на возмещение потерь, связанных с коррозией, колоссальны. Они составляют около 30% годового производства металлов во всем мире [4]. Однако, внешние признаки коррозии проявляются на металле гораздо позже, чем начинается разрушение. Исследование коррозии контактным методом СЗМ позволяет оперативно зафиксировать воздействие агрессивной среды, факт наличия изменений и принять меры.

**Библиографический список**

1. Применение сталей: справочник. URL: <https://www.m-invest.ru/spravochniki/primenenie-staley/> (дата обращения: 05.03.2020).
2. Филимонова В. А., Харчевникова Е. О. Защита металлов от коррозии // Вологодские чтения. 2009. № 76. С. 128-129.
3. Стаханова А. Я. Способы борьбы с коррозией стали // Наука, образование и культура. 2019. № 3. С. 27-28.
4. Янин Е. П. Коррозия металлов и металлических конструкций как источник загрязнения окружающей среды // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2007. № 6. С. 46-92.

*Е.А. Рогачев, А.С. Мазурова, Д.К. Сарсембаева, К.В. Олейник, А.Е. Постнов*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННОСТИ СТАЛИ МЕТОДОМ СЗМ

**Аннотация.** В работе показана возможность применения сканирующего зондового микроскопа для выявления обезуглероживания стали методом сканирующей зондовой микроскопии. Методом контактной зондовой микроскопии исследованы образцы стали 65С2ВА с нормальным для этой стали содержанием углерода и с признаками обезуглероженности после закалки. Выявлены их структурные особенности.

**Ключевые слова:** сканирующая зондовая микроскопия, обезуглероженная сталь, закалка, метод постоянной высоты, технология производства, сталь 65С2ВА.

При нарушении технологии производства изделий из стали происходит их обезуглероживание, что приводит к значительному ухудшению их эксплуатационных характеристик. Происходить это может как на этапе изготовления сырья для производства деталей, так и на этапе закалки конечного изделия.

Традиционным методом выявления обезуглероженности сталей является метод, основанный на травлении поверхности с последующим исследованием ее оптическими или электронными микроскопами [1]. Данные методы предполагают наличие специальных знаний и соответствующей материальной базы. В данной работе предпринята попытка диагностирования обезуглероженности стали прямым микроскопическим методом.

Объектом исследования в работе является сталь 65С2ВА. Она относится к конструкционным сталям рессорно-пружинного назначения [2]. Применяется при изготовлении особо нагружаемых и ответственных рессор и пружин. Так же используется при изготовлении мембран, пружинных шайб, упругих однослойных или многослойных гофрированных оболочек. Такие детали должны обладать высоким пределом упругости, под действием многократных нагрузок противостоять разрушению, быть достаточно пластичными. Чаще всего такие стали выпускаются как в виде полос, имеющих различное сечение, так и в виде проволоки.

Чтобы сформировать уже готовое изделие, используют «сырую» сталь. Для того чтобы деталь обладала всеми необходимыми эксплуатационными свойствами, ее подвергают закалке и дальнейшей обработке при условиях, указанных в таблице 1.

Таблица 1

Условия закалки стали 65С2ВА

Марка стали	Температура закалки, °С	Закалочная среда	Температура отпуска, °С
65С2ВА	850	Масло	420

Для оценки степени трудозатрат определения обезуглероженности стали рассмотрим основные этапы, соответствующие традиционной методике. Первым этапом выступает определение глубины обезуглероживания. Для этого производят выбор образца шлифа из случайно подобранных листов, проволок или лент нужной стали. С помощью резца или других холодных механических способов, которые не вносят изменений в структуру рассматриваемого объекта, перпендикулярно ходу волокна делается срез образца. Вторым этапом производят полировку шлифа. Следующим действием образец подвергают травлению в растворе тринитрофенола в этиловом спирте или в двух- или

четырёхпроцентном растворе  $\text{HNO}_2$  (могут применяться и другие реактивы). Такое действие обеспечивает однозначное выявление микроструктуры поверхности. Если же травление производится в растворе  $\text{HNO}_2$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$ , то проводят просушивание шлифа теплым воздухом. Как известно, существуют две зоны обезуглероживания, это зоны полного и частичного обезуглероживания. Первую зону характеризует состав чистого феррита, вторую состав основного металла. Глубина обезуглероживания также характеризуется двумя зонами того же обозначения [3]. Измеряют глубину от края шлифа до основной структуры используемого металла. При выявлении отсутствия зоны полного обезуглероживания, оставшуюся зону измеряют по тем же условиям. Обезуглероживание как дефект распределено по всему металлу. Можно выделить местное обезуглероживание – на различных участках металла – и равномерное – по всему исследуемому образцу. Глубину дефектного слоя определяют по максимальной глубине в материале, в которой выявлено наличие обезуглероживания, либо выбирая из пяти измерений среднее в областях значительного обезуглероживания, обязательно указывая максимальную глубину.

В данной работе предпринята попытка идентификации обезуглероживности стали методом сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) [4]. При исследовании рельефа с индивидуальным разбросом высот на плоскости и его характерных качеств применяются особо изготовленные тонкие стержни (зонды) в форме иголок. Острие имеет размеры около 10 нм.

Некоторые методы СЗМ основаны на фиксировании сил межмолекулярного взаимодействия (сил Ван-дер-Ваальса). При помощи степенной функции – потенциала Леннарда-Джонса, изображенного на рис. 1., – происходит оценка энергии взаимодействия двух атомов, расположенных на расстоянии  $r$  др. от др.

$$U_{LD}(r) = U_0 \left\{ -2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^6 + \left( \frac{r_0}{r} \right)^{12} \right\}$$

Для оценки силы, с которой взаимодействует зонд с образцом, используется потенциал Леннарда-Джонса. Чтобы вычислить совместную энергию системы, производится сложение простых взаимодействий для каждого из атомов объектов.

При регистрации небольших скручиваний консоли датчика зонда происходит формирование изображения топографии поверхности, что указывает на взаимосвязь данных действий. Чтобы изображение было четким и удобным для просмотра, используют оптические методы. Используемая оптическая система АСМ поставлена так, что лазер фокусируется на консоли зондового датчика, отражается и попадает в центр обладающей восприимчивостью к свету области [5].

Система обратной связи (рис. 2) обеспечивает постоянный изгиб консоли, достигаемый с помощью пьезоэлектрического исполнительного элемента, задаваемый оператором.

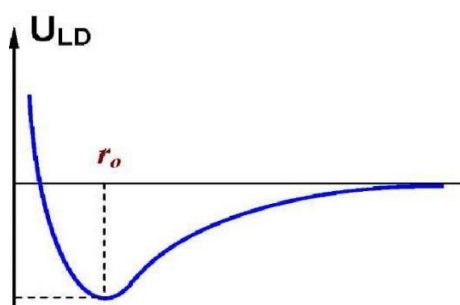


Рис. 1. Потенциал Леннарда-Джонса (качественный вид)

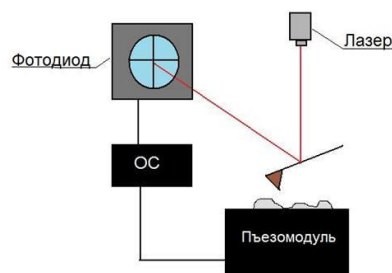


Рис. 2. Схема формирования обратной связи в АСМ



Для исследования образца применялся метод постоянной силы, в котором зонд постоянно взаимодействует с поверхностью. При условии что обратная связь отключена, помещенный на чипе кантилевер находится на определенной высоте все время в течение эксперимента. Следовательно, величина, отображающая изгиб кантилевера, при неучитываемых отклонениях аналогична силе, прижимающей кантилевер к поверхности, и отображает топографию поверхности металла [6].

В качестве объекта исследования выбран образец стали 65С2ВА после закалки, для которого в лаборатории завода методом травления с последующим оптическим анализом установлено отсутствие обезуглероженности. Топография поверхности исследованного образца представлена на рис. 3. Представленный размер сканируемой области 20x20 мкм.

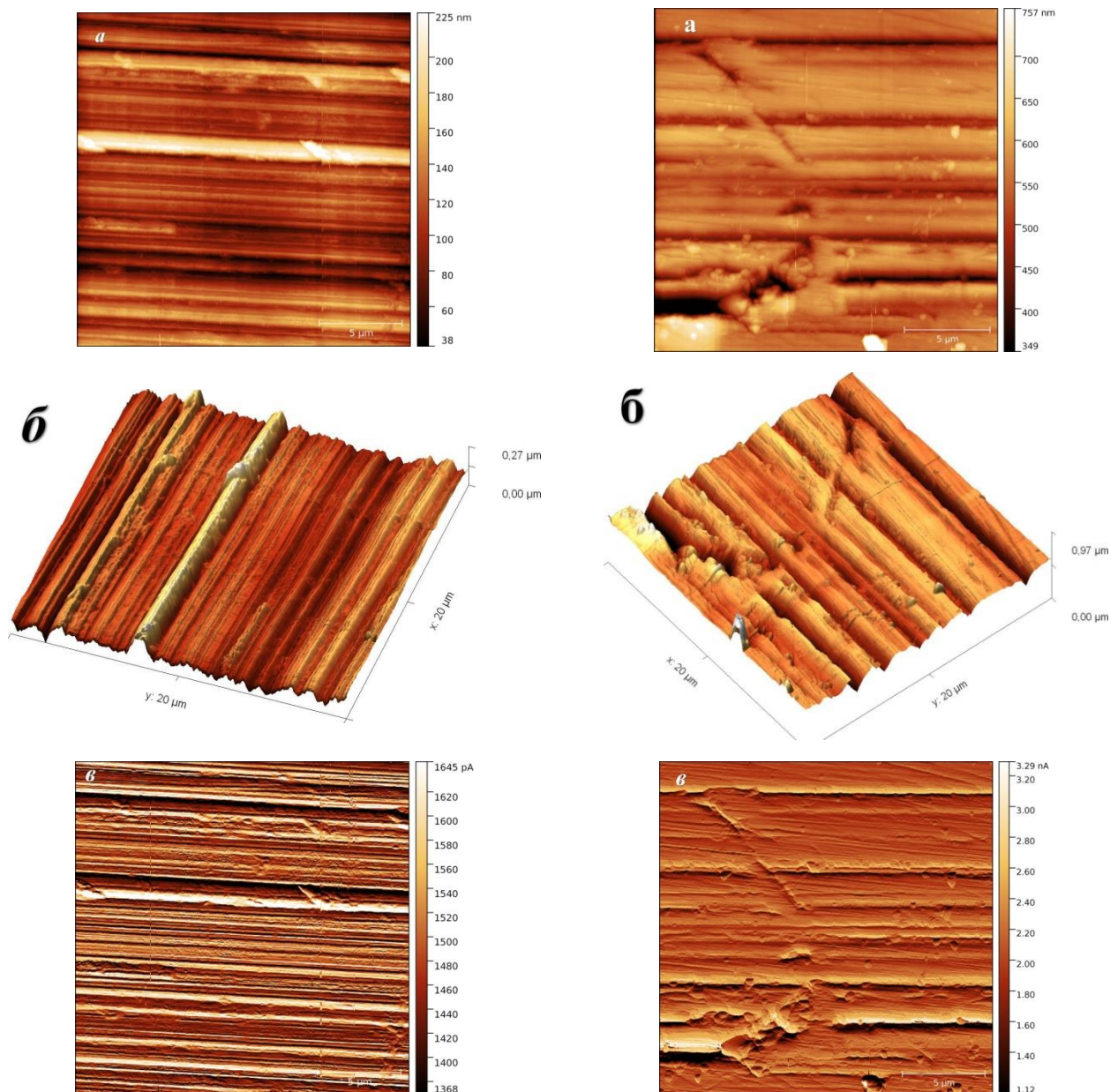


Рис. 3. Микрофотография поверхности образца стали 65С2ВА после закалки без признаков обезуглероженности: (а) 2d изображение поверхности, (б) 3d изображение поверхности, (в) дифференциальный сигнал

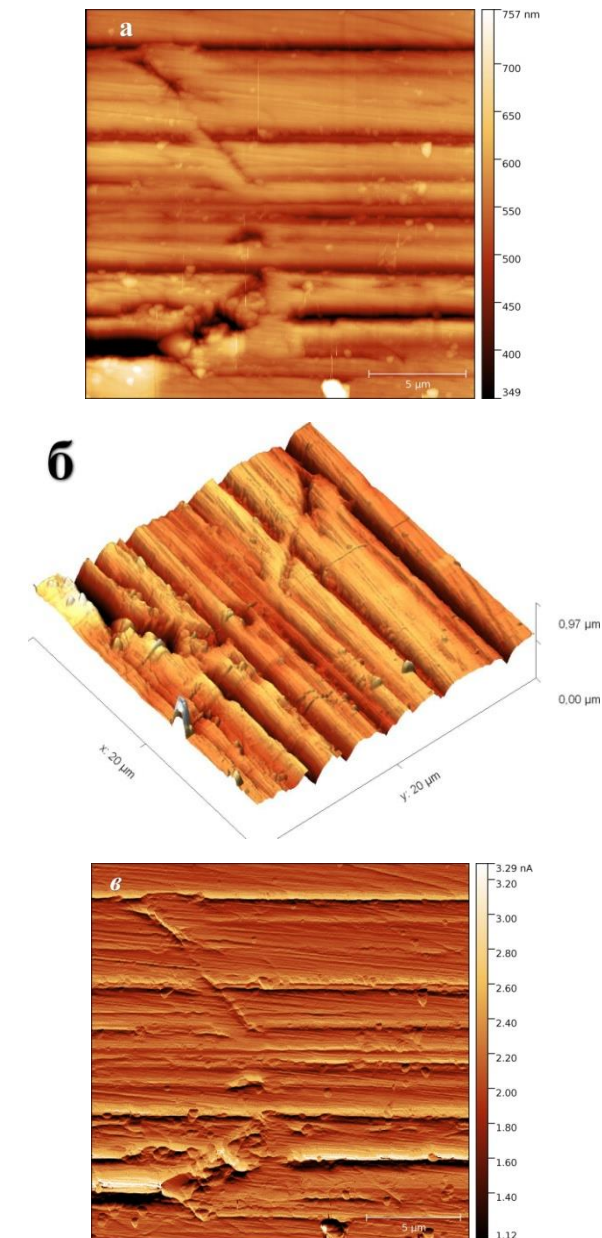


Рис. 4. Микрофотография поверхности обезуглероженного образца стали 65С2ВА после закалки: (а) 2d изображение поверхности, (б) 3d изображение поверхности, (в) дифференциальный сигнал

Анализ изображения показывает, что на поверхности присутствуют лишь канавки, сформированные в процессе шлифовки и полировки образца. В целом поверхность однородная без каких-либо характерных структурных особенностей.

Далее исследовался образец стали 65С2ВА после закалки, для которого выявлено в лаборатории присутствие обезуглероженного слоя. Учитывая, что в процессе закалки больше всего обезуглероживанию подвергаются приповерхностные слои, исследование проводилось на краю образца, на расстоянии не более 1 мм от края. Топография поверхности исследованного образца представлена на рис. 4. Представленный размер сканируемой области 20х20 мкм.

Анализ изображения данного образца показывает, что в отличие от предыдущего образца на поверхности присутствуют впадины глубиной до 550 нм, шириной до 1,5 мкм, а также зерна, диаметром около 300 нм. Все это косвенно свидетельствует о присутствии участков с измененной поверхностью, которая вероятно вызвана термоионной эмиссией углерода.

Результаты исследования показывают, что действительно методом СЗМ можно проводить выявление обезуглероженности стали. Преимуществом данного метода является его экспрессность, а также необходимость для анализа малого объема исследуемого материала. Высокая точность диагностики достигается комбинацией методов, однако метод СЗМ может быть использован в качестве инструмента первичного анализа.

### Библиографический список

1. Адашкин А. М. Инструментальные материалы в машиностроении. М.: Форум, ИФРАМ, 2015. 319 с.
2. Раскатов В. М., Бессонова Н. Ф. [и др.] Машиностроительные материалы. Краткий справочник: 2-е изд., перераб. и доп.. М.: "Машиностроение", 1969. 532 с.
3. ГОСТ 1763-68. Сталь. Методы определения глубины обезуглероженного слоя (с Изменениями N 2, 3, 4). М.: Изд-во стандартов, 1970. 31 с.
4. Схема работы атомно-силового микроскопа: Электрон. журн. URL: [http://www.nanoscopy.org/tutorial/nanoscopy\\_course/erofeev/index.htm](http://www.nanoscopy.org/tutorial/nanoscopy_course/erofeev/index.htm), (дата обращения: 24.03.2020).
5. Исследование материалов с помощью АСМ методов, основанных на электростатическом взаимодействии URL: <https://www.ntmdt-si.ru/resources/applications/exploring-materials-with-afm-based-electrostatic-modes> (дата обращения: 21.03.2020).
6. Нагорнов Ю. С. Изучение биологических объектов методами атомно-силовой микроскопии. Тольятти: ТГУ, 2012. 67 с.

УДК 542.61

*А.П. Солоненко<sup>1,2</sup>, А.И. Блесман<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный медицинский университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

### СРАВНИТЕЛЬНОЕ ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БИОАКТИВНОСТИ СИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ РАЗЛИЧНОЙ СТЕХИОМЕТРИИ

**Аннотация.** Исследование выполнено с целью изучения изменений поверхностного слоя керамик из гидросиликатов кальция различного стехиометрического состава и волластонита при их выдерживании в прототипе плазмы крови человека. Установлено, что

через 14 дней контакта с модельным раствором на поверхности всех образцов формируется слой из сферических частиц аморфного фосфата кальция, среди которых встречаются включения небольших иглоподобных кристаллов карбоната кальция.

**Ключевые слова:** гидросиликаты кальция, волластонит, синтетическая биологическая жидкость, биоактивность, аморфный фосфат кальция.

Среди большого числа материалов, предложенных на сегодняшний день для восстановления дефектов твердых тканей, силикаты кальция (СК) являются наиболее перспективной группой веществ. Это обусловлено тем, что они обладают свойством биосовместимости и способны постепенно растворяться при контакте с биологическими жидкостями, причем скорость их растворения превышает данную характеристику гидроксипатита (синтетического аналога костного апатита). Более того, установлено, что при взаимодействии с водной средой ионы кальция выходят из состава СК, и на поверхности твердой фазы формируется гидратированный слой, содержащий отрицательно заряженные силикатные группировки, которые могут выступать в качестве активных центров кристаллизации биоапатита. С этим связан рост числа исследований, посвященных разработке новых материалов на основе СК и детальному изучению их свойств.

В данной работе проведено сравнительное исследование поведения керамик из СК различного состава в синтетической биологической жидкости.

Для выполнения экспериментов по методике, описанной в работе [1], получена серия порошков из гидросиликатов кальция (ГСК) с молярным коэффициентом  $Ca/Si = 0.65, 0.85, 1.00, 1.20$  и  $1.45$ , а также кристаллический СК в форме  $\beta$ -волластонита (ВТ,  $\beta$ - $CaSiO_3$ ). Из каждого порошка путем сухого прессования на установке «LAP 40» (Joos laboratory press) получали керамические диски диаметром 2 см и высотой 2 мм. Образцы керамики погружали на 14 суток в синтетическую биологическую жидкость (simulated body fluid, SBF), минеральный состав которой моделирует плазму крови человека (таблица 1). Таблетки выдерживали в растворе в течение 14 дней при  $37^\circ C$  в статических условиях с периодической заменой части раствора.

Таблица 1

**Концентрации неорганических ионов в плазме крови человека и SBF [2]**

	pH	Концентрация ионов, ммоль/л							
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Плазма крови	7.2-7.4	142	5.0	1.5	2.5	103.0	27.0	1.0	0.5
SBF	7.4	142	5.0	1.5	2.5	147.8	4.2	1.0	0.5

По истечении заданного времени керамические диски извлекали из раствора, аккуратно промывали небольшим количеством дистиллированной воды и высушивали до постоянной массы на воздухе. Для изучения морфологии поверхностного слоя керамик и его состава применен метод сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп модели «JCM-5700» (JEOL) с беззотным рентгеновским энергодисперсионным спектрометром «JED-2300» (JEOL)). Методом ИК-Фурье-спектроскопии на ИК-спектрометре «ФТ-801» (Simex) исследовали функционально-групповой состав поверхностного слоя керамик, отделенного от образца путем его царапания металлическим шпателем, в сравнении с исходными порошками.

На рис. 1 и 2 приведены микрофотографии исходной поверхности таблеток из различных СК и поверхностного слоя, сформировавшегося после выдерживания керамик в

SBF. Морфология поверхности образцов существенно меняется в результате их контакта с жидкостью. Взаимодействие с SBF приводит к образованию на поверхности керамик слоя из сферических частиц, среди которых также встречаются небольшие иглоподобные кристаллы. Отмечается высокая степень агломерации зерен в поверхностном слое. Также можно отметить, что на образцах ГСК с молярным коэффициентом  $\text{Ca/Si} = 0.65, 0.85, 1.00$  и  $1.20$  формируются более крупные микроглобулы (с диаметром около  $1 \mu\text{м}$ ) в сравнении с частицами, обнаруженными на поверхности ГСК-1.45 и ВТ. Заметно повышение площади покрытия и объема нового слоя при переходе к ГСК с более высоким соотношением  $\text{Ca/Si}$  и далее  $\beta\text{-CaSiO}_3$ . Покрытие становится более рыхлым и пористым, исходная поверхность керамики под ним не просматривается.

Анализ элементного состава поверхностного слоя керамик после их выдерживания в SBF показал, что основными компонентами микроглобул на всех образцах являются кальций и фосфор (рис. 3). При этом молярное соотношение  $\text{Ca/P}$  составляет от  $1.36$  (для ГСК-0.65) до  $1.63$  (для ВТ), что лежит в пределах значений, характерных для аморфного фосфата кальция (АФК) [3]. Очевидно, его слой практически полностью покрывает исходную поверхность керамик, в связи с чем кремний обнаруживается в незначительных количествах ( $0.09\text{--}1.03$  масс.%). Также образцы содержат  $2.8\text{--}6.7$  масс.% углерода, вероятно, входящего в состав карбоната кальция (КК, небольшие иглоподобные кристаллы) или изоморфно включенного в структуру АФК.

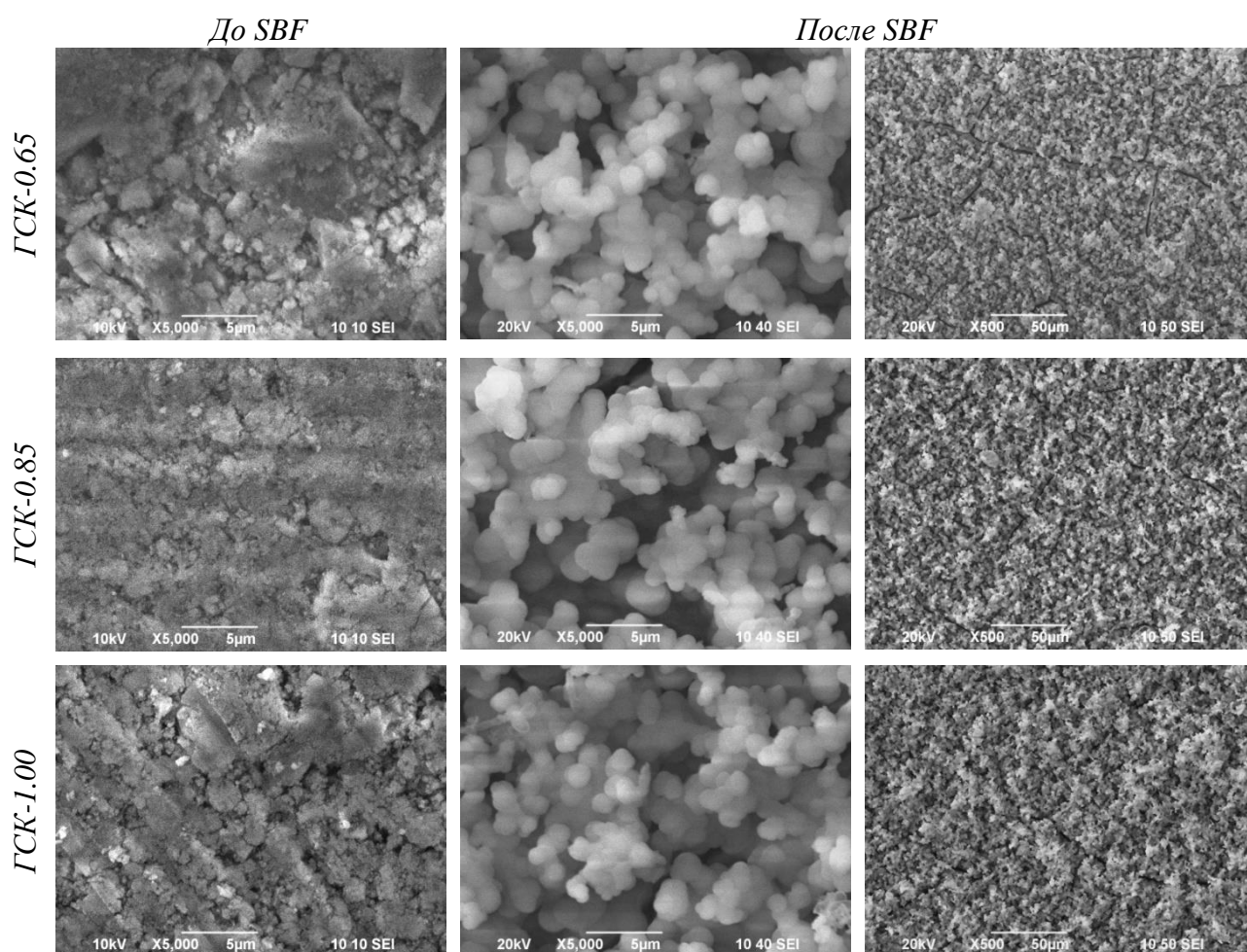


Рис. 1. Микрофотографии поверхности таблеток до и после их выдерживания в SBF

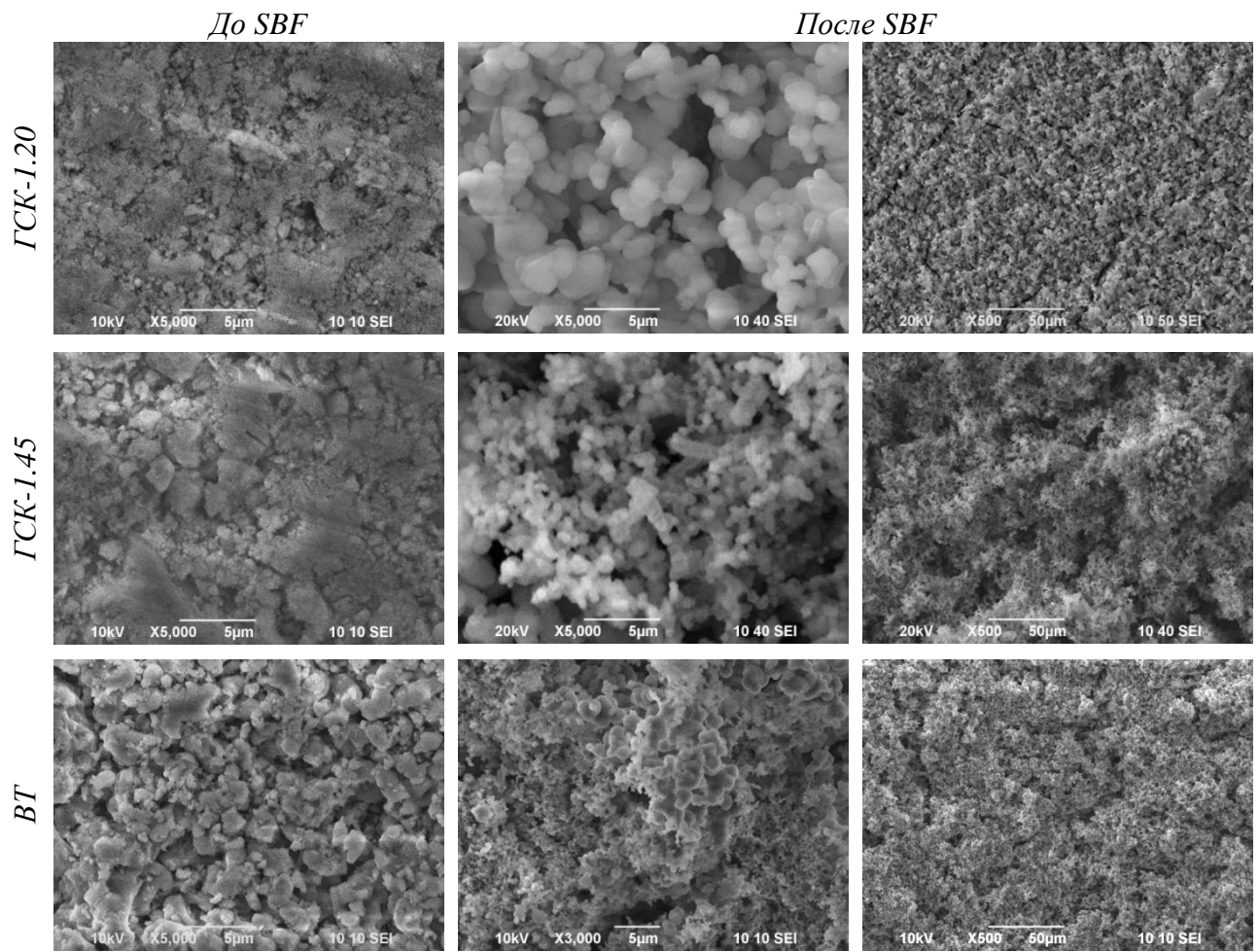


Рис. 2. Микрофотографии поверхности таблеток до и после их выдерживания в SBF

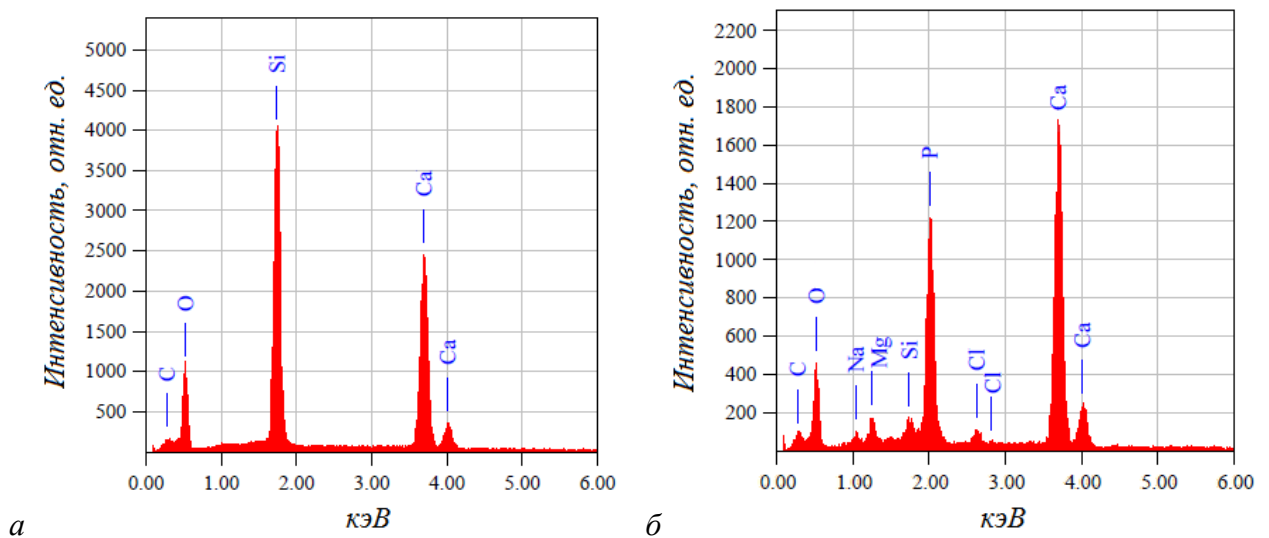


Рис. 3. ЭДС-спектры, снятые с поверхности таблетки из ГСК-1.00 до (а) и после (б) ее выдерживания в SBF

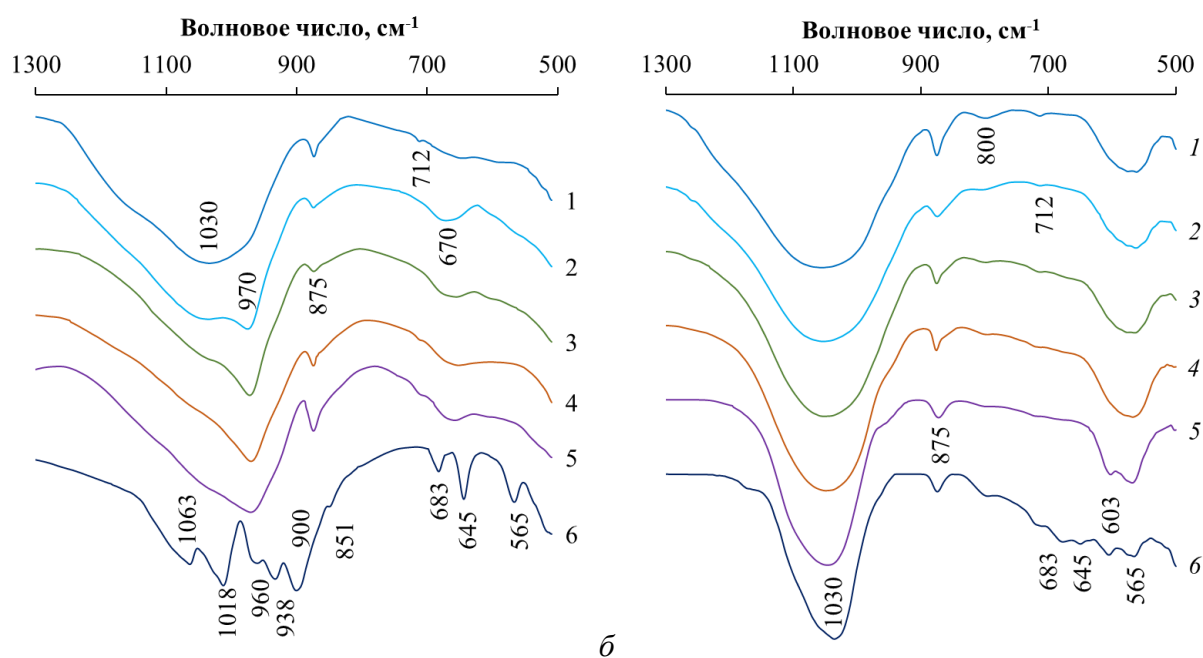


Рис. 4. ИК-спектры исходных порошков СК (а) и поверхностного слоя, сформированного на керамиках в процессе их выдерживания в SBF (б)

Обозначения: 1 – ГСК-0.65, 2 – ГСК-0.85, 3 – ГСК-1.00, 4 – ГСК-1.20, 5 – ГСК-1.45, 6 – ВТ

Данные ИК-Фурье-спектроскопии подтверждают предположение об образовании АФК на поверхности керамик. Так, в ИК-спектрах поверхностного слоя, сформированного на керамиках в процессе их выдерживания в SBF (рис. 4б), фиксируются сглаженные пологие полосы, характерные для колебаний связей Р – О в АФК (570, 1030 см<sup>-1</sup>). Также в спектрах проявляются полосы поглощения КК (712, 875 см<sup>-1</sup>), присутствие примеси которого обнаружено также методом СЭМ.

Таким образом, в ходе исследования установлено, что на поверхности всех СК формируется слой АФК с примесью КК. Его образование указывает на потенциальную биоактивность СК. Плотность и толщина вновь сформированного покрытия варьируют в зависимости от состава исходной керамики: с ростом соотношения Ca/Si данные характеристики слоя АФК нарастают.

### Библиографический список

1. Солоненко А. П., Блесман А. И., Полонянкин Д. А. Синтез и физико-химическое исследование гидросиликатов кальция различного стехиометрического состава // *Динамика систем механизмов и машин*. 2018. Т.6, № 2. С. 215–221.
2. Kokubo T., Takadama H. How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? // *Biomaterials*. 2006. Vol. 27. P. 2907–2915.
3. Nancollas G. H., Wang L. Calcium orthophosphates: crystallization and dissolution // *Chem. Rev.* 2008. Vol. 108. P. 4628–4669.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

**Аннотация.** Методами просвечивающей микроскопии (ТЕМ), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (ХРС) и рентгеновской спектроскопии поглощения (NEXAFS) с использованием синхротронного излучения получены данные об изменении электронной структуры и фазового состава пористого кремния, модифицированного импульсным ионным пучком. Выполнен анализ спектров фотоэмиссии основного уровня Si2р для различных углов сбора фотоэлектронов, валентной зоны, а также спектров ближней тонкой структуры рентгеновского поглощения в области Si L<sub>2,3</sub>-краев исходных и облученных образцов. Установлено, что в результате облучения на поверхности пористого кремния формируется тонкая оксидная пленка, представленная преимущественно высшим оксидом SiO<sub>2</sub>, что приводит к увеличению запрещенной зоны оксида кремния. Такая пленка обладает пассивирующими свойствами, препятствующими деградации состава и свойств пористого кремния при контакте с окружающей средой.

**Ключевые слова:** пористый кремний, NEXAFS, ХРС, импульсный ионный пучок, ТЕМ.

### **1. Введение**

Использование пористых материалов с развитой структурой является перспективным направлением в развитии микро- и наносенсорике [1]. Пористый кремний (porous Silicon, por-Si) – материал с высоким значением удельной поверхности, обладающий, вследствие этого, высокой сорбционной способностью и высокой чувствительностью к различным химическим соединениям, например, газам-окислителям [2–5]. Однако, сохранение необходимого уровня чувствительности por-Si является сложной задачей из-за старения поверхности вследствие взаимодействия с окружающей средой [6, 7]. Модифицирование структуры por-Si приводит к стабилизации и улучшению его свойств, открывая возможность практического применения por-Si в качестве чувствительного элемента газового сенсора [6, 8, 9].

Весьма перспективным методом модифицирования материалов является применение импульсного ионного облучения. Данное энергетическое воздействие сопровождается целым рядом процессов, недоступных при использовании традиционных методов модифицирования.

Для исследования наноструктурных объектов применяются поверхностно-чувствительные рентгеноспектральные методы анализа, такие как рентгенофотоэлектронная спектроскопия (РФЭС, ХРС) и рентгеновская спектроскопия поглощения (БТСРП, NEXAFS), позволяющие получить важную информацию о локальной атомной и электронной структуре наноматериалов. При этом использование современных источников синхротронного излучения позволяет добиться высокой разрешающей способности и хорошей статистики при изучении наноразмерных объектов.

Целью данной работы являлось получение новой информации о локальной атомной и электронной структуре макропористого кремния, подверженного высокоэнергетическому воздействию углерод-протонного импульсного пучка наносекундной длительности.

## 2. Эксперимент

Для получения макропористого кремния использовалось анодное травление пластин кремния ориентации (100) марки КДБ12 площадью  $1,5 \text{ см}^2$ . Травление проводилось в электролите  $\text{HF}:\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$  в соотношении 1:24 при плотности тока  $1,9 \text{ мА/см}^2$  в течение 100 минут. Средний диаметр пор образцов макропористого кремния составлял  $\sim 1,4 \text{ мкм}$ , а толщина слоя  $\sim 5 \text{ мкм}$ .

Ионно-пучковая обработка  $\text{por-Si}$  осуществлялась с применением воздействия импульсного ионного пучка (ИИП) на ускорителе ТЕМП-4М (состав пучка ионов  $\text{C}^+ - 85\%$ ,  $\text{H}^+ - 15\%$ ) в Томском политехническом университете со следующими параметрами: энергия пучка – 250 кэВ, плотность энергии за импульс  $0,5\text{--}0,6 \text{ Дж/см}^2$  ( $\sim 20 \text{ А/см}^2$ ), длительность импульса 120 нс, кратность воздействия – 1 импульс. Доза ионов не превышала  $10^{13}\text{--}10^{14} \text{ см}^{-2}$  за импульс.

Исследование морфологии образцов  $\text{por-Si}$ , подготовленных методом поперечного среза (cross-section), проводилось на автоэмиссионном просвечивающем микроскопе JEM 2200FS фирмы JEOL в светлопольном режиме в центре коллективного пользования научным оборудованием «Высокие технологии и аналитика наносистем» НГУ. Для фазового анализа была выбрана методика EFTEM SI (Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy Spectrum Imaging), реализуемая в сканирующем режиме просвечивающего микроскопа. По линиям, пересекающим границы стенок пор, снимались EELS-спектры, которые впоследствии накладывались на опорные TEM (Transmission Electron Microscopy) изображения, включающие анализируемые участки.

Измерения XPS и NEXAFS спектров были проведены с использованием оборудования измерительной станции RGL-PES российско-германского канала вывода и монохроматизации синхротронного излучения электронного накопителя BESSY II (Берлинский Центр материалов и энергии им. Гельмгольца, HZB, Германия, г. Берлин). Спектры фотоэмиссии основного Si2p-уровня для образцов  $\text{por-Si}$  были измерены с шагом по энергии 0,05 эВ с помощью полусферического анализатора Phoibos 150 (Specs) при энергии квантов 650 эВ. Спектры рентгеновского поглощения измерялись путем регистрации полного электронного выхода внешнего рентгеновского фотоэффекта в режиме измерения тока утечки с образца при изменении энергии фотонов, падающих на образец.

Все данные, полученные методами NEXAFS, XPS, были зарегистрированы в одном вакуумном цикле из одной и той же области образца. Накопительное кольцо работало при энергии электронов в накопителе 1.7 ГэВ, средний ток около 100 мА. Такие значения магнитного тока и энергии электронов определяют спектр синхротронного излучения в диапазоне 30–1500 эВ.

## 3. Результаты и их обсуждение

Исследование морфологии необлученного образца макропористого кремния «на просвет» в светлопольном режиме показало наличие размытой границы фаз в поверхностном слое стенок пор (рис. 1а). По данным высокоразрешающей TEM и дифракционного анализа, на поверхности пор наблюдается наличие тонкого (до 10 нм) слоя, покрывающего стенки пор, вероятно состоящего из оксида кремния. Кроме этого, зафиксированы отдельные зёрненные включения на глубинах до нескольких десятков нанометров от стенок пор (рис. 1а). При этом анализ отдельных пор от поверхности до глубин  $\sim 50 \text{ нм}$  позволяет говорить о том, что происходит плавный переход фаз кремния.

На рис. 1б приведено TEM изображение  $\text{por-Si}$  после облучения ИИП. Видно, что после высокоэнергетического воздействия образуется четкая межфазная граница в структуре пор. На основе анализа рис. 1а и рис. 1б ( $\text{por-Si}$  до и после облучения) можно сделать вывод, что импульсное ионное воздействие приводит к формированию на поверхности пор преимущественно одной фазы, вероятно высшего оксида кремния. При этом, вследствие



малой длительности импульса ИИП (120 нс) и его высокой плотности энергии за импульс (0.5–0.6 Дж/см<sup>2</sup>), происходит высокоскоростной нагрев и остывание поверхностного слоя por-Si с образованием высшего оксида кремния. Кроме этого, высокая скорость нагрева и отвод тепла от поверхности к глубине не позволяют атомам кремния занять энергетически выгодные положения в узлах кристаллической решетки. В результате образуется четкая межфазная граница, свидетельствующая о градиентной структуре кремния. Наиболее отчетливо изменения поверхностного состава после воздействия ИИП видны на стенках пор, по результатам, полученным методом EELS. Спектры энергетических потерь электронов снимались по линиям, пересекающим полости пор и поверхностный оксидный слой вплоть до монокристаллического Si. На рис. 1б область измерения выделена прямоугольником, состоящим из 10 равных сегментов, направление задано от точки 1 к точке 2, а зависимость концентрации кислорода и кремния от расстояния, определенная методом EELS, представлена на рис. 1в. Видно, что на поверхности por-Si образуется оксидный слой, резко переходящий в элементный кремний по мере удаления от поверхности.

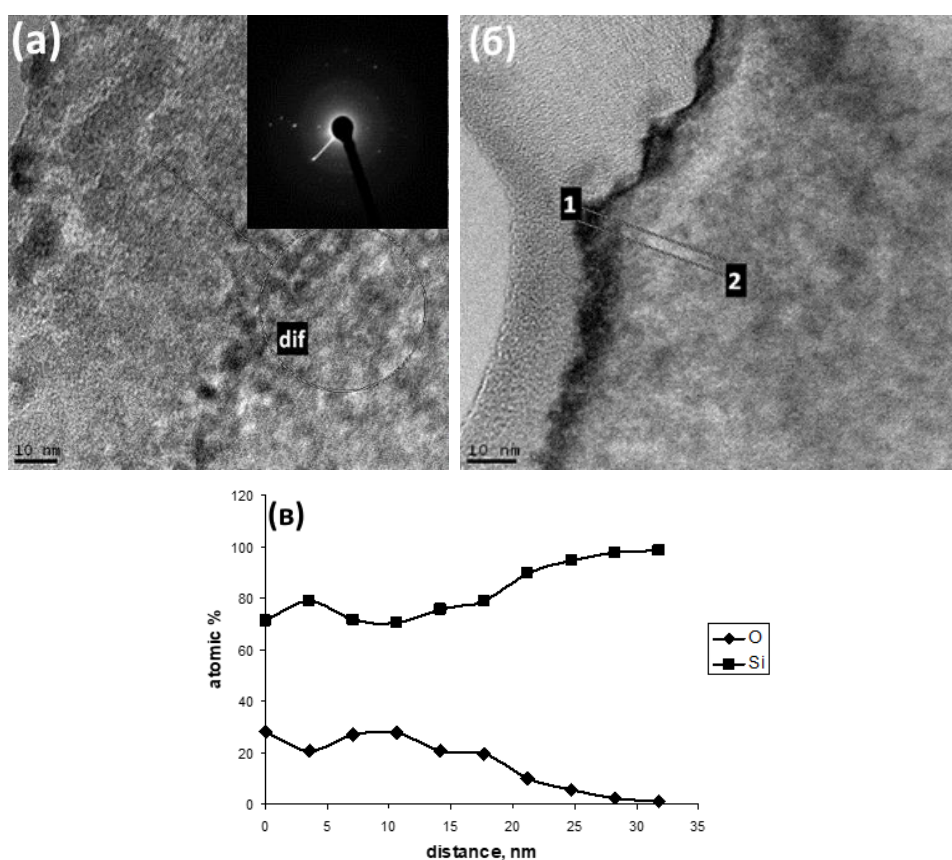


Рис. 1. ТЕМ изображения por-Si:

(а) – до облучения с выделенной областью дифракционного анализа, (б) – после облучения ИИП с выделенной областью EELS-анализа. (в) – распределение атомных концентраций O и Si вдоль области EELS-анализа от точки 1 до точки 2 для облучённого образца

Для определения изменений состава образцов por-Si до и после облучения ИИП по глубине был применен метод регистрации XPS спектров с различной глубиной выхода анализируемых электронов (речь идёт о глубинах в несколько нм). Для этого спектры регистрировались под нормальным углом, а также под углом 30° к плоскости образца. Как видно из рис. 2, отношение элементного и химически связанного кремния для исходного образца практически не изменяется при изменении угла выхода электронов (расхождение не превышает 5%). Количество элементного кремния в 2 раза превышает количество оксидов

кремния. После облучения ИИП поверхность пор-Si существенно окисляется. Доля окисленного кремния на поверхности увеличивается до 60–70%. Кроме того, результаты XPS анализа показывают значительное увеличение гетерогенности пор-Si по глубине. При угле  $30^\circ$ , когда глубина выхода фотоэлектронов уменьшается в 2 раза, доля  $\text{SiO}_x$  увеличивается с 60 до 73% [6].

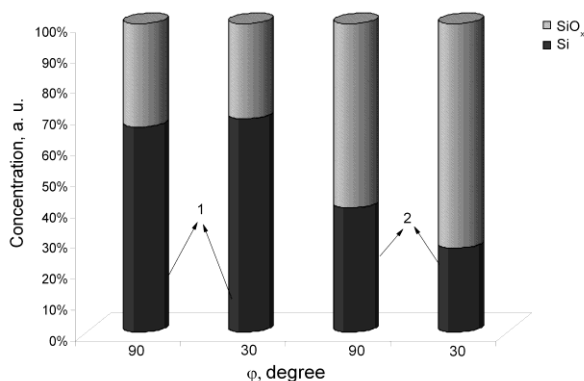


Рис. 2. Изменение соотношения компонентов XPS линии Si2p при разных углах выхода фотоэлектронов ( $\phi$  – проекция угла между плоскостью образца и осью анализатора): 1 – исходный пор-Si, 2 – облученный пор-Si

На рис. 3 приведены NEXAFS спектры для макропористого кремния до и после облучения.

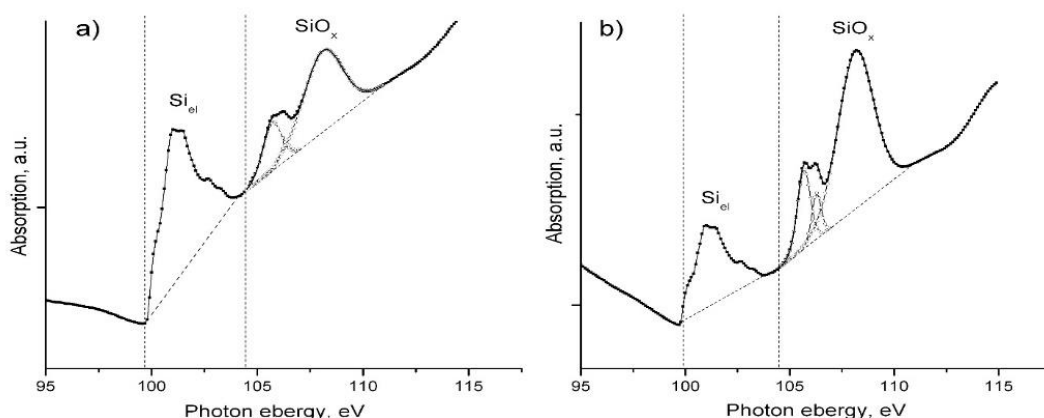


Рис. 3. NEXAFS  $L_{2,3}$ -край поглощения кремния. а – исходный пор-Si, б – облученный пор-Si

Видно, что после воздействия ИИП наблюдается окисление скелетона макропористого кремния. Отношение подынтегральной площади оксидного резонанса к площади резонанса элементарного кремния увеличивается практически в 4 раза по сравнению с исходным образцом пор-Si. Значение отношения подынтегральных площадей резонансов а и t, характеризующее искажение кремний-кислородного тетраэдра, полученное из результатов подгонки спектра облученного образца, практически совпадает со значением, полученным из спектра термически окисленного кремния. Этот результат указывает на увеличение доли высшего оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) в анализируемом слое облученного пор-Si. Высокое значение данного отношения для исходного образца макропористого кремния, по-видимому, связано с наличием большого количества субоксидов  $\text{SiO}_x$ , присутствие которых было показано методом XPS [6].

**Сравнение элементного состава образца из макропористого кремния до и после облучения ИИП**

Образец	SiO <sub>x</sub> , %	Si element, %	[oxide]/[element]	I(a)/I(t)
Исходный por-Si	34,3	65,7	0,52	0,33
Облученный por-Si	65,3	34,7	1,9	0,25
Термический SiO <sub>2</sub>	-	-	-	0,21

Отличие расчетных результатов изменения количества оксида кремния, полученных из анализа методами NEXAFS и XPS, очевидно, связано с различной глубиной анализа данных методик.

#### 4. Заключение

Проведен анализ атомной и электронной структуры макропористого кремния, облученного импульсным ионным пучком наносекундной длительности, с применением метода ТЕМ, а также поверхностно-чувствительных методов анализа XPS и NEXAFS с использованием синхротронного излучения. Показано, что в результате воздействия ИИП происходит существенное окисление поверхностного слоя макропористого кремния с формированием гетерогенной структуры, представленной в основном высшим оксидом SiO<sub>2</sub> и элементарным кремнием. При этом значительно снижается доля субоксидов SiO<sub>x</sub>, наблюдаемых в исходном образце. Образование под воздействием ИИП резкой межфазной границы будет эффективным барьером для дальнейшего прокисления por-Si при хранении на воздухе. Ожидается, что такой подход в дальнейшем позволит стабилизировать структуру пористого кремния и снизить деградацию его физико-химических свойств.

#### Библиографический список

1. Borini S. Effect of ammonia adsorption on the electrical characteristics of mesoporous silicon // *Journal of Applied Physics*. 2007. Vol.102. Article ID 093709. P. 093709-1 – 093709-7.
2. Saha H. Porous Silicon Sensors- Elusive and Erudite // *Int. J. on Smart Sensing and Intelligent Systems*. 2008. Vol. 1. P. 34–56
3. Amato G., Boarino L., Bellotti F. On the apparently anomalous response of porous silicon to nitrogen dioxide // *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 85. P. 4409–4411.
4. Gaburro Z., Oton C.J., Pavesi L., Pancheri L. Opposite effects of NO<sub>2</sub> on electrical injection in porous silicon gas sensors // *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 84. P. 4388–4390.
5. Meixner H., Lampe U. Metal oxide sensors // *Sensors Actuators B*. 1996. Vol. 33. P. 198–202.
6. Болотов В.В., Ивлев К.Е., Корусенко П.М., Несов С.Н., Поворознюк С.Н. Окисление поверхности пористого кремния при воздействии импульсного ионного пучка: исследования методами XPS и XANES // *ФТТ*. 2014. Т. 56, № 6. С. 1207–1211.
7. Леньшин А.С., Кашкаров В.М., Турищев С.Ю., Смирнов М.С., Домашевская Э.П. Влияние естественного старения на фотoluminesценцию пористого кремния // *ЖТФ*. 2012. Т. 82, № 2. С. 150–152.
8. Болотов В.В., Росликов В.Е., Росликова Е.А., Ивлев К.Е., Князев Е.В., Давлеткильдеев Н.А. Получение двухслойных структур «композит на изоляторе» на основе пористого кремния и SnO<sub>x</sub>, исследование их электрофизических и газочувствительных свойств // *ФТП*. 2014. Т. 48, №3. С. 412–416.
9. Сорокин Л.М., Соколов В.И., Бурцев А.П., Калмыков А.Е., Григорьев Л.В. Модификация пористого кремния в результате лазерного воздействия // *Письма в ЖТФ*. 2007. Т. 33, № 24. С. 69–75.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОСЯНОГО ПОКРОВА ЧЕЛОВЕКА, ПОДВЕРГНУТЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

**Аннотация.** Методом сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) в прерывисто-контактном режиме исследованы изменения структуры волоса человека, подвергнутого воздействию отрицательных температур. Полученные данные показывают появление необратимых процессов на поверхности волоса. Результаты данной работы могут применяться при выполнении междисциплинарных исследований представителями медицинской сферы.

**Ключевые слова:** сканирующая зондовая микроскопия, полуконтактный метод, кератин, волос человека.

Метод сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) характеризуется возможностью обеспечения высокого пространственного разрешения, вплоть до атомарного, а также высокой чувствительностью метода, обеспечивающей оптимальность его применения для исследования биологических объектов.

В данной работе в качестве исследуемого объекта выбран элемент волосяного покрова головы человека. Сегодня эта часть человеческого тела эволюционно выполняет в большей степени эстетическую роль. Волосы на голове издавна и до сегодняшнего дня считаются атрибутами красоты и состоятельности, признаком здоровья и жизненной силы. Однако, в погоне за имиджем многие молодые люди пренебрегают их здоровьем и ходят зимой с непокрытой головой.

В связи с этим, целью данной работы является изучение влияния низких температур на структуру элемента волосяного покрова головы человека. Результаты данной работы могут быть полезными как студентам медицинских учебных заведений, так и разработчикам средств по уходу за волосами.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: изучить литературные данные по строению и свойствам человеческого волоса, освоить полуконтактную методику СЗМ, провести экспериментальное исследование структуры неповрежденного элемента волосяного покрова головы человека, а также волоса, подвергнутого воздействию низких температур.

Волосы человека не отличаются индивидуальным строением, все они схожи между собой, являются ординарными. Принято выделять три основных части: волосяной фолликул, корень волоса и стержень.

Луковица (волосяной фолликул) – это уплотнение, образующееся вокруг стержня, в которое заключены сосуды и соединительная ткань. Через данные элементы волос получает своё питание (необходимые для жизнедеятельности протеины и аминокислоты). В волосяном фолликуле также содержится и мышца из гладкой мускулатуры, функцией которой является поднятие стержня, следовательно, и придание ему объёма.

Корень волоса – это сложноустроенная оболочка луковицы, которая состоит из тонкого кожного слоя. Благодаря содержащимся железам вокруг волоса создаётся плёнка, которая защищает корень от возможной грязи.



Рис.1. Структура волоса

Стержень – единственная видимая часть, выступающая выше поверхности кожи. Она образуется за счёт омертвевших клеток. Стержень в поперечном разрезе состоит из трех основных элементов. Первый – сердцевина (медулла) – мозговое вещество, находящееся внутри волоса. Второй – кортекс – корковый слой, состоящий из кератина и меланина, последний элемент воздействует на окрас волоса. Также в данном слое содержатся наиболее важные пигменты, сочетание которых создаёт различные оттенки волос, которые существуют в природе. Стоит отметить, что в кортексе происходят процессы, связанные с изменением цвета (окрашиванием). Третий – кутикула – наружный слой, состоящий из нескольких слоев прозрачных чешуек кератина (их количество может достигать 10 слоев). Чешуйки перекрывают друг друга, что обеспечивает защиту волоса от различных механических повреждений. Благодаря такому строению локоны человека отличаются гладкостью и блеском.

Волос, подобно роговому слою эпидермиса, состоит из сплюснутых ороговевших клеток, лишенных ядра и плотно прилегающих друг к другу; это – мертвые клетки. Ороговение заключается в образовании особого белка – кератина. Окраска волос зависит от присутствия пигмента меланин, от вида, в котором он выступает, а также от его количества и размещения. Это темный пигмент, который, однако, может окрашивать волосы в цвета от светло-желтого до темно-коричневого. Меланин не растворим в воде, но растворим в щелочах и концентрированных кислотах. Окраска, сообщаемая меланином, исчезает при действии окислителей, а именно: перекиси водорода, бромовой воды и др.

В сканирующих зондовых микроскопах исследование микрорельефа поверхности и ее локальных свойств проводится с помощью зондов, приготовленных специальным образом в виде игл. Рабочая часть таких зондов (острие) имеет размеры порядка десяти нанометров. Характерное расстояние между зондом и поверхностью образцов в зондовых микроскопах по порядку величин составляет 0,1–10 нм. В основе работы зондовых микроскопов лежат различные типы взаимодействия зонда с поверхностью. Так, работа туннельного микроскопа основана на явлении протекания туннельного тока между металлической иглой и проводящим образцом; различные типы силового взаимодействия лежат в основе работы атомно-силового, магнитносилового и электросилового микроскопов.

Регистрация изменения амплитуды и фазы колебаний кантилевера в бесконтактном режиме требует высокой чувствительности и устойчивости работы обратной связи. На практике чаще используется так называемый "полуконтактный" режим колебаний кантилевера (иногда его называют прерывисто-контактный, а в иностранной литературе – "intermittent contact" или "tapping mode" режимы). При работе в этом режиме возбуждаются вынужденные колебания кантилевера вблизи резонанса с амплитудой порядка 10–100 нм. Кантилевер подводится к поверхности так, чтобы в нижнем полупериоде колебаний происходило касание поверхности образца.

Структура поверхности элемента волосяного покрова головы человека без повреждений однородная, с характерным рисунком.

Исходя из полученных результатов, представленных на рис. 2, можно отметить, что у исходного образца относительно низкая шероховатость, высота чешуек одинакова и заметных изменений в их строении не наблюдается.

Следующим этапом было изучение влияния низких температур на внешнюю и внутреннюю структуру волоса. Нами было принято решение положить исходный образец в морозилку, где тот находился в течение 6 часов.

По полученным результатам, представленным на рис. 3., можно заметить: после воздействия низких температур наблюдается эффект расслоения кутикулы, что повлияло на увеличение шероховатости.

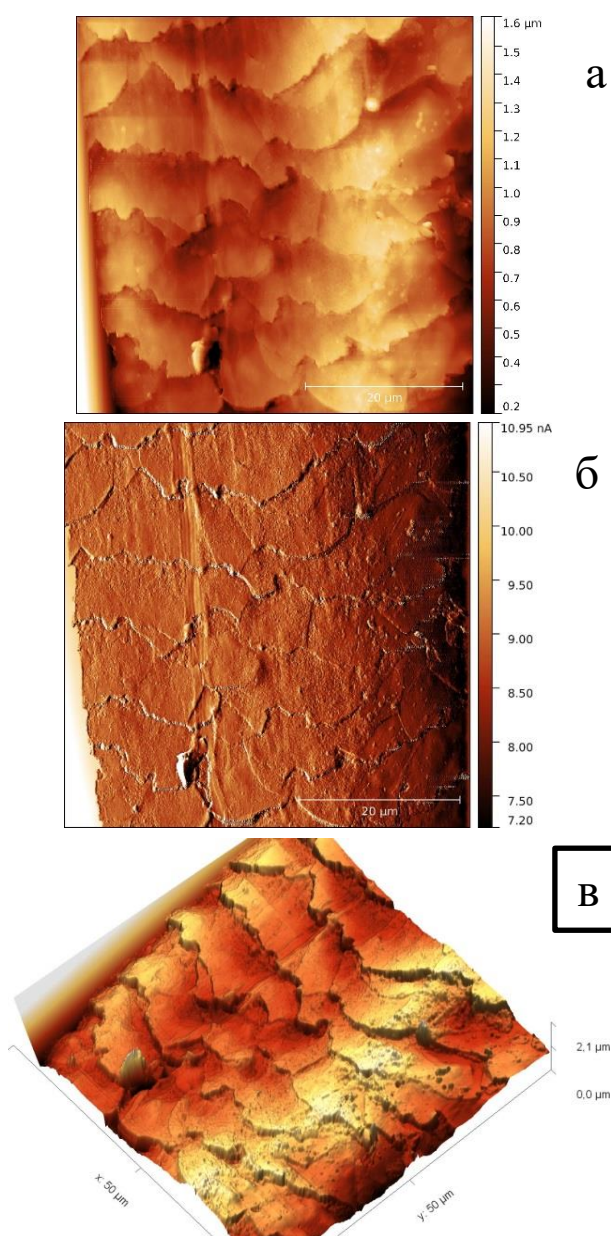


Рис. 2. Микрофотография поверхности здорового волоса: а) 2d изображение, б) сигнал mag, в) 3d изображение

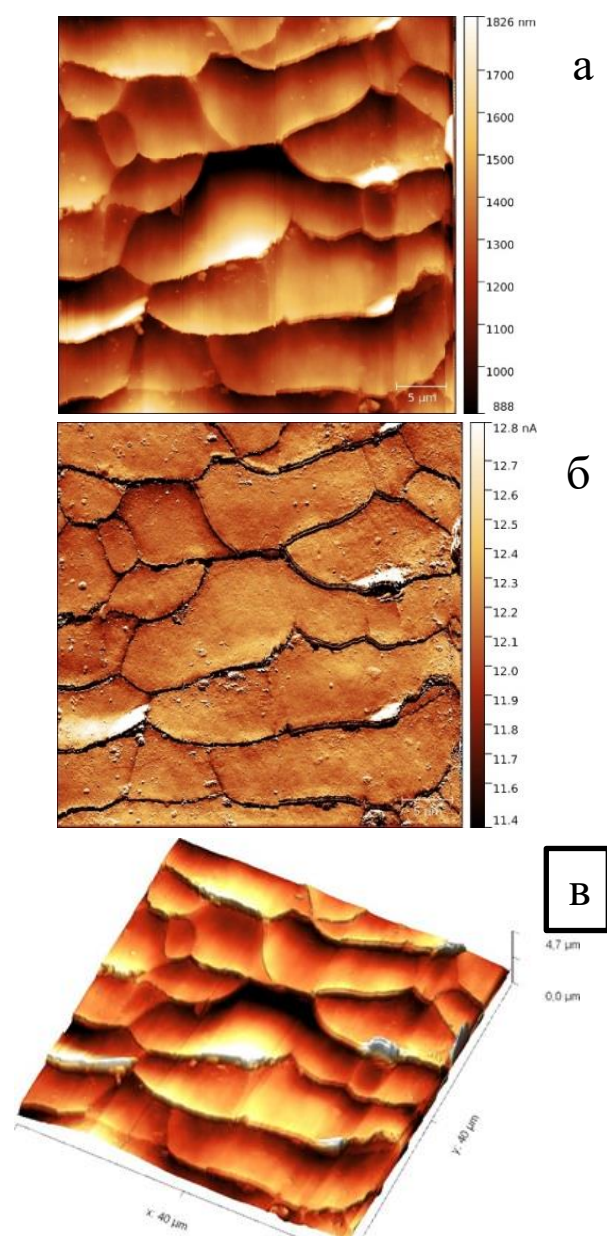


Рис. 3. Микрофотография поверхности волоса, подвергнутого воздействию низких температур: а) 2d изображение, б) сигнал mag, в) 3d изображение

Сравнивая между собой результаты исследований волоса до и после температурных нагрузок, можно отметить, что после воздействия температуры шероховатость и расслоение чешуек экземпляра увеличилась в сравнении с первоначальным состоянием. Анализируя, можно сделать вывод, что эти явления говорят о том, что влага, которая смачивает кутикулу волоса и не даёт ему высохнуть, отсутствует.

Методом СЗМ отслеживаются необратимые внешние изменения. В результате нахождения волоса в подобных стрессовых условиях влага, содержащаяся внутри, кристаллизовалась, из-за чего волос начинал сохнуть, что и привело к его ломкости и всем тем результатам, что были приведены ранее. Данные отличительные черты можно использовать в криминалистике. В качестве рекомендации по защите волос следует защищать голову при низких/высоких температурах головным убором, либо при отсутствии такового ограничить время нахождения на морозе, а также жаре.

### Библиографический список

1. Сучкова Е. В. Влияние некоторых факторов внешней среды на морфологические признаки волос человека // Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки. 2016. № 2-2. С. 191-198.
2. Мороз А. А. Современные методы микроскопии в микробиологии // Сборник научных трудов Ставропольского научно-исследовательского института животноводства и кормопроизводства. 2014. Т. 2, № 7. С. 392-394.
3. Агеев О. А., Поляков В. В., Алябьева Н. И., Кужелев М. В. Зондовая нанолaborатория *ntegra vita* для биологических применений. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2008. Т.5, № 82. С. 198-200.

УДК 546.05; 546.06

*А.Е. Шевченко<sup>1</sup>, А.П. Солоненко<sup>1,2</sup>, А.И. Блесман<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный медицинский университет, г. Омск, Россия

### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГРАНУЛ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИАПАТИТА И ВОЛЛАСТОНИТА

**Аннотация.** Получены гранулы из керамических порошков с варьируемым содержанием гидроксиапатита и волластонита. Выполнено исследование их структуры и некоторых свойств. Установлено, что полученные образцы имеют форму, близкую к сферической, открытую пористость порядка 50 % и микротвёрдость не менее 17 HV.

**Ключевые слова:** биоматериалы, композиты, гранулы, гидроксиапатит, волластонит.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке материалов, предназначенных для использования при реконструкции костных дефектов, образующихся в результате болезней (остеопороз, коксит, деформирующий артроз и т.д.), травм, хирургических вмешательств. Традиционно в медицине для этих целей используется керамика из гидроксиапатита ( $\text{ГА}$ ,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ), близкого в химическом плане к минеральной составляющей костной ткани. Материалы на его основе не вызывают отрицательных реакций организма и биологически активны. Однако ГА обладает крайне малой растворимостью и сохраняется в месте имплантации практически неизменным в течение длительного времени

[1]. Для устранения данного недостатка возможно создание смесей ГА с более растворимыми веществами, в числе которых силикаты кальция (СК). Известно, что данная группа солей содержит анионы  $\text{SiO}_3^{2-}$ , которые принимают участие в формировании органической матрицы кости на начальных этапах её кальцификации, ускоряют процесс усвоения ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и инициируют минерализацию. СК характеризуются высокой биосовместимостью по отношению к твердым тканям человека и обеспечивают заполнение дефекта кости, стимулируя при этом процесс формирования биоапатита [2]. В этой связи перспективно создание материалов на основе ГА и СК для биомедицинского применения.

Целью данной работы является получение и исследование гранулированных композитов апатита и волластонита (ВТ,  $\beta\text{-CaSiO}_3$ ) с различными пропорциями компонентов.

Для получения гранул порошок с заданным массовым соотношением ГА и ВТ, полученный по методике, приведенной в [3], смешивали с 15 % водным раствором желатина до образования однородной сметанообразной суспензии, которую затем прикапывали в растительное масло, перемешиваемое при помощи магнитной мешалки со скоростью 850 об/мин. Образовавшиеся гранулы охлаждали, отмывали от масла этиловым спиртом, высушивали и исследовали с помощью группы физико-химических методов.

Морфологию и структуру гранул исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе «JSM-5700» (JEOL). Микротвёрдость образцов измеряли по методу Виккерса на микротвердомере «ПМТ-3М» (ЛОМО) согласно ГОСТ Р ИСО 6507-4-2009. Гранулы предварительно полировали для получения с одной из сторон ровной поверхности. Для определения средней плотности гранулы взвешивали на аналитических весах, измеряли их диаметр с помощью микрометра и рассчитывали значение плотности как отношение массы к объёму, исходя из предположения о сферической форме частиц [4]. Истинную плотность и пористость определяли пикнометрическим методом. Расчёт пористости проводили по значениям средней и истинной плотности [4].

На рис. 1 приведены микрофотографии полученных гранул. Установлено, что композиты имеют форму, близкую к сферической. Поверхность частиц шероховатая с порами различного размера, которые формируются, вероятно, в результате высыхания образцов и связующего полимера (желатина). При исследовании внутренней структуры гранул в месте скола (рис. 1в, 1г) выявлено, что поры пронизывают весь объём частиц. При этом, как правило, в центре гранулы обнаруживаются более крупные и объёмные полости, которые связаны с поверхностью системой каналов и в случае биомедицинского применения материалов могут выступать как депо лекарственных препаратов.

Размеры гранул для всех составов керамических порошков варьируют в диапазоне от 200 мкм до 5 мм.

Таблица 1

**Характеристики гранул**

Соотношение ГА / ВТ, масс. %	HV 0.02	$\rho_{\text{ср}}$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_{\text{ист}}$ , г/см <sup>3</sup>	П, %
80 / 20	17.0 ± 0.4	1.13 ± 0.03	1.91 ± 0.11	41 ± 3
60 / 40	22.2 ± 0.4	1.09 ± 0.03	2.25 ± 0.07	52 ± 2
50 / 50	26.7 ± 0.4	1.07 ± 0.03	2.61 ± 0.12	59 ± 2
40 / 60	24.1 ± 0.3	1.01 ± 0.04	2.27 ± 0.14	55 ± 3
20 / 80	22.7 ± 0.4	1.23 ± 0.03	2.47 ± 0.20	50 ± 4
0 / 100	16.9 ± 0.4	1.20 ± 0.03	2.53 ± 0.21	53 ± 4

Обозначения: HV 0.02 – микротвёрдость по Виккерсу,  $\rho_{\text{ср}}$ ,  $\rho_{\text{ист}}$  – средняя и истинная плотность гранул, П – пористость гранул



Результаты измерения микротвёрдости, средней и истинной плотности, пористости гранул представлены в табл. 1. Согласно экспериментальным данным, все образцы имеют открытую пористость порядка 50 %. Средняя и истинная плотность гранул составляют, соответственно, не менее 1.0 и 1.9 г/см<sup>3</sup>. При смачивании водными растворами (дистиллированной водой, синтетической биологической жидкостью (SBF)) частицы тонут. Микротвёрдость гранул не ниже 17 HV, что сопоставимо с результатами подобных исследований [5] и позволяет выполнять необходимые манипуляции по заполнению костной полости без нарушения формы и размеров частиц.

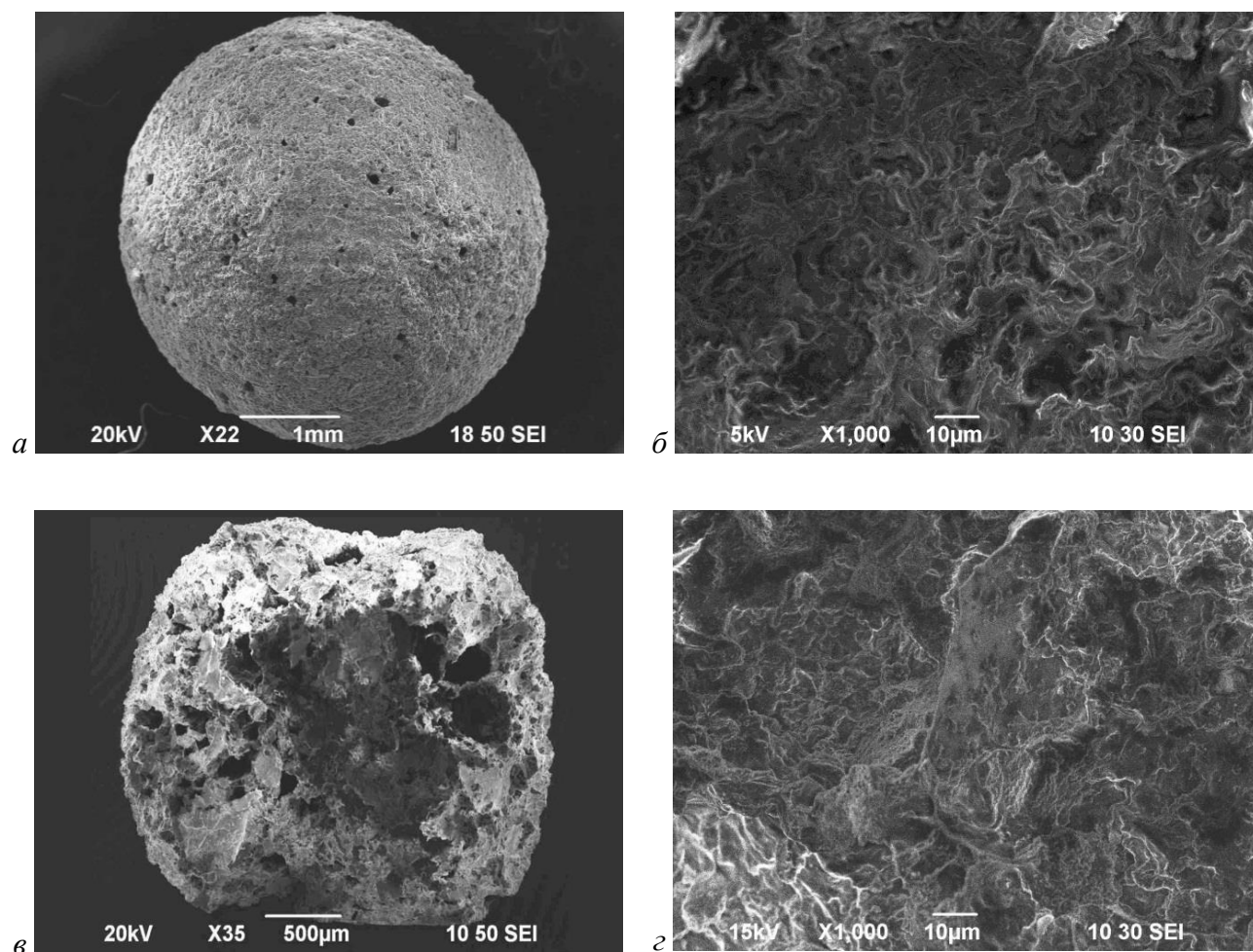


Рис. 1. Микрофотографии гранул с соотношением ГА / ВТ 40 / 60 масс. %: общий вид (а), структура поверхности (б), скол (в) и внутренняя структура (г)

Таким образом, установлено, что полученные сферические гранулы имеют прочность, достаточную для выполнения медицинских манипуляций, и характеризуются пористой структурой. Поры в материале сопряжены между собой сетью каналов и полостей, что благоприятно для биомедицинского применения.

## Библиографический список

1. Galindo T. G. P., Chai Y., Tagaya M. Hydroxyapatite nanoparticle coating on polymer for constructing effective biointeractive interfaces // *Journal of Nanomaterials*. 2019. Vol. 2019. 23 p.
2. Wu C., Chang J. A review of bioactive silicate ceramics // *Biomedical Materials*. 2013. Vol. 8. 12 p.
3. Солоненко А. П., Блесман А. И., Полонянкин Д. А., Горбунов В. А. Синтез композитов на основе фосфатов и силикатов кальция // *Журнал неорганической химии*. 2018. Т. 63, № 8. С. 953–960.
4. Скрипникова Н. К., Тогидний М. Л. Методы определения основных свойств строительных материалов: методические указания к лабораторным работам // Томск: Изд-во Томского архитектурно-строительного ун-та, 2013. 20 с.
5. Kaya I., Sahin M. C., Cingoz I. D. [et al.]. Three dimensional printing and biomaterials in the repairment of bone defects; hydroxyapatite PLA filaments // *Turkish Journal of Medical Sciences*. 2019. Vol. 49. P. 922–927.

УДК 537.622.5

С.В. Белым

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБМЕННОГО ПОДМАГНИЧИВАНИЯ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье проведено исследование обменного подмагничивания в двухслойной системе ферромагнетик/антиферромагнетик. Система состоит из двух тонких пленок. Исследование проведено в рамках модели Изинга. Для компьютерного моделирования использован комбинированный подход из алгоритма Вольфа и алгоритма Метрополиса. Поведение системы изучается в магнитном поле. Обменное подмагничивание проявляется как смещение петли гистерезиса. Величина поля подмагничивания вычисляется на основе смещения петли гистерезиса.

**Ключевые слова:** двухслойные системы, антиферромагнетизм, ферромагнетизм, обменное взаимодействие.

Обменное смещение в двухслойной системе из ферромагнитной (FM) и антиферромагнитной (AFM) пленок применяется для обеспечения высокой плотности хранения данных. Двухслойные системы FM/AFM используются в спиновых вентилях для закрепления поляризатора тока. Основным механизм для такого использования основан на обменном подмагничивании [1–3]. Наилучшим материалом для закрепления спинового состояния ферромагнетика являются слоистые антиферромагнетики [4].

Экспериментальные данные показывают, что обменное взаимодействие на границе антиферромагнетика и ферромагнетика приводит к смещению петли гистерезиса [5–8]. Это явление получило название курсового смещения или поля подмагничивания [9–12]. Численное моделирование явления обменного подмагничивания [10–12] показало возможность перпендикулярной связи на границе FM/AFM. Это явление было подтверждено экспериментально для соединений  $\text{FeF}_2/\text{Fe}$  и  $\text{MnF}_2/\text{Fe}$  [13–15]. В данной статье выполнено компьютерное моделирование обменного подмагничивания в двухслойной FM/AFM структуре в рамках модели Изинга. Исследования проведены методом компьютерного моделирования, которое хорошо зарекомендовало себя в аналогичных задачах [25–27].

В рамках компьютерного эксперимента исследовалась двухслойная система: первый слой — пленка из слоистого антиферромагнетика толщиной  $d$ , второй слой — ферромагнитная пленка толщиной  $D$ . Обменный интеграл взаимодействия между спинами одного атомного слоя антиферромагнетика равен  $J_a$ , между соседними слоями  $-J_a$ . Обменный интеграл между спинами ферромагнетика  $J_0$ . Обменное взаимодействие на границе взаимодействия двух пленок  $J$ . Пленки располагались параллельно плоскости OXY. На рис. 1 изображена конфигурация системы.

Моделирование осуществлялось в рамках модели Изинга, в которой каждый спин может находиться в одном из двух состояний ( $S=1/2$  или  $S=-1/2$ ). Запишем гамильтониан моделируемой системы:

$$H = J_a \sum_{0 \leq z < d} (-1)^\sigma S_i S_j - J_0 \sum_{d \leq z < D+d} S_i S_j - J \sum_{z=d} S_i S_j.$$

Суммирование спинов выполняется только по ближайшим соседям. Параметр  $\sigma$  равен 0 для спинов в одной плоскости и равен 1 для спинов в соседних плоскостях.

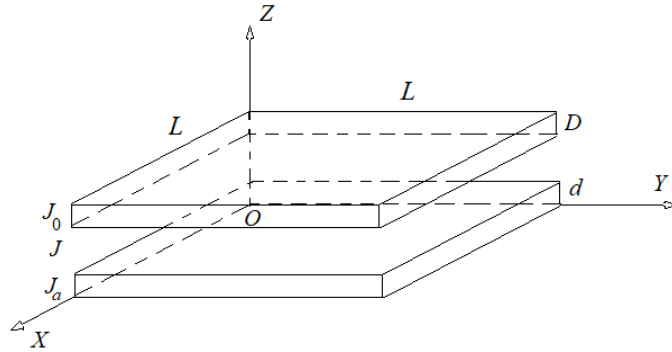


Рис. 1. Конфигурация системы

Для удобства компьютерного моделирования введем относительные величины:

$$R_a = J_a / J_0, R = J / J_0.$$

Температура системы также будет определяться в относительных единицах  $T = kt/J_0$  ( $k$  – постоянная Больцмана).

Запишем гамильтониан в относительных величинах:

$$H / J = R_a \sum_{0 \leq z < d} (-1)^\sigma S_i S_j - \sum_{d \leq z < D+d} S_i S_j - R \sum_{z=d} S_i S_j.$$

Магнитный момент  $m$  ферромагнитной пленки вычисляется как сумма спинов в единице объема:

$$m = \sum S_i / N.$$

$N$  – общее количество спинов в ферромагнитной пленке. Параметр порядка антиферромагнитной пленки вычисляется как разность намагниченностей четных и нечетных атомных слоев:

$$m_a = \left( \sum_{\text{even}} S_i - \sum_{\text{odd}} S_i \right) / N_a.$$

$N_a$  – общее количество спинов в антиферромагнитной пленке.

Для моделирования системы необходимо найти температуры фазовых переходов  $T_N$  и  $T_C$  для каждой из пленок. Для определения температуры фазовых переходов использовались куммулянты Биндера четвертого порядка [28]:

$$U = 1 - \frac{\langle m^4 \rangle}{3 \langle m^2 \rangle^2}, \quad U_a = 1 - \frac{\langle m_a^4 \rangle}{3 \langle m_a^2 \rangle^2}.$$

Угловыми скобками обозначено термодинамическое усреднение по спиновым состояниям системы. Далее строились графики зависимости куммулянтов от температуры для различных линейных размеров системы. Точка пересечения графиков соответствует температуре фазового перехода [28].

Обменное взаимодействие на границе пленок проявляет себя как внешнее магнитное поле. Это поле называется полем подмагничивания. Поле подмагничивания влияет на петлю

гистерезиса ферромагнитной пленки, приводя к ее смещению вдоль оси магнитного поля. Поле подмагничивания зависит от параметров антиферромагнитной пленки. При моделировании температура системы выбиралась так, чтобы антиферромагнитная пленка находилась в упорядоченной фазе, а ферромагнитная пленка в неупорядоченной фазе. Для этого выбиралась температура системы согласно неравенству  $T_C < T < T_N$ .

В данной работе моделировались системы с линейными размерами  $L \times L$  в плоскости ОХУ. Моделирование системы осуществлялось в три этапа. На первом этапе с помощью кластерного алгоритма Вольфа определялись температуры фазовых переходов. На втором этапе выбиралась температура согласно неравенству  $T_C < T < T_N$ . Система приводилась в равновесное состояние при температуре  $T$  с помощью кластерного алгоритма Вольфа. После этого реакция системы на внешнее магнитное поле исследовалась с помощью алгоритма Метрополиса. Петля гистерезиса строилась для каждого набора параметров системы.

Компьютерный эксперимент проводился для систем с линейными размерами от  $L=20$  до  $L=36$  с шагом  $\Delta L=4$ . Толщина антиферромагнитной пленки выбрана  $d=4$ , ферромагнитной пленки –  $D=4$ . Отношение обменных интегралов равно  $R_a=2$ . При этих значениях параметров температуры фазовых переходов равны  $T_C=3,81$ ,  $T_N=7,62$ . Параметр  $R$  изменялся от 0 до 1 с шагом 0,2. Петли гистерезиса для различных значений  $R$  представлены на рис. 2.

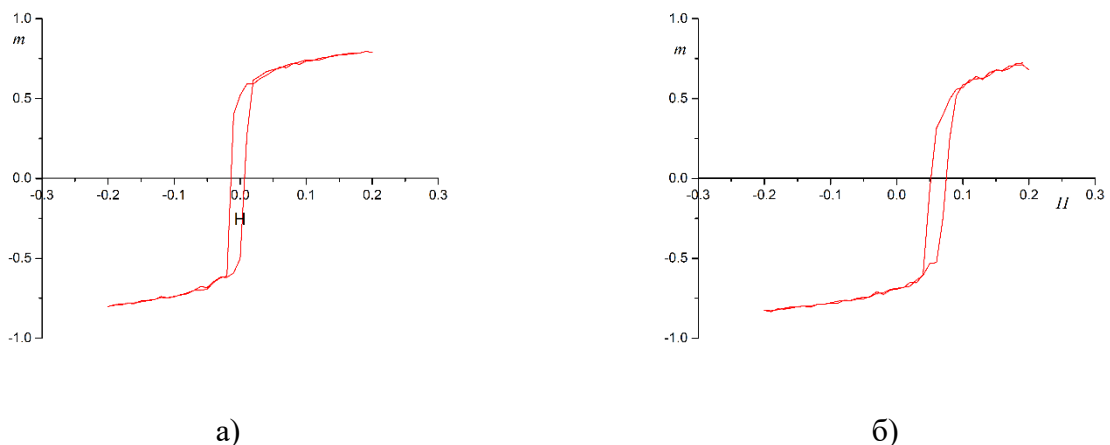


Рис. 2. Петля гистерезиса для ферромагнитной пленки в двухслойной системе при различных значениях обменного интеграла на границе пленок: а)  $R=0$ , б)  $R=0,6$ .

Как видно из рис. 2, петля гистерезиса смещается вправо при увеличении обменного взаимодействия на границе пленок. Величина поля подмагничивания определялась как среднее значение точек пересечения петель гистерезиса оси абсцисс. График зависимости поля подмагничивания от обменного интеграла на границе пленок представлен на рис. 3.

Как видно из рис. 3, поле подмагничивания линейно зависит от обменного взаимодействия на границе пленок. Эта линейная зависимость может быть аппроксимирована выражением

$$h_b = (0.098 \pm 0.002) R.$$

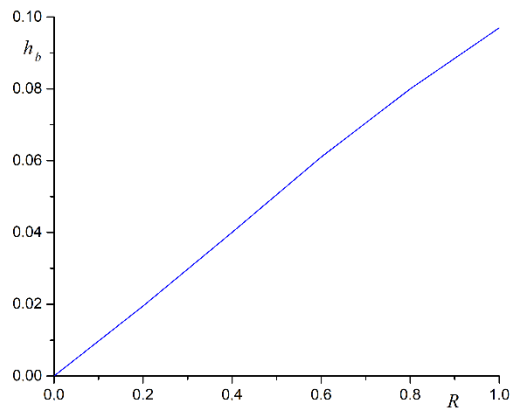


Рис. 3. Зависимость поля подмагничивания от обменного интеграла на границе пленок

Результаты компьютерного моделирования показывают наличие поля подмагничивания в двухслойной системе ферромагнетик-антиферромагнетик. Наличие поля подмагничивания приводит к смещению петли гистерезиса. Величина поля подмагничивания определяется отношением обменного интеграла взаимодействия на границе пленок к обменному интегралу ферромагнитной пленки. Зависимость поля подмагничивания от отношения обменных интегралов линейная.

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00053.

#### Библиографический список

1. Mitsumata Ch., Sakuma A., Fukamichi K., Tsunoda M., Takahashi M. Critical Thickness of Antiferromagnetic Layer in Exchange Biasing Bilayer System. // *Journal of the Physical Society of Japan*. 2008. Vol. 77. P. 044602-1–6.
2. Umetsu R. Y., Mitsumata Ch., Sakuma A., Fukamichi K. Magnetic and Electrical Properties, and Mechanism of Exchange Bias-field of  $\gamma$ -phase and L10-type Antiferromagnetic Mn Alloys // *Transactions of the Magnetics Society of Japan*. 2003. Vol. 3, Is. 3. P. 59–94.
3. Mitsumata C., Sakuma A., Fukamichi K. Magnetic structures and their stability in  $Mn_3Rh$  ordered and disordered alloys // *Phys. Rev. B*. 2003. Vol. 68. P. 014437-1–8.
4. Nowak U., Usadel K. D., Keller J. [et al.]. Domain state model for exchange bias. I. Theory. // *Phys. Rev. B*. 2002. Vol. 66. P. 014430-1–9.
5. Meiklejohn W. H., Bean C. P. New Magnetic Anisotropy. // *Phys. Rev.* 1956. Vol. 102. P. 1413-1–6.
6. Meiklejohn W. H., Bean C. P. New Magnetic Anisotropy. // *Phys. Rev.* 1957. Vol. 105. P. 904-1–8.
7. Nogues J., Schuller I. K. Exchange bias. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2009. Vol. 192. P. 203–232.
8. Berkowitz A. E., Takano K. Exchange anisotropy - a review. // *J. Magn. Magn. Mater.* 1999. Vol. 200. P. 552–570.
9. Schulthess T. C., Butler W. H. Consequences of Spin-Flop Coupling in Exchange Biased Films. // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 81. P. 4516–4519.
10. Schulthess T. C., Butler W. H. Coupling mechanisms in exchange biased films (invited). // *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 85. P. 5510–5515.
11. Stiles M. D., McMichael R. D. Model for exchange bias in polycrystalline ferromagnet-antiferromagnet bilayers. // *Phys. Rev. B*. 1999. Vol. 59. P. 3722-1–6.

12. Kiwi M. Exchange bias theory. // J. Magn. Magn. Mater. 2001. V. 234. P. 584–595.
13. Nogues J., Lederman D., Moran T. J., Schuller I. K. Positive Exchange Bias in FeF<sub>2</sub>-Fe Bilayers. // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 76. P. 4624-1–10.
14. Nogues J., Moran T. J., Lederman D., Schuller I. K., Rao K. V. Role of interfacial structure on exchange-biased FeF<sub>2</sub>-Fe. // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 59. P. 6984-1–7.
15. Leighton C., Fitzsimmons M. R., Yashar P. [et al.]. Two-Stage Magnetization Reversal in Exchange Biased Bilayers. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86. P. 4394-1–6.
16. Belim S. V., Trushnikova E. V. Computer Simulation of Surface Phase Transitions of Antiferromagnetic Films. // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1210. P. 012011-1–7.
17. Belim S. V., Trushnikova E. V. Study of the critical behavior of antiferromagnetic thin films by computer modeling. // Letters on Materials. 2018. Vol. 8. P. 440–442.
18. Belim S. V., Larionov I. B. The Influence of a Magnetic Field on Phase Transition in Antiferromagnetic Films: Computer Modeling Research. // Moscow University Physics Bulletin. 2019. Vol. 74, Is. 6. P. 646–649.
19. Binder K. Critical Properties from Monte Carlo Coarse Graining and Renormalization. // Phys. Rev. Lett. 1981. Vol. 47. P. 693–696.

УДК 621.317.328

*Е.Г. Глухова, С.В. Бирюков*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

### **ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ И ЯВЛЕНИЯХ**

**Аннотация.** В статье ставится задача рассмотреть новые физические эффекты и явления, пригодные для измерения различных характеристик электрического поля. Целью исследования являются выявленные в технической литературе волноводные, волоконно-оптические и торсионные датчики напряженности. Напряженность поля – важная характеристика электрических полей. Она определяет воздействие на технические и биологические объекты, но трудна для изучения. В связи с этим задачи выявления и построения датчиков напряженности электрического поля на новых физических эффектах и явлениях являются актуальными.

**Ключевые слова:** датчик, измерение, напряженность, электрическое поле.

В современных условиях научно-технического прогресса с развитием энергетики и энергопотребления возникают повышенные требования к качеству и экологической безопасности электрических сетей. Большое внимание требуется уделять безопасности и экологичности рабочего места людей на большинстве предприятий. Одной из существенных задач в данной ситуации является детектирование низкочастотных электрических полей. Для решения этих задач требуются датчики напряженности электрического поля, построенные на новых физических явлениях и эффектах.

Поэтому первым этапом необходимо провести исследования по выявлению новых физических явлений и эффектов, пригодных для построения датчиков и приборов на их основе для измерения электрических полей промышленной частоты. Важной частью этого исследования также является повышение точности и простоты измерения напряженности электрического поля.

К моменту настоящих исследований хорошо известны и широко применяются электроиндукционные датчики напряженности электрического поля следующих форм: плоские [1–3], цилиндрические [4], сферические [5, 6] и кубические [7, 8], а также их различные сочетания. В связи с этим особое внимание было направлено на выявление датчиков с нестандартным принципом детектирования электрических полей.

В данной работе подверглись исследованию волноводные с жидкокристаллическим заполнением, волоконно-оптические и торсионные датчики.

Волноводные датчики с жидкокристаллическим заполнением представлены в работе [9]. В них чувствительными элементами являются оптические кольцевые волноводы щелевого типа. Щели таких волноводов (рис. 1), заполненные жидкими кристаллами (ЖК), могут быть расположены вертикально и горизонтально.

Поскольку показатели преломления ЖК существенно изменяются под воздействием внешнего электрического поля, то структуры, основанные на щелевом волноводном микрорезонаторе, заполненном ЖК, могут быть использованы для измерения электрического поля.

Использование интерферометрических схем для обработки оптических сигналов волноводных датчиков обеспечивает высокую точность измерений.

В работе [9] проанализировано влияние внешнего электрического поля на направляющие свойства и распределение поля мод волновода с изогнутой полосой с вертикальной и горизонтальной щелью, заполненной ЖК, в зависимости от конструктивных параметров таких волноводов (рис. 1.).

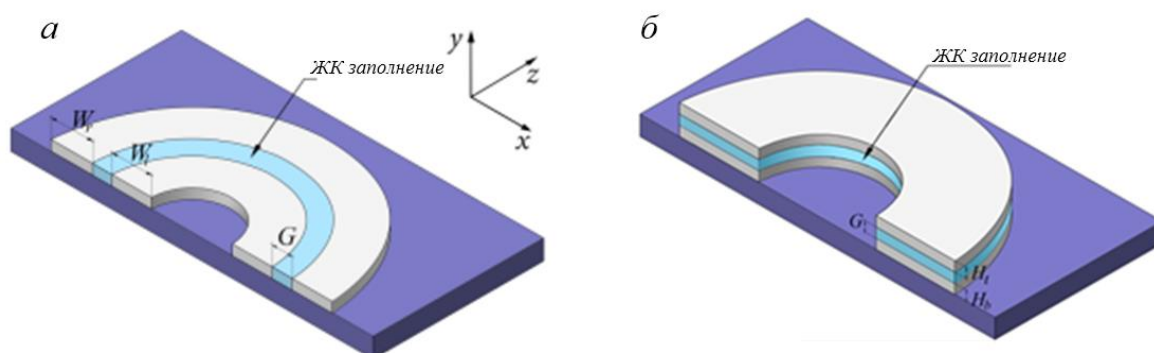


Рис.1. Конструкции микро резонаторов на основе волноводов с вертикальной (а) и горизонтальной (б) прорезями, заполненными ЖК [1]

Анализ, проведенный в работе [9], показал, что использование резонансных свойств волноводов значительно улучшает чувствительность датчика. Датчики на основе вертикальных щелевых волноводов с заполнением ЖК могут использоваться для измерения внешних электрических полей в диапазоне от 0 до  $3 \times 10^6$  В/м с точностью до 20 мкА/(В/м). Чувствительность датчика на основе горизонтальных щелевых волноводов составляет порядка 150 мкА/(В/м). Однако диапазон измерения значительно меньше (порядка  $10^5$  В/м).

Горизонтальные щелевые волноводы более чувствительны к напряженности электрического поля, чем волноводы с вертикальной щелью, из-за большего размера щели и, следовательно, большего количества заполнения ЖК. Однако вертикальные щелевые волноводы позволяют определять напряженность электрического поля в более широком диапазоне. Поэтому конструкция датчика электрического поля может включать в себя резонаторы на основе как вертикальных, так и горизонтальных щелевых волноводов.

Резонаторы на основе вертикальных щелевых волноводов можно использовать для грубого измерения напряженности электрического поля (с точностью до десятичного знака),



а горизонтальные щелевые волноводы подходят для его точной оценки (с точностью до меньшего, чем десятичная позиция).

В работе [10] представлен волоконно-оптический датчик, основанный на воздействии силы переменного электрического поля на полиамидную трубку с объемным зарядом для определения напряженности электрического поля (рис. 2).

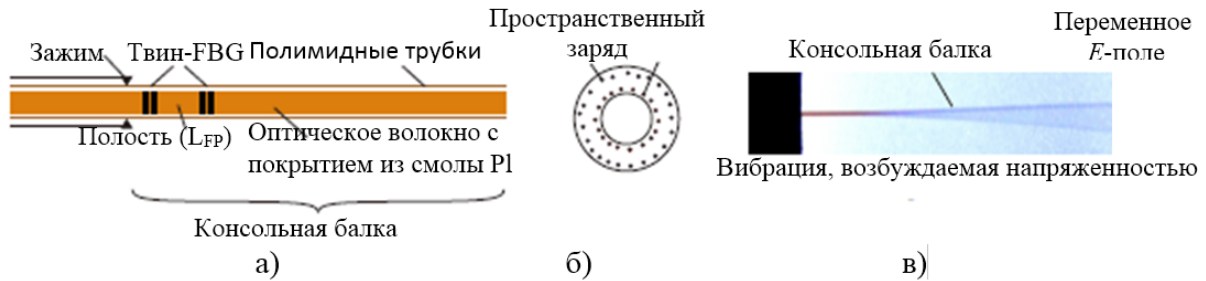


Рис. 2. а) структурная схема датчика; б) эскиз распределения пространственного заряда внутри трубки PI; в) фотография датчика, вибрирующего в электрическом поле переменного тока [10]

По своей конструкции датчик состоит из легкого волоконного кантилевера, покрытого электрически заряженной полиамидной трубкой в качестве полевого чувствительного элемента. В этот волоконный пучок встроен интерферометр Фабри-Перо на основе двойного FBG для обнаружения вибраций пучка, возбуждаемых напряженностью электрического поля, которое затем подлежит измерению. Прототип датчика показал высокую чувствительность 173,65 мкА/(В/м) при минимальной обнаруживаемой напряженности поля 0,162 В/м, в то время как другой датчик показал свою работоспособность при непрерывной работе более года.

Представленный в работе [11] высокочувствительный микродатчик напряженности электрического поля основан на торсионном эффекте с использованием крутильного резонанса. Микродатчик имеет торсионный затвор, который состоит из экранирующих электродов и торсионных балок (рис. 3). На рис. 3 введены обозначения:  $x$  – ось кручения,  $L$  – длина движущих элементов,  $l$  – длина экранирующего и чувствительного электродов,  $\tau$  – толщина чувствительной структуры,  $g$  – зазор между чувствительным и экранирующим электродами,  $w$  – ширина электрода,  $D$  – максимальное смещение экранирующих электродов, а  $\theta$  – угол кручения.

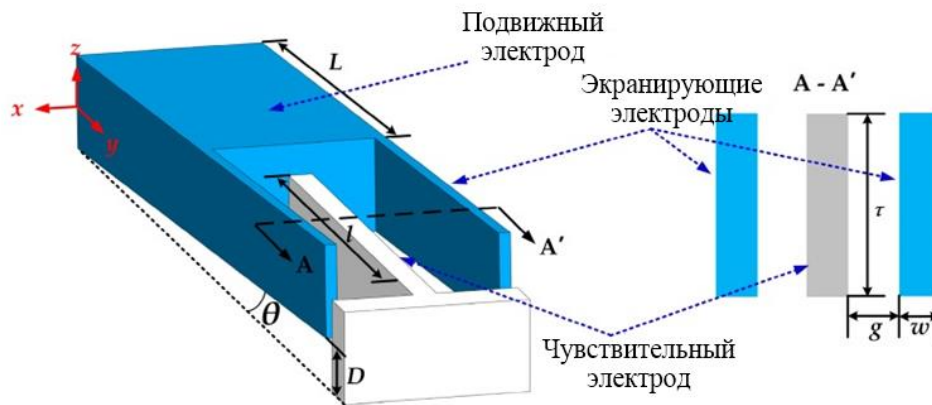


Рис. 3. Схематическая модель торсионного датчика

Результаты моделирования датчика показали [11], что торсионный затвор обладает высокой эффективностью индукции заряда. Хорошая линейность 0,15% была достигнута в диапазоне электростатического поля 0–50 кВ/м, а погрешность была ниже 0,38% в трех измерениях в обе стороны. Эффективность индукции заряда для этого микродатчика достигла 48,19 пА/(кВ/м).

В заключении можно сделать следующие выводы:

1) оптико-интерференционные и торсионные микродатчики обладают очень высокой чувствительностью к напряженности электрического поля и малой погрешностью;

2) датчики могут реагировать как на модуль, так и на составляющие вектора напряженности электрического поля;

3) датчики относятся к разряду прецизионных, поэтому их нецелесообразно использовать при измерении электрических полей энергетических установок;

Существенным недостатком рассмотренных датчиков является высокая стоимость и сложность их изготовления. Поэтому дальнейшие исследования необходимо сосредоточить на улучшении характеристик датчиков традиционной конструкции.

### Библиографический список

1. Biryukov S. V., Korolyova M. A. Electroinduction disk sensor of electric field strength // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2017. Vol. 944. P. 012017-1–012017-8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017.

2. Berent G. N., Plays I. R. Electric Field sensor // Instruments for Scientific Research. 1971. Vol. 6. P. 141–142.

3. Бирюков С. В., Шапова Л. В. Датчик напряженности электрического поля в виде плоской проводящей пластины в форме квадрата // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 126–130.

4. Щигловский К. Б., Аксельрод В. С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // Измерительная техника. 1978. № 5. С. 63–65.

5. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // Review of Scientific Instruments. 1978. Vol. 49, Issue 7. P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497.

6. Kamra A. K. Spherical field meter for measurement of the electric field vector // Review of Scientific Instruments. 1983. Vol. 54, Issue 10. P. 1401–1406. DOI: 10.1063/1.1137255.

7. Pittman E. P., Stanford R. A. Electric field sensor. US patent 3641427; filed September 24th, 1969; published February 08th, 1972.

8. Гатман С. Двойной измеритель электрического поля с защитой // Приборы для научных исследований. 1968. № 1. С. 45–49.

9. Goncharenko I., Rabtsau V. Optical electric field sensor on the base of waveguide structures // International Scientific and Practical Conference “Prevention and Elimination of Emergency Situations: Counteraction to Current Challenges and Threats, April 2017, At Minsk, Belarus. P. 333–337.

10. Dongping Xiao, Qichao Ma, Yutong Xie [et al.]. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement // J. Sensors. MDPI. 2018, 18, 1053.

11. Zhaozhi Chu, Chunrong Peng, Ren Ren [et al.]. A High Sensitivity Electric Field Microsensor Based on Torsional Resonance // J. Sensors. MDPI. 2018, Jan 19. DOI: 10.3390/s18010286.

*И.И. Гончар<sup>1</sup>, М.В. Чушнякова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## COVID-19 И ДИСТАНЦИОННОЕ ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

**Аннотация.** Описана методика вынужденно-дистанционного преподавания физики в ситуации, обусловленной пандемией COVID-19. Эта методика содержит четыре основные части: 1) обеспечение студентов учебными материалами и заданиями; 2) регулярная проверка заданий и снабжение студентов правильными решениями с комментариями; 3) коллективные консультации с помощью платформы МИРАПОЛИС; 4) регулярные индивидуальные контрольные собеседования с помощью программы СКАЙП. Обсуждаются преимущества и недостатки такого дистанционного метода по сравнению с «обычным» аудиторным индивидуально-групповым подходом.

**Ключевые слова:** пандемия COVID-19, дистанционное преподавание физики, аудиторный индивидуально-групповой метод.

На кафедре «Физика и химия» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС) в течение ряда лет разрабатывается и применяется аудиторный индивидуально-групповой метод преподавания физики. Суть его изложена в нескольких публикациях [1-3], она состоит в следующем. Лекции по общей физике для огромных (100–300 человек) потоков представляются нам в XXI веке пустой тратой времени [4] в силу следующих обстоятельств.

1) Информацию, которая излагается на лекции, студент всегда может прочитать сам – это в XIX веке снабдить студентов конспектом лекций было проблемой, а в XV веке профессор вообще был бесценным сосудом знаний, каждое слово которого следовало записать, а лучше запомнить: потерянную информацию восстановить было почти невозможно.

2) Темп усвоения материала у всех людей разный, а на лекции требуется усваивать (а главное, записывать!) материал в том темпе, который предложен лектором. Рассмотрим оптимистический сценарий: примерно 30% студентов не успевают записывать даже механически (ведь лектору надо успеть изложить как можно больше, если, конечно, он компетентен в данной дисциплине); примерно 20-ти процентам студентов уже давно скучно – они всё поняли, записали, и могли бы потратить оставшееся время с большей пользой; процентов 20 студентов вообще занимаются на лекции своими делами – всё равно это ничем не грозит, а учёба в виде диктовки их не интересует. И в лучшем случае в рамках оптимистического сценария 30% студентов всё записывает, пытаясь попутно понять.

3) Скорее всего, текст, который проговаривает лектор, можно найти в сети. Тогда лектор легко становится предметом насмешек тех студентов, которые вообще обращают на него внимание. По меньшей мере, одному из авторов данной работы приходилось бывать на лекциях, где на лектора почти никто не обращает внимания.

Вместо этих лекций нужно организовать занятия с группой из 10-20 студентов, каждого из которых следует снабдить небольшой книжкой (буклетом), которая является конспектом лекций и составляет основу учебного процесса. В буклете содержатся и вопросы (мы их называем «нельзя не знать», ННЗ), на которые студенты должны уметь отвечать на занятиях и на экзамене. Этот буклет студент должен получить в собственность, а не во временное пользование из библиотеки. Тогда в буклет студент может вписать свои вопросы,

комментарии преподавателя и т.п. И так, преподаватель задаёт студентам прочитать определённый кусок материала из буклета (в идеале, один раздел), прорешать задачи из данного раздела, а также подготовиться по определённым вопросам из списка ННЗ. Затем на занятиях студенты задают преподавателю вопросы по прочитанному материалу и задачам, которые они пытались решить. Примерная раскладка материала первого месяца изучения физики представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Примерная раскладка материала первого месяца изучения физики**

Неделя и дата	Домашнее задание на следующую неделю	Содержание занятия
1 2020 09.07	Читать раздел 1, решать задачи из этого раздела. Готовить вопросы ННЗ 1-5. Учиться пользоваться Периодической таблицей.	Раздел 0 «Введение». Правила нашей работы. Выдача буклетов. Знакомство с Периодической таблицей химических элементов. Структура атомов и ядер. Физические части речи. Тема экспресс-контроля – общая эрудиция.
2 2020 09.14	Читать раздел 2, решать задачи. Готовить вопросы ННЗ 1-8. Учиться пользоваться Периодической таблицей.	Раздел 1 «Основы астрономических знаний». Строение Солнечной системы, законы движения Земли и Луны. Структура атомов и ядер с использованием Периодической таблицы. Физические части речи – физические величины. Тема экспресс-контроля – строение атомов, ядер, ионов.
3 2020 09.21	Читать раздел 3, решать задачи. Готовить вопросы ННЗ 1-11. Выучить графики и свойства элементарных функций.	Раздел 2 «Вещество и излучение». Фотоны, протоны, электроны, атомы, ядра, ионы. Физические части речи – физические законы. Тема экспресс-контроля – энергия фотона и протона.
4 2020 09.28	Читать раздел 4, решать задачи. Готовить вопросы ННЗ 1-15.	Раздел 3 «Базовые идеи физики». Тела, частицы, движение, взаимодействие. Физические части речи – базовые понятия физики. Тема экспресс-контроля – импульс фотона и протона.

Можно возразить, что студенты не будут готовиться к таким занятиям и не будут задавать вопросы. Да, так случается: мы, как уже было сказано, проводим занятия таким образом уже много лет, так что опыт есть, и положительный (когда от вопросов отбоя нет), и отрицательный – не читали, вопросов нет. Тогда преподаватель предлагает студентам читать текст вслух по очереди. И оказывается, что читать умеют не все. В процессе чтения студентам вновь предлагается сформулировать вопросы – формулировка вопроса есть важнейший элемент интеллектуальной деятельности. В отсутствие вопросов преподаватель сам задаёт их студентам.

Конечно, необходимо подкреплять интерес студентов к занятию оценкой. В этом смысле в наших вузах сделано всё, чтобы такого интереса не было – трёхбалльная система убивает дух соревновательности [5]. Мы работаем по рейтинговой системе, которая применяется следующим образом. Почти каждое занятие завершается короткой контрольной работой (экспресс-контролем). Обычно в качестве экспресс-контроля предлагается несложная задача или тест на тот материал, который был задан к текущему занятию. Чаще всего мы разрешаем при решении пользоваться пособиями, которые лежат у студента на столе. Типичное время выполнения задания – 10 минут, типичный плановый балл – тоже 10.

В итоге студенты получают за это задание от одного балла (сдан листочек, на котором есть только условие) до 10 баллов (задача решена идеально правильно). В конце семестра подводится итог и оказывается, что студент Плюшкин набрал 80%, а студентка Чичикова – всего 20%. Тогда на экзамене Плюшкину задаётся один простенький вопрос, чтобы обоснованно поставить ему «хорошо». Ну, а студентка Чичикова будет приходиться на экзамен (пересдачу) снова и снова, пока не дотянет до 60%, которые позволят поставить ей «удовлетворительно».

И вот в эту нашу аудиторную индивидуально-групповую схему вмешался карантин: вместо аудиторных занятий со студентами необходимо заниматься с помощью компьютерно-сетевых технологий.

На первом месте у нас остался буклет - он основа образовательного процесса. Мы рассылаем студентам по электронной почте задания: какой раздел нужно прочитать и какую задачу (их в каждом разделе буклета около десятка) решить. Единицей учебного времени, как и при аудиторных занятиях, является неделя. Среда – последний срок сдачи задач. Каждый студент обязан прислать файл с решением задачи на электронную почту преподавателя. В четверг утром проверяются присланные решения, оцениваются, и эти оценки высылаются студентам вместе с заранее подготовленными правильными решениями на их электронную почту.

В пятницу с помощью платформы МИРАПОЛИС (Mirapolis Virtual Room) [6, 7] проводится занятие-консультация: это групповое занятие. Здесь студенты задают свои вопросы, а преподаватель на них отвечает. Эти вопросы могут касаться уже прорешенных и оцененных задач; задач, которые заданы на будущее; теоретического материала, который студенты читали. Довольно быстро выясняется, кто из студентов действительно учится, а кто только имитирует учёбу. Будем для краткости называть первых «отличниками», а вторых – «средняками». Так вот, через 3–4 недели учёбы отличники приглашаются в субботу на индивидуальную беседу, на которой уже преподаватель задаёт им свои вопросы. Для этого используется СКАЙП (Skype) [8, 9]. Каждому студенту в течение 10–15 минут задаются вопросы ННЗ, которые фигурируют в домашнем задании.

Мы в данном примере привели дни недели для краткости и прозрачности изложения предлагаемого алгоритма. Естественно, конкретное расписание будет, в частности, зависеть от количества часов, выделяемых на дисциплину в той или иной группе.

Можно выделить следующие недостатки предлагаемой методики. Во-первых, доступ к платформе МИРАПОЛИС платный. Однако, если университет не предоставляет доступ для своих преподавателей и студентов, альтернативно можно использовать приложение Zoom [10, 11], которое позволяет проводить конференции бесплатно, если они не превышают 40 минут. Если за это время не удалось обсудить все вопросы, то сразу можно начать конференцию повторно ещё на 40 минут и т. д. Такое прерывание, конечно, не очень удобно, но такая «плата» за бесплатный сервис вполне приемлема.

Во-вторых, некоторые толковые студенты по стечению обстоятельств (болезни, проблем со связью) могут попасть в разряд середняков. Можно по-разному решить эту проблему. Например, если кто-то из середняков проявляет активность на групповых консультациях и регулярно правильно выполняет домашние задания, этого студента можно перевести в разряд отличников и пригласить на индивидуальные беседы. Другое решение – приглашать всех на индивидуальные беседы, но сделать их в два раза реже: на чётной неделе опрашивается одна половина группы, на нечётной – другая. Это нужно решать отдельно для каждого случая: в одних группах много активных студентов, которые готовятся к занятиям и интересуются учёбой; в других – больше студентов, которые предпочитают отсиживаться молча.

И, наконец, в-третьих, проведение индивидуальных консультаций требует от студентов-отличников определённой степени организованности: они должны

скоординировать между собой порядок, в котором будут выходить на связь с преподавателем, и время.

Как ни странно, у дистанционного метода проведения занятий есть преимущества по сравнению с аудиторным. Во-первых, при дистанционном методе удаётся с каждым отличником побеседовать индивидуально каждую неделю, т.е. по существу отличники устно сдают своего рода зачёт каждую неделю. При аудиторном методе это осуществить невозможно: если преподаватель беседует с одним студентом, то остальные бездельничают.

Во-вторых, при работе со студентами с помощью сетевых технологий преподаватель не ограничен во времени: консультация может длиться и два часа, если у студентов есть вопросы.

При работе по такой методике преподаватель к концу семестра имеет сложившийся естественным образом рейтинг каждого студента. В этот рейтинг дают вклад оценки за присланные решённые задачи и ответы на вопросы преподавателя в ходе индивидуальных бесед, а также активность студента во время групповой консультации. Именно этот рейтинг в основном и определит финальную экзаменационную оценку.

### Библиографический список

1. Гончар И. И., Чушнякова М. В., Аронова Т. А. Особенности преподавания физики в российских технических вузах первой четверти XXI века // Вестник ОмГПУ. 2019. №1 (22). С. 97–99.

2. Гончар И. И., Чушнякова М. В., Крохин С. Н. Основные положения молекулярно-кинетической теории как отправная точка в изучении физики // Вестник Омского университета. 2017. № 2 (84). С. 36–40.

3. Гончар И. И., Чушнякова М. В., Крохин С. Н., Хмырова Н. А. Физические части речи: вопросы изучения законов физики // Омский научный вестник. 2017. № 1. С. 52–57

4. Гончар И. И. Лекция как отживший способ преподавания // Сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции преподавателей школ, инновационных учебных заведений и ВУЗов «Обучение физике и астрономии в контексте современных педагогических технологий» (Иркутск, 28-30 марта 2007 г.) Иркутск: 2007. С. 235–238.

5. Крохин С. Н., Гончар И. И., Чушнякова М. В. Система оценки знаний студентов в вузе // Материалы Международной школы-семинара «Физика в системе высшего и среднего образования России» (Москва, 3 июля 2012 г.) М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2013. С. 79–81.

6. Облачный сервис Mirapolis Virtual Room для проведения вебинаров, совещаний, конференций. URL: <https://virtualroom.ru/> (дата обращения: 13.05.2020).

7. Описание облачного сервиса Mirapolis Virtual Room, предназначенного для проведения вебинаров. URL: <https://startpack.ru/application/virtualroom> (дата обращения: 13.05.2020).

8. Электронный ресурс Skype для голосовой и видеосвязи через Интернет. URL: <https://www.skype.com/ru/> (дата обращения: 13.05.2020).

9. Skype: Википедия. Свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Skype> (дата обращения: 13.05.2020).

10. Облачная платформа Zoom для видео- и аудиоконференцсвязи. URL: <https://zoom.us/> (дата обращения: 13.05.2020).

11. Zoom: Википедия. Свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Zoom\\_Video\\_Communications](https://ru.wikipedia.org/wiki/Zoom_Video_Communications) (дата обращения: 13.05.2020).

## **ПОЛУЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ГАЗОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ ОТКЛИКА НА ПРИМЕРЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТОНКИХ ПЛЁНОК 50%In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–50%Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

**Аннотация.** Исследованы температурные и концентрационные зависимости газового отклика полупроводниковых тонких плёнок 50%In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–50%Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. На основе известных физических представлений построены полуэмпирические формулы, описывающие полученные зависимости. Выделены параметры, не зависящие от температуры сенсора и концентрации аналита, но пригодные для распознавания типа газа. Эти параметры могут быть использованы в качестве предикторов в газоанализаторах типа электронного носа, что позволит увеличить скорость распознавания и уменьшить стоимость таких устройств.

**Ключевые слова:** полупроводниковые тонкие плёнки, газоанализатор, распознавание газов.

### **Введение**

В последние годы для решения задачи распознавания газов активно разрабатываются газоанализаторы типа электронный нос (Electronic nose) [1]. Такие системы используются в топливной и пищевой промышленности, в медицине и в сфере безопасности [1–3]. В качестве первичных преобразователей в таких системах могут использоваться различные газовые сенсоры, такие как электрохимические, колориметрические, полупроводниковые, резистивные, биологические и многие другие [4]. Особый интерес у исследователей вызывают полупроводниковые сенсоры на основе оксидных тонких плёнок [4–6]. Принцип их работы основан на зависимости поверхностного сопротивления плёнок от концентрации воздействующего газа. Сенсоры на основе данных материалов имеют множество достоинств, таких как простота и надёжность конструкции, низкие затраты на изготовление, долговременная стабильность характеристик, широкий перечень детектируемых газов. Однако известный недостаток полупроводниковых сенсоров заключается в невозможности распознавания газов с помощью отдельного датчика данного вида [4]. В связи с этим, для идентификации газов активно разрабатываются газоанализаторы, содержащие массив полупроводниковых сенсоров, различающихся по тем или иным параметрам. В этом случае при одном и то же входном воздействии каждый сенсор массива даёт различный выходной сигнал. Распознавание газов посредством таких систем возможно путём анализа совокупности выходных сигналов сенсоров. При этом совокупность выходных сигналов рассматривается в качестве образа, отвечающего данному входному воздействию. Идентификация входных воздействий в этом подходе аналогична распознаванию визуальных образов искусственным интеллектом [6].

Однако, количество информации, которую приходится обрабатывать такой системе, велико, так как газовый отклик полупроводниковых сенсоров одновременно зависит от типа воздействующего газа, его концентрации, материала сенсора и его рабочей температуры. Это затрудняет анализ первичных данных, так как возникает необходимость хранить и анализировать большие объёмы информации, как для разных газов, так и для разных концентраций. Для решения указанной проблемы может быть использован подход, позволяющий извлечь из большого массива первичных данных небольшое количество вторичных параметров, несущих существенную информацию о типе воздействующего газа и не зависящих от других его характеристик [4, 5]. Поиск таких параметров облегчается при рассмотрении полуфеноменологических формул, построенных на основе известных

теоретических представлений о температурных и концентрационных зависимостях газового отклика [7–10]. Для получения искомым зависимостей проведено следующее исследование.

### Эксперимент

Тонкие плёнки  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$  получены при помощи импульсного лазерного напыления из порошковых мишеней с последующим высокотемпературным отжигом. Толщина плёнок составляла 0,2 мкм. Исследование газочувствительных свойств плёнок проводилось при помощи установки, обеспечивающей термостатирование плёнок и газостатическую атмосферу. Описание методики и режимов напыления представлено в [10].

Проведенное ранее исследование зависимости свойств таких плёнок от состава показало, что плёнки  $50\%\text{In}_2\text{O}_3\text{--}50\%\text{Ga}_2\text{O}_3$  обладают наибольшими значениями газового отклика, наименьшими рабочими температурами и наибольшим быстродействием [11]. Далее представлены результаты только для этих плёнок. Исследовались газовые составы: этанол, ацетон, аммиак, смесь пропан-бутан в естественном воздухе. Влажность воздуха поддерживалась равной 50%, давление –  $10^5$  Па. Диапазон температур составлял 350...700 °С, диапазон концентраций исследуемых газов – 1...70 ppm. Для определения величины газового отклика сопротивления использовали значения  $S_0$  в статическом режиме

$$S_0 = (R_0 - R_g) / R_g, \quad (1)$$

где  $R_0$  и  $R_g$  – сопротивление плёнки в воздухе и в воздухе с примесью газа, соответственно.

### Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования получены температурные зависимости газового отклика сопротивления  $S_0 = f(T)$  при неизменной концентрации  $C_0 = 25$  ppm исследуемого газа в воздухе. На рис. 1 продемонстрирован типичный ход таких графиков для случая ацетона. Вид данных зависимостей может быть определён как колоколообразный с двумя склонами, описываемыми экспоненциальными функциями [10]. В случае отклика на другие исследуемые газы эти графики аналогичны. Исходя из известных теоретических представлений, низкотемпературный и высокотемпературный участки данных зависимостей могут быть аппроксимированы полуфеноменологическими формулами вида

$$\begin{aligned} S_0 &= A_{S_{LT}} \cdot \exp(-E_{S_{LT}} / k_B \cdot T), \\ S_0 &= A_{S_{HT}} \cdot \exp(-E_{S_{HT}} / k_B \cdot T), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $E_S$  – энергии активации отклика,  $A_S$  – предэкспоненциальные множители, индексы  $LT$  и  $HT$  указывают на низкотемпературный и высокотемпературный диапазоны, соответственно,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура поверхности плёнки. Также на рис. 1 представлены значения коэффициента корреляции  $r$ –Пирсона.

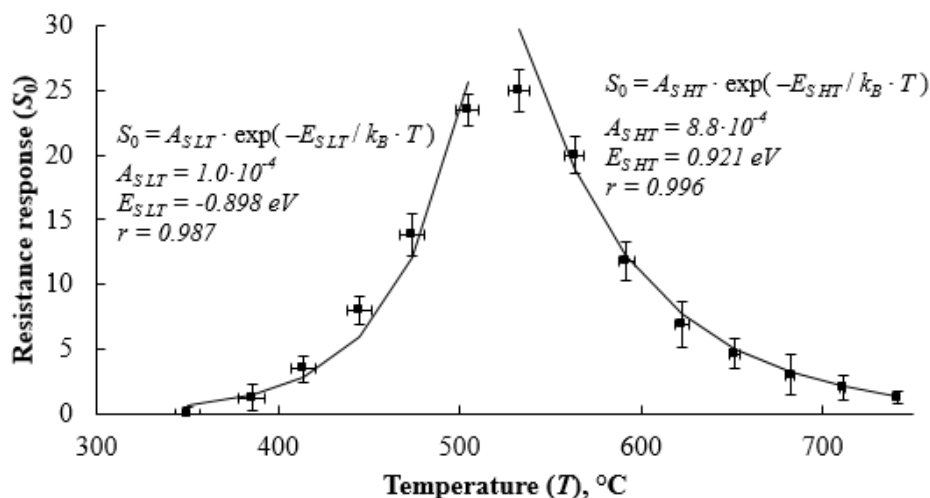


Рис. 1. Температурная зависимость газового отклика для 25 ppm ацетона в воздухе



Путём аппроксимации экспериментальных данных возможно определение параметров  $E_{SLT}$ ,  $E_{SHT}$ ;  $A_{SLT}$ ,  $A_{SHT}$ . Выявлено, что при варьировании концентрации исследуемого газа  $C_0$  параметры  $E_{SLT}$  и  $E_{SHT}$  не меняют своего значения. Также для них исключена зависимость от  $T$ , что видно из формул (2). Значит,  $E_{SLT}$  и  $E_{SHT}$  являются кандидатами на роль информационных параметров, подходящих для идентификации исследуемого газа. Значения  $E_{SLT}$  и  $E_{SHT}$  для всех исследованных газов даны в таблице 1. При рассмотрении же двух других параметров  $A_{SLT}$  и  $A_{SHT}$  обнаружено, что они зависят от концентрации  $C_0$  и не подходят для распознавания типа анализируемого газа.

Таблица 1

**Информационные параметры, не зависящие от концентрации  
воздействующего газа  $C_0$  и температуры сенсора  $T$**

Тип газа	$E_{SLT}$ , эВ	$E_{SHT}$ , эВ	$A_{SLT0}$	$A_{SHT0}$	$m$
Этанол	-0.805	1.067	16.15	-18.16	0.491
Ацетон	-0.898	0.921	16.18	-18.94	
Аммиак	-0.743	0.129	2.19	-8.73	
Пропан-бутан	-0.589	0.812	3.21	-9.38	

Наблюдаемые отличия в полученных значениях  $E_{SLT}$  и  $E_{SHT}$  могут быть объяснены в терминах процессов активации адсорбции и десорбции, что обсуждается подробно в [10]. В соответствии с известными теоретическими представлениями, возрастание модуля  $E_{SLT}$  соответствует увеличению разности энергий адсорбции горючего газа и адсорбции кислорода. Возрастание же  $E_{SHT}$  объясняется увеличением разности энергий десорбции горючего газа и десорбции продуктов его окисления [10]. Данные в таблице 1 показывают, что наибольшие и наименьшие значения  $E_{SLT}$  и  $E_{SHT}$  принимают для разных газов, что указывает на их взаимную неколлинеарность. Информационные параметры, обладающие свойством неколлинеарности, могут быть использованы для дальнейшего увеличения избирательности газоанализаторов, путём применения алгоритмов многофакторного идентификационного анализа.

На следующем этапе исследования получены концентрационные зависимости газового отклика сопротивления  $S_0 = f(C_0)$ . На рис. 2 представлен характерный график для случая ацетона в воздухе при  $T = 530$  °С. При варьировании типа газа  $GT$  и температуры сенсора  $T$  вид этих зависимостей остаётся аналогичным. Многочисленные исследования указывают на то, что данные графики описываются степенными формулами [10]

$$S_0 = b \cdot C_0^m. \quad (3)$$

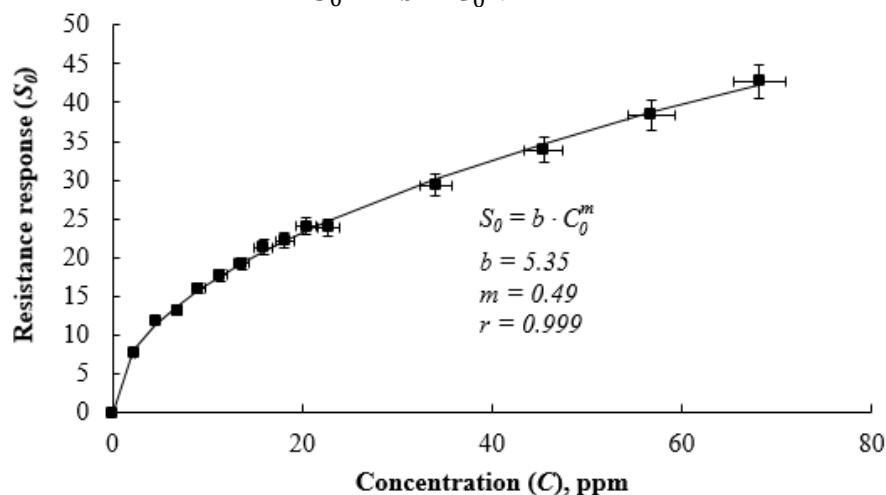


Рис. 2. Концентрационная зависимость газового отклика сопротивления для случая ацетона в воздухе при  $T = 530$  °С

По результатам аппроксимации экспериментальных зависимостей формулами (3) получены численные значения констант  $m$  и  $b$ . Показано, что константа  $b$  зависит от  $GT$  и  $T$ , что делает её неудобной для распознавания типа анализируемого газа. При исследовании зависимости показателя степени  $m$  обнаружено, что его значение является неизменным при варьировании любых исследуемых переменных, включая и  $GT$ . По этой причине  $m$  не может быть использован для идентификации  $GT$ .

Следует отметить, что приблизительное равенство константы  $m$  величине 0.5 подтверждено многими исследователями для ряда полупроводниковых материалов и для большого спектра горючих газов. На сегодняшний день нет единого мнения по поводу фундаментальных причин этой закономерности. Больше информации по данному вопросу может быть получено в [10].

Таким образом, исследование концентрационных зависимостей  $S_0 = f(C_0)$  не позволило непосредственно получить новые информационные параметры. Однако, с учётом выявленной степенной зависимости  $S_0$  от  $C_0$  формула (2) может быть преобразована к виду

$$\begin{aligned} S_0 &= A_{S_{LTO}} \cdot C_0^m \cdot \exp(-E_{S_{LT}} / k_B \cdot T), \\ S_0 &= A_{S_{HTO}} \cdot C_0^m \cdot \exp(-E_{S_{HT}} / k_B \cdot T). \end{aligned} \quad (4)$$

В отличие от формул (2) в формулах (4) для параметров  $A_{S_{LTO}}$  и  $A_{S_{HTO}}$  исключена зависимость от  $T$  и  $C_0$ . Это означает, что они подходят для использования в качестве информационных параметров, позволяющих идентифицировать воздействующий газ. Численные значения  $A_{S_{LTO}}$  и  $A_{S_{HTO}}$  даны в таблице 1.

Заключительный этап исследования был направлен на подтверждение неколлинеарности полученной группы информационных параметров  $E_{S_{LT}}$ ,  $E_{S_{HT}}$ ,  $A_{S_{LTO}}$ ,  $A_{S_{HTO}}$  и группы варьируемых характеристик  $T$  и  $C_0$ . Диапазон рассчитанных коэффициентов корреляции  $r$ -Пирсона между указанными группами параметров составил  $-0.098 \dots 0.109$ , что указывает на отсутствие зависимости или очень слабую корреляцию.

В противоположность этому, по данным, представленным в таблице 1, можно видеть, что значения любого из предложенных информационных параметров  $E_{S_{LT}}$ ,  $E_{S_{HT}}$ ,  $A_{S_{LTO}}$  и  $A_{S_{HTO}}$  сильно зависят от типа анализируемого газа  $GT$ . Суммируя всё вышеизложенное, можно заключить, что любой из четырёх исследуемых информационных параметров подходит для идентификации газа, воздействующего в данный момент на сенсор. Дальнейшее исследование может быть направлено на сравнительную характеристику этих параметров и определение того, какие из них дают наибольший вклад в избирательность газоанализаторов. Данная задача может быть решена средствами регрессионного анализа [12].

### Заключение

С использованием известных теоретических положений исследованы температурные и концентрационные зависимости газового отклика сопротивления. Результаты получены для полупроводниковых тонких плёнок  $50\% \text{In}_2\text{O}_3$ – $50\% \text{Ga}_2\text{O}_3$  при воздействии одного из ряда горючих газов: этанол, ацетон, аммиак, смесь пропан-бутан. Путём обработки этих зависимостей при помощи построенных полуэмпирических формул выделены четыре информационных параметра, не зависящие от рабочей температуры сенсора и концентрации анализируемого газа. Значения данных величин являются характерными для различных воздействующих газов, поэтому они могут быть использованы в качестве предикторов в газоанализаторах типа электронного носа. Их применение позволит уменьшить количество обрабатываемых первичных данных, уменьшить стоимость и увеличить скорость работы газоанализаторов.

### Библиографический список

1. Méndez M. L. R. Electronic Noses and Tongues in Food Science. Elsevier, 2016. 332 p.
2. Mahmodi K., Mostafaei M., Mirzaee-Ghaleh E. Detection and classification of diesel-

biodiesel blends by LDA, QDA and SVM approaches using an electronic nose // Fuel. 2019. Vol. 258. 116114.

3. Le Maout P. L., Wojkiewicz J.-L., Redon N. [et al.]. Polyaniline nanocomposites based sensor array for breath ammonia analysis. Portable e-nose approach to non-invasive diagnosis of chronic kidney disease // Sensors and Actuators B. 2018. Vol. 274. P. 616–626.

4. Reimann P., Schutze A. Sensor Arrays, Virtual Multisensors, Data Fusion, and Gas Sensor Data Evaluation // Gas Sensing Fundamentals. 2014. P. 67–107.

5. Demin I. E., Kozlov A. G. Selectivity of the gas sensor based on the 50%In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–50%Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film in dynamic mode of operation // Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 944. 012027.

6. Rock F., Barsan N., Weimar U. Electronic Nose: Current Status and Future Trends // Chemical Review. 2008. Vol. 108. P. 705–725.

7. Yamazoe N., Suematsu K., Shimanoe K. Surface chemistry of neat tin oxide sensor for response to hydrogen gas in air // Sensors and Actuators B: Chemical. 2016. Vol. 227. P. 403–410.

8. Yamazoe N., Shimanoe K. Theory of power laws for semiconductor gas sensors // Sensors and Actuators B: Chemical. 2008. Vol. 128. P. 566–573.

9. Korotcenkov G., Cho B. K. Metal oxide composites in conductometric gas sensors: Achievements and challenges // Sensors and Actuators B: Chemical. 2017. Vol. 244. P. 182–210.

10. Дёмин И. Е., Козлов А. Г. Электрофизические и газочувствительные свойства тонких плёнок In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученных импульсным лазерным напылением // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7, № 3. С. 290–297.

11. Demin I. E., Kozlov A. G. Effect of composition on properties of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films // Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 858. 012009.

12. Müller P., Salminen K., Nieminen V. [et al.]. Scent classification by K nearest neighbors using ion-mobility spectrometry measurements // Expert Systems With Applications. 2019. Vol. 115. P. 593–606.

УДК 621.396, 625.7

*О. А. Ивченко<sup>1</sup>, А. А. Бабарико<sup>2</sup>, Н. А. Хмырова<sup>3</sup>, А. А. Козлов<sup>1</sup>, Р. Э. Мирзоджонов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Омский автобронетанковый инженерный институт, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия

<sup>3</sup>Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

## ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

**Аннотация:** в статье приведены результаты исследования физических параметров ледового покрова реки Иртыш. Описан метод георадиолокационного измерения толщины льда. Выдвинуты предположения о причинах возникновения погрешностей оценки физических параметров ледового покрова при сопоставлении их с результатами прямых натурных измерений.

**Ключевые слова:** георадиолокация, ОКО-3, радарограмма, толщина ледового покрова, ледовая переправа, диэлектрическая проницаемость, модель Дебая.

Георадиолокация широко применяется для решения задач подповерхностного картирования, в том числе при проектировании ледовых переправ. С целью проектирования проводят работы по измерениям глубины водоемов, толщины ледовых покровов, а также определяют прочностные характеристики льда и состояние снежных покровов [1]. Одним из

методов оперативного получения достоверной информации при проектировании ледовых переправ в соответствии с требованиями ОДН 218.010-98 является георадиолокация [2].

Принцип действия георадара основан на явлении отражения электромагнитных волн от границ раздела сред, имеющих различные диэлектрические проницаемости. Передающая антенна излучает волны малой длительности, тем самым обеспечивается высокая разрешающая способность прибора (минимальное расстояние по глубине исследуемой среды, при которой уже различимы два или более объектов [3]). Результирующая волна, называемая трассой, как сумма прямой и отраженной волн, поступает на приемную антенну. Сканирование георадаром исследуемой поверхности позволяет увидеть на экране радарограмму – набор трасс, представляющую собой зависимость амплитуд результирующего сигнала от времени прихода отраженной волны. Выбор центральной частоты антенны зависит от свойств исследуемой среды (толщины, диэлектрической проницаемости).

В данной работе представлены результаты георадиолокационного исследования ледового покрова Черлакской переправы (Омская область), проводимые в марте 2019 года. Среднесуточная температура на момент измерений колебалась в пределах от -3 до 0 °С. Температура льда на поверхности составляла -2 °С, температура воды +0,05 °С [2].

Исследования выполнялись антенным блоком АБ-1000 георадара ОКО-3. Центральная частота антенны – 1000 МГц, заявленные глубина зондирования и разрешающая способность – соответственно 1,5 и 0,05 м [3]. Обработка радарограмм выполнялась в ПО Geoscan32. На рис. 1 представлен фрагмент полученной радарограммы. По оси абсцисс отложена длина трассы в метрах, по оси ординат – время распространения сигнала в среде в наносекундах. Градации серого цвета показывают интенсивность отраженных сигналов. На радарограмме четко видны отражения от границ сред воздух-лед и лед-вода, имеющих различную диэлектрическую проницаемость.

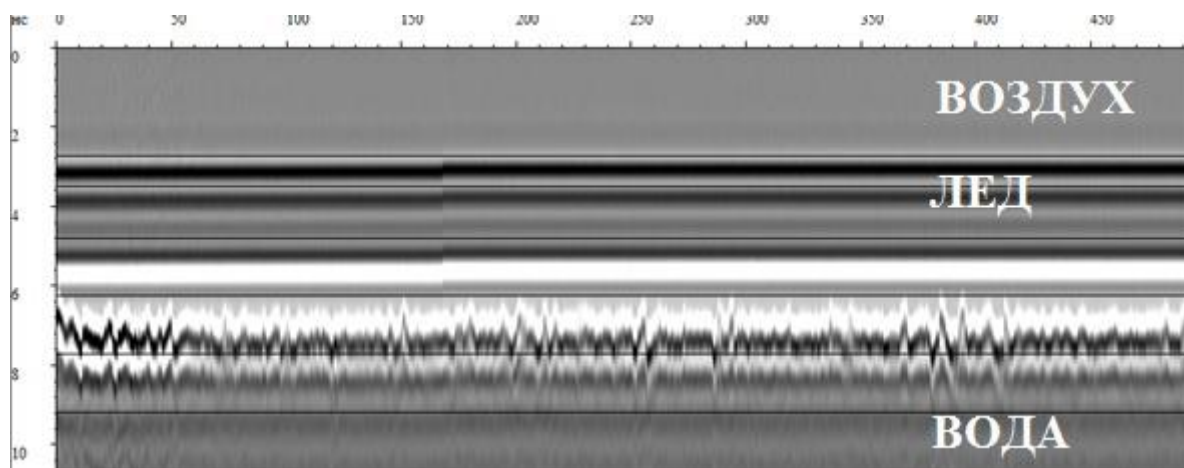


Рис. 1. Фрагмент радарограммы Черлакской ледовой переправы (Омская область, р. Иртыш)

Скорость распространения электромагнитной волны в исследуемой среде может быть оценена по величине диэлектрической проницаемости:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме,

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

При рассмотрении электромагнитных свойств льда как исследуемой среды необходимо учитывать, что его магнитная проницаемость близка к единице и составляет 0,9997 [4], поэтому магнитные свойства льда не учитываются. Лед представляет собой

полярный диэлектрик, и его свойства, как свойства любого диэлектрика, хорошо описываются теорией Дебая на частотах от 100 МГц до 3 ГГц [5]. При повышении частоты до сотен ГГц действительная часть диэлектрической проницаемости описывается моделью Дебая, тогда как мнимая часть монотонно возрастает [6]. В широком диапазоне температур (от 0 до -70 °С) значение действительной части комплексной диэлектрической проницаемости варьируется в пределах 3,14–3,19 [6]. При низких концентрациях загрязненности льда хлористым натрием, в условиях температур, соответствующих температурным режимам весеннего периода Западной Сибири, величину диэлектрической проницаемости льда можно оценивать по модели Дебая, пренебрегая ее мнимой составляющей.

С другой стороны, скорость распространения электромагнитной волны в среде можно определить следующим образом:

$$v = \frac{l}{\Delta t}, \quad (2)$$

где  $l$  – теоретическая толщина льда,

$\Delta t$  – время прохождения отраженной волны от границы лед-вода до границы воздух-лед, определяемое по радарограмме.

Приравняв 1 и 2, выразим величину теоретической толщины льда:

$$l = \frac{c \cdot \Delta t}{\sqrt{\varepsilon}}. \quad (3)$$

Найденные таким образом теоретические значения толщин льда для 10 точек ледовой трассы были сопоставлены с фактическими значениями, полученными в ходе натурных измерений толщины льда в результате бурения лунок вдоль георадиолокационной трассы. Относительные погрешности теоретической толщины льда, найденные как отношения разниц теоретических и экспериментальных толщин льда к величине экспериментальных, не превышают 7%. Это значение соизмеримо с величиной относительной погрешности метода (порядка 5%), найденной как отношение разрешающей способности георадара и максимальной измеренной толщины льда. Мы предполагаем, что погрешности оценки теоретической толщины льда могут быть связаны с состоянием верхнего слоя ледового профиля. Вследствие преобладания положительных среднесуточных температур в период проведения измерений и, вместе с тем, сравнительно большого транспортного потока в пределах исследуемой ледовой переправы, наличия трещин в профиле в прибрежной части переправы, верхний слой льда, толщиной порядка 5-8 см, имел менее плотную структуру, был более влажным и содержал большое количество примесей, что привело к дополнительному затуханию сигнала. Тем не менее, полученные результаты подтверждают возможность использования метода георадиолокационного измерения толщины льда на водных объектах.

### Библиографический список

1. Отраслевые дорожные нормы. Автомобильные дороги общего пользования. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ. ОДН 218.010-98. URL: [http://snipov.net/c\\_4832\\_snip\\_101571.html](http://snipov.net/c_4832_snip_101571.html) (дата обращения: 05.03.2020).

2. Ивченко О. А., Бабарико А. А. Исследование характеристик ледовой переправы методами микроволновой радиолокации // Актуальные проблемы современной науки: материалы VIII Региональной научно-практической конференции с международным участием. Омск, 2019. С. 91–92.

3. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-3». Универсальный базовый комплект. Инструкция по эксплуатации. ООО «Логические системы» - URL: [http://www.geotech.ru/images/georadary/teh\\_opisanie\\_na\\_oko3\\_ot\\_17-10-18.pdf](http://www.geotech.ru/images/georadary/teh_opisanie_na_oko3_ot_17-10-18.pdf) (дата обращения: 05.03.2020).

4. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
5. Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны. М.: ИЛ, 1960. 438 с.
6. Warren S. G. Optical constants of ice from ultraviolet to the microwave // Applied Optics. 1984. No. 23, P. 1206–1225.

УДК 621.592.0

*А.М. Костащук, А.Н. Вакилов*

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

## **ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕНОРМАЛИЗАЦИОННОЙ КОНСТАНТЫ СВЯЗИ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ИЗИНГА**

**Аннотация.** Проведено моделирование методом Монте-Карло термодинамического поведения трехмерной модели Изинга вблизи критической температуры. С использованием метода перевешивания были вычислены восприимчивость, корреляционная длина и ренормализационная константа связи, определяющая неподвижную точку ренормализационного преобразования. При фиксированном отношении корреляционной длины к линейному размеру решетки была получена зависимость ренормализационной константы связи от температуры, что дало возможность получить значение величины при критической температуре.

**Ключевые слова:** Метод Монте-Карло, фазовые переходы, критическая температура, модель Изинга, корреляционная длина, ренормгрупповое преобразование.

Теория фазовых переходов второго рода характеризуется аномально большим взаимодействием флуктуаций параметра порядка и является теорией без малого параметра [1]. Поэтому ряды теории возмущений являются расходящимися и адекватно описать критические свойства реальных систем возможно только с применением специальных методов суммирования [2]. Ренормализационная константа связи является неподвижной точкой ренормгруппового преобразования и определяет критические характеристики системы и критические индексы. Вычисление таких критических характеристик пертурбативным методом Монте-Карло представляет большой интерес.

Модель Изинга описывается гамильтонианом

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle}^N S_i S_j,$$

где  $J$  – константа обменного взаимодействия между ближайшими соседями. В нашем случае  $J > 0$ , что соответствует ферромагнетику,  $S_i$  – спины, принимающие значения  $\pm 1$ , находятся в узлах трехмерной кубической решетки линейного размера  $L$  и с периодическими граничными условиями. Микросостояние решетки определяется набором спинов  $S_i$ , а макроскопические свойства системы определяются свойствами ее возможных микросостояний.

В данной работе вычислялись следующие физические величины:

намагниченность системы

$$M = \sum_i^N S_i,$$

восприимчивость

$$\chi = \frac{\langle M^2 \rangle - \langle M \rangle^2}{kT},$$

корреляционная длина

$$\xi = \frac{1}{2 \sin\left(\frac{\pi}{L}\right)} \sqrt{\frac{\chi}{F} - 1},$$

где  $F = \frac{\langle \Phi \rangle}{L^3}$ ,

$$\Phi = \frac{1}{3} \left( \left| \sum_i S_i \exp \frac{2\pi i x_{1,i}}{L} \right|^2 + \left| \sum_i S_i \exp \frac{2\pi i x_{2,i}}{L} \right|^2 + \left| \sum_i S_i \exp \frac{2\pi i x_{3,i}}{L} \right|^2 \right),$$

$(x_{1,i}, x_{2,i}, x_{3,i})$  – координаты  $i$ -го узла решетки,

ренормализационная константа связи

$$g_R = 3 \left( \frac{L}{\xi} \right)^3 \left( 1 - \frac{\langle M^4 \rangle}{3 \langle M^2 \rangle^2} \right).$$

Угловые скобки в формулах  $\langle \dots \rangle$  обозначают статистическое усреднение.

Фазовый переход второго рода возможен лишь в термодинамическом пределе, когда объем системы и количество частиц стремится к бесконечности. Для нахождения физических величин вблизи критической температуры используются методы конечно-размерного скейлинга. Прямое применение этих методов для вычисления константы связи в термодинамическом пределе не дает правильного значения, так как в критической области  $g_R$  демонстрирует следующее свойство [3,4]:

$$g_R^\infty \equiv \lim_{\beta \rightarrow \beta_c^-} \lim_{L \rightarrow \infty} g_R(L, \beta) \neq \lim_{L \rightarrow \infty} \lim_{\beta \rightarrow \beta_c} g_R(L, \beta) \equiv \widetilde{g}_R,$$

где  $\beta=1/T$  – обратная температура.

Для вычисления термодинамических величин использовали метод перевешивания [5], позволяющий на основе моделирования только при одной температуре получать среднее значение физических величин при других температурах:

$$\langle O \rangle_\beta = \frac{\sum_E O(E) h_\beta}{\sum_E h_\beta(E)} = \frac{\sum_E O(E) h_{\beta_c}(E) e^{-(\beta-\beta_c)E}}{\sum_E h_{\beta_c}(E) e^{-(\beta-\beta_c)E}},$$

где  $E$  – энергия системы,  $h_\beta(E)$ - число состояний с энергией  $E$ .

Вблизи критической температуры времена релаксации и корреляции расходятся. Для уменьшения эффектов критического замедления времени релаксации в работе применялся кластерный алгоритм Вольфа[6].

Кластерный алгоритм Вольфа характеризуется тем, что состояние в решетке спинов при моделировании изменяется одновременным переворотом кластера спинов.

### Алгоритм Монте-Карло в варианте Вольфа

1. Выбирается случайным образом спин в решетке, который будем называть центральным. Затем центральный спин переворачивается, т.е. его значение меняется на противоположное.

2. Рассматриваются ближайшие соседи центрального спина. Если соседний спин направлен одинаково с неперевернутым центральным, то с вероятностью  $1 - \exp\left(-\frac{2}{T}\right)$  этот спин переворачивается, а его координаты запоминаются в стеке.

3. После того как проверены все соседние узлы, спин, координаты которого были загружены в стек последними, выбирается центральным, и снова выполняется п. 2.

4. Процедура переворота спинов заканчивается тогда, когда стек становится пустым. Этот процесс называется переворотом кластера и соответствует одному шагу Монте-Карло.

В работе выполнено моделирование решеток с линейным размером  $L = 32, 48, 64, 96, 128$  при критической температуре. Усреднение термодинамических величин проводилось по  $2 \cdot 10^6$  различным состояниям, соответствующим одному шагу Монте-Карло. Один шаг соответствовал десяти переворотам кластера Вольфа. В работах [3,4] было получено условие достижения термодинамического предела  $L/\xi > 4$ . Поэтому из вычисленных значений  $g_R$  для получения асимптотического значения  $g_R^\infty$  использовались только те, которые соответствовали условию  $L/\xi = 6$ . Полученные соответствующие величины при разных температурах приведены в таблице 1.

Таблица 1  
Таблица зависимости константы связи  $g_R$   
от температуры

T	$g_R$
4.5242	27.39(2)
4.5241	27.32(3)
4.5240	27.25(3)
4.5239	27.18(2)
4.5238	27.12(4)
4.5237	27.07(2)
4.5317	28.23(4)
4.5316	28.06(4)

Из выявленной температурной зависимости  $g_R$  может быть выделено критическое значение, соответствующее неподвижной точке ренормализационного преобразования  $g_R^\infty$ , на основе следующей скейлинговой зависимости для данной величины:

$$g_R(\tau) = g_R^\infty (1 + \alpha \tau^\theta),$$

здесь  $\tau = (T - T_c)/T_c$  – температура,  $\theta$  – индекс поправки к скейлингу, для трехмерной модели Изинга  $\theta = 0,504$  [3]. Из полученных данных с помощью метода наименьших квадратов нами было получено значение  $g_R^\infty = 23,85(3)$ , которое хорошо соотносится с теоретико-полевым значением  $g_R^\infty = 23,73(2)$  [4] и результатами Монте-Карло  $g_R^\infty = 23,3 - 26,4$  [3, 4].

В работе показано, что метод перевзвешивания может с успехом применяться для вычисления констант связи ренормализационного преобразования. Особенно актуальным будет применение этого метода для сильно неупорядоченных систем, для которых теоретико-полево описание невозможно.

Для вычислений были использованы ресурсы межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.



## Библиографический список

1. Вильсон К., Когут Дж. Ренормализационная группа и  $\varepsilon$ -разложение // УФН. 1985. Т. 146, вып. 3. С. 459–491.
2. Суслов И. М. Расходящиеся ряды теории возмущений // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. С. 1350–1402.
3. Kim J. K., de Souza A. J., Landau D. P. Numerical Computation of Finite Size Scaling Functions: An Alternative Approach to Finite Size Scaling // Phys.Rev. E. 1996. Vol. 54. P. 2291–2301.
4. Ballesteros H. G., Fernández L. A., Martín-Mayor V. Muñoz Sudupe A. Finite Size Scaling and “perfect” actions: the three dimensional Ising model // Physics Letters B. 1998. Vol. 441, Issue 1–4. P. 330–338.
5. Ferrenberg R. H. and Swendsen R. H. New Monte Carlo technique for studying phase Transitions // Phys. Rev. Lett. 1988 . Vol.61. P. 2635–2638.
6. Wolf U. Collective Monte Carlo updating for spin systems // Phys. Rev. Lett. 1989. Vol. 62. P. 361–364.

УДК 53.02

*Н.С. Кучинская, Л.А. Литневский*

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

### **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРМИ-ДИРАКА» ПРИ ОТЛИЧНЫХ ОТ НУЛЯ ТЕМПЕРАТУРАХ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

**Аннотация.** Анализируется возможность решения на практических занятиях курса общей физики задач по теме «Распределение Ферми-Дирака», условие которых не содержит требования нулевой температуры металлического образца. Показано, что при температурах вплоть до верхней границы рабочего интервала температур полупроводниковых приборов вычисленные характеристики распределения в пределах обычной погрешности округления не отличаются от результатов расчетов при нулевой температуре.

**Ключевые слова:** курс общей физики, распределение Ферми-Дирака, среднее значение энергии электронов, численное интегрирование.

Хорошо известно, что физика является одним из предметов, который требует умения «думать», анализировать, сопоставлять, выбирать. Соответственно, нет лучшего предмета для развития таких способностей. Названные способности все в большей степени становятся востребованными на рынке труда, и их роль будет возрастать по мере расширения сфер использования искусственного интеллекта. Задача педагогов-физиков – предоставить лучшие возможности для развития творческих способностей обучающихся [1, 2]. Решение задач, в которых требуется анализировать изучаемые процессы, явления, находить величины, которыми можно пренебречь в каждой конкретной задаче – лучший способ получить грамотного, квалифицированного специалиста.

Большинство задач, представленных в рекомендованных для технических ВУЗов сборниках задач по физике, как правило, традиционно сформулированы для «модельных» условий. Так, вместо движущегося автомобиля, поезда, летящего самолета будет написано:

«движется материальная точка» или, в лучшем случае, «небольшое тело», «частица». Подобный подход к формулировке условий задач наблюдается во всех разделах курса общей физики. Наверное, во многих случаях он оправдан. Однако вызывает сомнение оправданность «модельного» подхода при решении задач по теме «Распределение Ферми-Дирака»: если при решении задачи необходимо вычислить интеграл от функции распределения Ферми-Дирака, то в условии содержится указание: абсолютную температуру считать равной нулю. С одной стороны, названное условие вполне понятно – при температурах металла, отличных от абсолютного нуля, невозможно вычислить аналитически интеграл от функции распределения Ферми-Дирака. С другой стороны, абсолютный ноль температуры недостижим, так что рассматриваемая «модель» с таким условием является физически невозможной. Конечно, существуют задачи и с ненулевой температурой, однако даже при температуре рассматриваемого металла в несколько Кельвин, задача уже принимает статус олимпиадной.

Нам представляется важным, чтобы даже «модельные» задачи были приближены к условиям, возможным в реальности. Обучающиеся должны научиться обращать внимание на соответствие полученных результатов возможному диапазону значений данной физической величины. Очевидно, что и условие задачи не должно выходить за пределы приемлемого.

В данной работе выполнен анализ возможности решения описанных выше задач при температурах образца, существенно отличающихся от абсолютного нуля и достигающих верхних пределов рабочего диапазона температур полупроводниковых приборов.

Согласно общепринятой терминологии, распределением Ферми-Дирака называется формула

$$\langle N \rangle = \left[ \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1},$$

позволяющая вычислить среднее число частиц-фермионов в одном квантовом состоянии (или вероятность заполнения такого состояния). Функцией распределения Ферми-Дирака (функция распределения фермионов в металле по энергии) называется функция

$$f(W) = \langle N \rangle g(W),$$

где  $g(W)$  – плотность состояний. Заметим, что функция распределения не нормирована на единицу – на занятии непременно нужно сделать акцент на этом обстоятельстве, поскольку известные из математики формулы вычисления, например, среднего значения случайной величины должны быть модифицированы для расчета, например, среднего значения энергии, дисперсии и других характеристик распределения электронов в металле.

Хорошо известно, что температура вырождения электронного газа в металлах (температура Ферми) достигает десятков тысяч Кельвин, а «размытость» фермиевской ступеньки имеет порядок величины, равный  $kT$ , что в интервале рабочих температур полупроводниковых приборов (300 – 400 К) много меньше энергии Ферми. Разумеется, это обстоятельство подсказывает, что требование абсолютного нуля температуры может оказаться чрезмерным, и результаты расчетов, выполненные с нулевыми и ненулевыми температурами, будут отличаться незначительно.

Для проверки высказанного предположения были вычислены при различных температурах несколько первых моментов распределения и вытекающие из них характеристики статистической системы, такие как среднее значение, дисперсия, коэффициенты асимметрии и эксцесса (важность этих величин обсуждается в [3]).

Параметры распределений при температуре абсолютного нуля были вычислены аналитически, численное интегрирование при вычислении первых четырех моментов распределения при температурах 300 К и 400 К было выполнено с помощью online-калькулятора «integral-calculator.ru». Поскольку калькулятор производит вычисления с большой точностью (относительная погрешность находилась в пределах  $10^{-6} \dots 10^{-8} \%$ ), то при вычислении, чтобы не увеличить погрешность грубым округлением, были использованы следующие значения постоянных: элементарный заряд  $e = 1,6021773 \cdot 10^{-19}$  Кл, постоянная Больцмана  $k = 1,38066581 \cdot 10^{-23}$  Дж/К. Значение энергии Ферми при расчетах было выбрано равным 10 эВ. Верхний предел интегрирования при не равных нулю температурах был равен 12 эВ. Расчетами было проверено, что увеличение верхнего предела интегрирования выше этого значения не имеет смысла, так как это практически не влияет на значения интегралов.

Сначала была вычислена часть нормировочного интеграла, оставшаяся после того, как за знак интеграла была вынесена постоянная, которая в дальнейшем сократится при вычислении моментов распределения:

$$\int_0^{\infty} \left[ \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} 4\pi V \frac{(2m_e)^{3/2}}{h^3} W^{1/2} dW = C \int_0^{\infty} \left[ \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} W^{1/2} dW.$$

Этот интеграл потребуется для расчетов параметров распределения.

Для наглядности результаты расчетов представлены в электрон-вольтах. График подынтегральной функции нормировочного интеграла, построенный для температуры 400 К, показан на рис. 1:

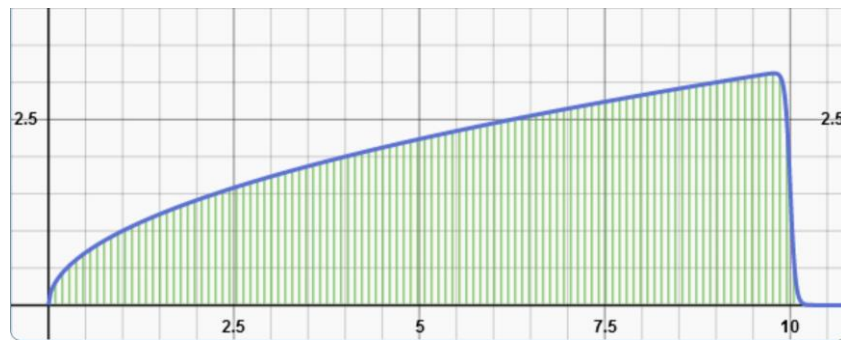


Рис.1. Подынтегральная функция нормировочного интеграла (без константы): по вертикальной оси отложена подынтегральная функции в  $\text{эВ}^{1/2}$ , по горизонтальной – энергия в эВ,

Среднее значение энергии электронов было вычислено по формуле:

$$\langle W \rangle = \frac{\int_0^{\infty} W \left[ \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} W^{1/2} dW}{\int_0^{\infty} \left[ \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} W^{1/2} dW},$$

а центральные моменты распределения для  $n = 2, 3, 4$  по формуле:

$$\mu_n = \frac{\int_0^{\infty} (W - \langle W \rangle)^n \left[ \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} W^{1/2} dW}{\int_0^{\infty} \left[ \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} W^{1/2} dW}.$$

Дисперсия, стандартное отклонение, коэффициенты асимметрии и эксцесса были вычислены по следующим формулам соответственно:

$$D = \mu_2, \quad \sigma = \sqrt{D}, \quad \gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad \gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3.$$

Таблица 1

**Характеристики распределения электронов по энергиям при различных температурах**

Параметр	$T = 0$ К	$T = 300$ К	$T = 400$ К
Среднее значение $\langle W \rangle$ , эВ	<b>6,00000</b>	<b>6,00020</b>	<b>6,00035</b>
Стандартное отклонение $\sigma$ , эВ	<b>2,61861</b>	<b>2,61888</b>	<b>2,61909</b>
Дисперсия $D$ , эВ <sup>2</sup>	<b>6,85714</b>	<b>6,85854</b>	<b>6,85962</b>
Коэффициент асимметрии $\gamma_1$	<b>-0,339450</b>	<b>-0,339277</b>	<b>-0,338828</b>
Коэффициент эксцесса $\gamma_2$	<b>-0,949494</b>	<b>-0,949221</b>	<b>-0,949149</b>

Результаты вычислений, выполненных при различных температурах, приведены в таблице 1.

Анализируя результаты расчетов, можно сделать два вывода. Во-первых, из таблицы видно, что основные параметры распределения электронов по энергиям, вычисленные в интервале температур от нуля до 400 К, с учетом возможных округлений не различаются первыми тремя значащими цифрами при росте температуры (для наглядности эти цифры выделены жирным шрифтом). Поскольку в ответах большинства задач по физике, как правило, не принято сохранять более двух значащих цифр, то нет необходимости указывать в условии заведомо не существующую температуру, равную абсолютному нулю. Разумеется, студентам необходимо понимать, что  $\langle N \rangle$  не равно тождественно единице при энергиях, меньших энергии Ферми, и не равно нулю при более высоких энергиях, но это отличие столь мало в районе комнатных и несколько выше температур, что им можно пренебречь. Во-вторых, мы убедились, что современные программные средства, имеющие, к тому же, удобный интерфейс, замечательно работают даже с такими, достаточно сложными, функциями, а широкое распространение компьютеров, в том числе планшетных, ноутбуков, смартфонов позволяет включить в сборники задачи, при решении которых требуется вычислить достаточно сложные интегралы.

**Библиографический список**

1. Литневский Л. А., Хмырова Н. А. Физика в системе высшего и среднего образования России // Материалы Международной школы-семинара. М.: АПР, 2015. С. 188–189.
2. Литневский Л. А., Литневский В. Л. Использование вычислительных средств при обработке результатов измерений в лабораторном практикуме по физике // Современные проблемы профессионального образования: опыт и пути решения: материалы 3-й Всерос.

научно-практ. конф. с междунар. участием / Иркутский гос. ун-т, Иркутск, 2018. С. 563–566.

3. Литневский Л. А., Литневский В. Л. Аналогии в курсе общей физики // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы XIV научн. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2020. (Принята к публикации).

УДК 537.611.2

*М.В. Мамонова, Д.С. Калинин*

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

### **ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНСТАНТЫ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЪЕМНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ Fe, Co, Ni**

**Аннотация.** В данной работе при выполнении первопринципных расчетов с применением программного комплекса SPR-KKR вычисляются константы обменного взаимодействия переходных металлов в объеме. Были рассчитаны значения полной энергии и магнитные моменты железа, кобальта и никеля.

**Ключевые слова:** первопринципные расчеты, программный комплекс SPR-KKR, обменный интеграл, магнитные свойства.

В ферромагнитных материалах магнитные моменты атомов направлены параллельно друг другу, если температура меньше критической [1]. В связи с этим в твердом теле образуются области – домены – с большими спонтанными магнитными моментами. Благодаря этому ферромагнитные пленки находят большое применение в микроэлектронике и вычислительных устройствах в роли магнитных носителей в устройствах для хранения и записи информации. Железо, никель и кобальт – типичные примеры ферромагнетиков. Изучение таких металлов дает возможность получить важные данные о магнитных свойствах ферромагнитных материалов, расширить знания во многих областях, связанных с магнетизмом.

Программный комплекс SPR-KKR (Spin polarized Relativistic Korringa Kohn Rostoker band program) [2] дает возможность выполнить неэмпирические расчеты электронной структуры трехмерных периодически упорядоченных систем в рамках теории функционала плотности метода Корринги-Кона-Ростокера в приближении когерентного потенциала.

Было проведено две стадии вычислений. На первой стадии были осуществлены самосогласованные расчеты (SCF – self-consistent field) потенциалов, намагниченности и волновых функций многоэлектронной системы. На второй стадии проводились расчеты функций Грина, которые в последующем были применены для расчета обменных интегралов  $J_{ij}$  объемных ферромагнетиков.

Метод Корринги-Кона-Ростокера (ККР) [3] обладает рядом полезных функций, что позволяет применять его для решения различных задач физики твердого тела. Одна из функций – интерпретация схемы ККР в рамках теории многократного рассеяния при четком разделении задачи на однократное и многократное рассеяние. Вследствие интегрирования полной энергии, метод ККР очень эффективен при проведении вычислений и позволяет

решать задачи с учетом примесей в кристалле без применения дополнительной геометрии, которая связана с формированием суперячейки или конечного кластера.

Данный подход также позволяет рассчитать константы межатомного обменного взаимодействия  $J_{ij}$  внутри кластера, которые можно использовать для последующего моделирования Монте-Карло на основе классической модели гамильтониана Гейзенберга:

$$H = \frac{-1}{2} \sum_{i \neq j} J_{ij} S_i S_j \quad (1)$$

Определить функции Грина всей системы с неизменной энергией – главная суть метода ККР [4]. В рамках ККР метода и теории многократного рассеяния можно вычислить параметры обменного взаимодействия между магнитными моментами, используя формулировку А.Лихтенштейна:

$$J_{ij} = \frac{1}{4\pi} I \int^{E_f} dE \text{Trace}(t_{i\uparrow}^{-1} - t_{i\downarrow}^{-1}) \tau_{\uparrow}^{ij} (t_{j\uparrow}^{-1} - t_{j\downarrow}^{-1}) \tau_{\downarrow}^{ij} \quad (2)$$

В таблице 1 представлены результаты магнитных моментов  $\mu_{spin}$  и  $\mu_{orb}$  в различных приближениях обменно-корреляционного потенциала (PBE, MJW, VWN, VBH) [5, 6].

Таблица 1

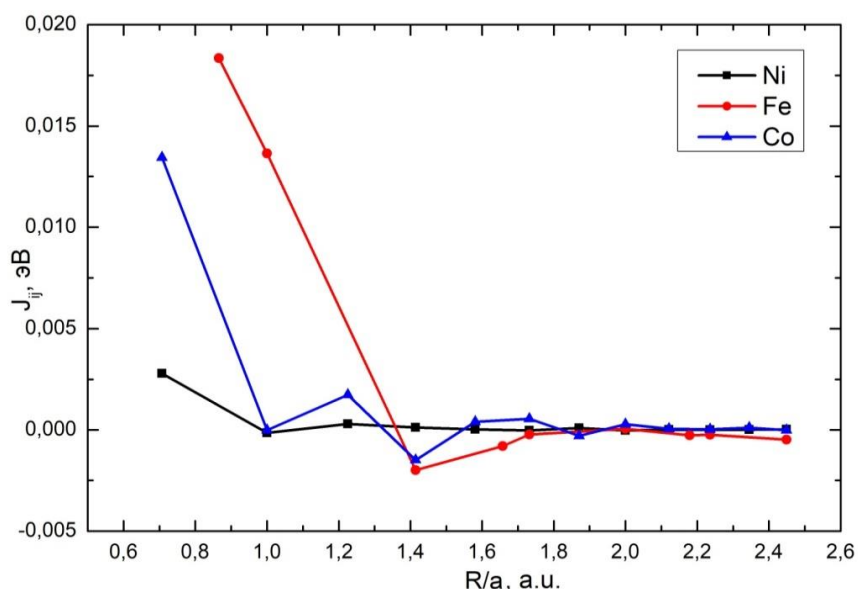
**Результаты расчетов магнитных моментов**

		a, Å	$\mu_{spin}, \mu_B$	$\mu_{orb}, \mu_B$
<b>Co ГЦК</b>	PBE	3,55	1,588	0,071
	MJW	3,45	1,495	0,060
	VWN	3,45	1,493	0,061
	VBH	3,45	1,482	0,060
<b>Co ПК</b>	PBE	2,32	1,969	0,090
	MJW	2,24	1,629	0,076
	VWN	2,24	1,615	0,077
	VBH	2,24	1,548	0,076
<b>Fe ОЦК</b>	PBE	2,88	2,449	0,053
	MJW	2,79	2,178	0,046
	VWN	2,79	2,170	0,046
	VBH	2,78	2,110	0,046
<b>Fe ПК</b>	PBE	2,35	2,553	0,055
	MJW	2,28	2,259	0,046
	VWN	2,27	2,193	0,042
	VBH	2,21	-0,001	0,000
<b>Ni ГЦК</b>	PBE	3,55	0,607	0,051
	MJW	3,46	0,567	0,041
	VWN	3,60	0,605	0,054
	VBH	3,46	0,534	0,039
<b>Ni ПК</b>	PBE	3,86	0,000	0,000
	MJW	3,75	0,000	0,000
	VWN	3,75	0,000	0,000
	VBH	3,74	0,000	0,000

Средние значения обменного интеграла в теории среднего поля  $J_1$  и в теории Гейзенберга  $J_2$ , рассчитанные с использованием программного пакета SPR-KKR, приведены в таблице 2. На рис. 1 изображена зависимость значений обменного интеграла Ni, Fe, Co от расстояния между атомами R/a в приближении PBE.

Результаты расчетов обменных интегралов

Металл	Приближение	Теория среднего поля			Теория Гейзенберга		
		$J_0$ , эВ	$J_0 \cdot 10^{-12}$ эрг	$T_c$ , К	$J_1$ , эВ	$J_1 \cdot 10^{-12}$ эрг	$T_c$ , К
Co ГЦК	PBE	0,193	0,308	1489,3	0,013	0,022	1519,9
Co ПК	PBE	0,219	0,350	1691,0	0,038	0,061	2074,6
Fe ОЦК	PBE	0,191	0,306	1476,4	0,018	0,029	1247,3
	MJW	0,171	0,274	1320,9	0,019	0,031	1085,3
	VWN	0,170	0,272	1314,2	0,019	0,031	1088,6
	VBH	0,163	0,261	1258,4	0,018	0,029	1091,6
Fe ПК	PBE	0,044	0,071	343,3	0,010	0,017	153,1
	MJW	0,015	0,024	114,5	0,012	0,019	164,2
	VWN	0,010	0,016	76,6	0,011	0,018	164,9
	VBH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni ГЦК	PBE	0,047	0,075	363,2	0,003	0,004	355,8
	MJW	0,042	0,067	324,1	0,002	0,004	324,4
	VWN	0,043	0,069	331,7	0,002	0,004	323,4
	VBH	0,036	0,058	279,1	0,002	0,003	284,2
Ni ПК	PBE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	MJW	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	VWN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	VBH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Рис. 1. Зависимость значений обменных интегралов  $J_{ij}$  от расстояния  $R/a$ 

Из полученных расчетов можно сделать следующие выводы. Для всех металлов обменное взаимодействие носит ферромагнитный характер. Значения констант обменного взаимодействия у Co, Fe, Ni в теории Гейзенберга меньше, чем в теории среднего поля. В простой кубической решетке (ПК) Ni является немагнитным. Как видно из таблицы 1, у материалов меняется постоянная кристаллической решетки в различных приближениях обменно-корреляционного взаимодействия, но не более 4%. Из рис. 1 следует, что постоянные

обменного взаимодействия  $J_{ij}$  практически не меняются с увеличением расстояния  $R/a$ . В теории среднего поля наибольшее значение  $J_{ij}$  у Fe, наименьшее – у Ni. В теории Гейзенберга наибольшее значение  $J_{ij}$  у Fe, а у Co и Ni существенно не отличаются.

Данные расчеты были проведены в вычислительной лаборатории кафедры теоретической физики Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского.

### Библиографический список

1. Прудников В. В., Прудников П. В., Мамонова М. В. Теоретические методы расчета структурных, энергетических и магнитных характеристик систем с межфазным взаимодействием: моногр. Омск: Изд-во Ом. гос. ун-та, 2017. 190 с.
2. Матюнина М. В., Загребин М. А., Соколовский В. В., Бучельников В. Д. Исследование свойств сплавов Fe-Ga из ab initio вычислений // Челяб. физ.-мат. журн. 2017. Т. 2. вып. 2. С. 2319–240.
3. Ebert H., Bornemann S., Mina J. [et al.] Magnetic properties of Co- and FePt-clusters // Computational Materials Science. 2006. Vol. 35. P. 279–282.
4. Ebert H., Kodderitzsch D., Minar J. Calculating condensed matter properties using the KKR-Green's function method – recent developments and applications // Rep. Prog. Phys. 2011. Vol. 74. P. 096501.
5. MacLaren J. M. Parameterised local spin density exchange-correlation energies and potentials for electronic structure calculations I. Zero temperature formalism // Computer Physics Communications. 1997. Vol. 66. P. 3839–391.
6. U. von Barth, A local exchange-correlation potential for the spin polarized case // J. Phys. C. Solid State Phys. 1972. Vol. 5. P. 16299–1642.

УДК 538.975

*И.С. Позыгун, Г.М. Серопян, С.А. Сычев*

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

### ЛАЗЕРНАЯ ЛИТОГРАФИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

**Аннотация.** Целью данной работы является исследование взаимодействия лазерного излучения с тонкой пленкой YBCO, а также исследование влияния интенсивности излучения на процесс травления тонкой пленки YBCO для создания тонкопленочных микроструктур методом лазерной литографии. Источником излучения служил твердотельный лазер Nd:YAG с длиной волны 532 нм.

**Ключевые слова:** лазерная литография, лазерное излучение, тонкая пленка, порог лазерной абляции.

В настоящее время актуальны исследования формирования тонкопленочных сверхпроводящих микроструктур различными методами, в частности, с применением метода лазерной литографии. Получаемые микроструктуры представляют практический интерес при создании элементов сверхпроводниковой электроники [1, 2].

Лазерная литография представляет собой процесс удаления отдельных участков уже сформированной пленки под действием лазерного излучения. Основным преимуществом данного метода является отсутствие какой-либо химической обработки поверхности пленки



после экспонирования – материал удаляется непосредственно под действием излучения, что позволяет уменьшить число шагов в литографическом процессе [3].

Проведенные ранее эксперименты с инфракрасным лазерным излучением показали, что взаимодействие YBCO пленок толщиной более 50 нм с инфракрасным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм позволяет изготавливать микроструктуры из данных пленок. Однако при толщине менее 40 нм пленки становятся прозрачными для инфракрасного лазерного излучения, что не позволяет создавать микроструктуры на основе ультратонких пленок. Порог лазерной абляции для YBCO пленок толщиной 100 нм достигается при значении плотности мощности инфракрасного излучения  $9 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> и уменьшается при увеличении толщины пленки из-за возрастания коэффициента поглощения. Значение плотности мощности  $2 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> является верхним допустимым пределом, при котором происходит абляция YBCO пленок, но при этом интенсивность излучения недостаточно велика для того, чтобы привести к механическим повреждениям поверхности подложки.

Также были проведены исследования по воздействию ультрафиолетового лазерного излучения с длиной волны 337 нм на YBCO пленки толщиной 40–100 нм. Для пленок толщиной 100 нм был найден порог лазерной абляции, который составил  $6 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Важно заметить, что пленки толщиной менее 50 нм после облучения обладают более четкой границей травления, на поверхности подложки отсутствуют дефекты и продукты испарения.

В данной работе исследовалось взаимодействие лазерного излучения с пленками YBCO толщиной 30–200 нм. Источником излучения служил лазер Nd: YAG со следующими характеристиками: длина волны излучения  $\lambda = 532$  нм, длительность импульса  $\tau = 12$  нс, энергия в импульсе до 60 мДж. Лазерная установка и схема эксперимента приведены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Экспериментальная установка для лазерной литографии

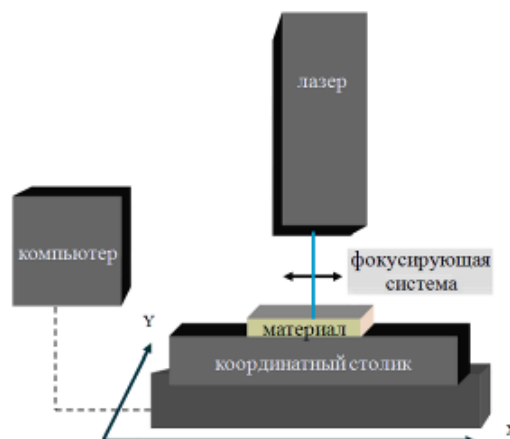


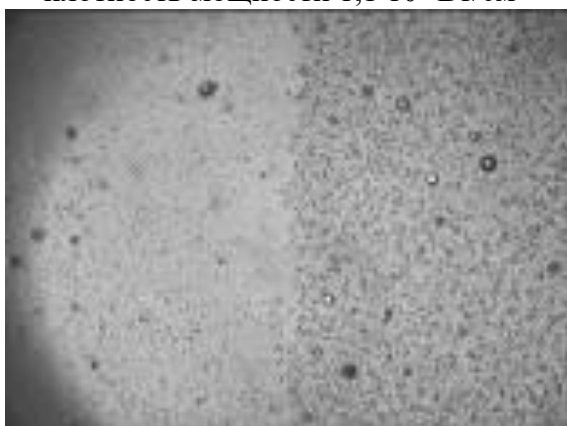
Рис. 2. Схема эксперимента для облучения тонких пленок

Экспериментально обнаруженный порог лазерной абляции для пленок в широком диапазоне толщин от 30 до 200 нм оказался равным  $7,1 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. Это указывает на то, что в указанном диапазоне толщин YBCO пленка имеет достаточно высокий коэффициент поглощения зеленого излучения, следовательно, данное излучение можно применять для формирования микроструктур из YBCO пленок в широком диапазоне толщин.

На рис. 3 и 4 представлены микрофотографии YBCO пленок толщиной 50 и 200 нм, облученных зеленым лазерным излучением различной плотности мощности. Как видим, качественная граница на пленках формируется при плотности мощности выше  $8,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.



(а) – импульсная энергия 80 мДж,  
плотность мощности  $1,1 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>

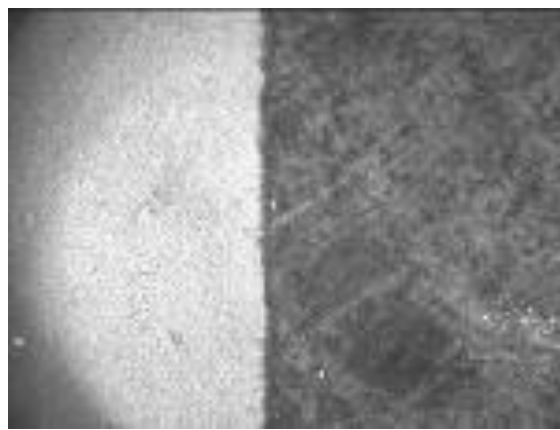


(б) – импульсная энергия 60 мДж,  
плотность мощности  $8,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>

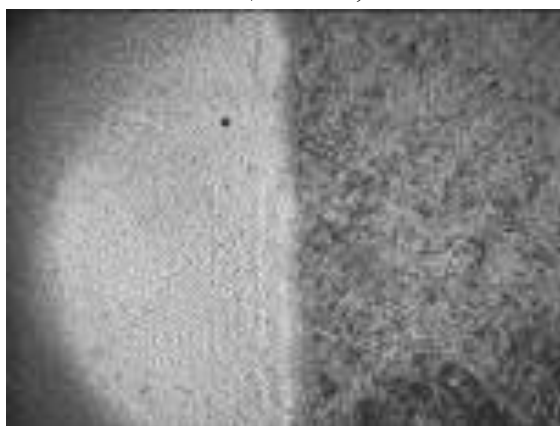


(в) – импульсная энергия 40 мДж,  
плотность мощности  $5,7 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>

Рис. 3. Микрофотографии YBCO пленок толщиной 50 нм, облученных лазерным излучением с длиной волны 532 нм



(а) – импульсная энергия 100 мДж,  
плотность мощности  $1,4 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>



(б) – импульсная энергия 60 мДж,  
плотность мощности  $8,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>



(в) – импульсная энергия 40 мДж,  
плотность мощности  $5,7 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>

Рис. 4. Микрофотографии YBCO пленок толщиной 200 нм, облученных лазерным излучением с длиной волны 532 нм

Для примера, на рис. 5 представлено АСМ изображение границы облученной YBCO пленки при импульсной энергии 100 мДж и плотности мощности  $1,4 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Наблюдается достаточно резкая граница лазерного травления.

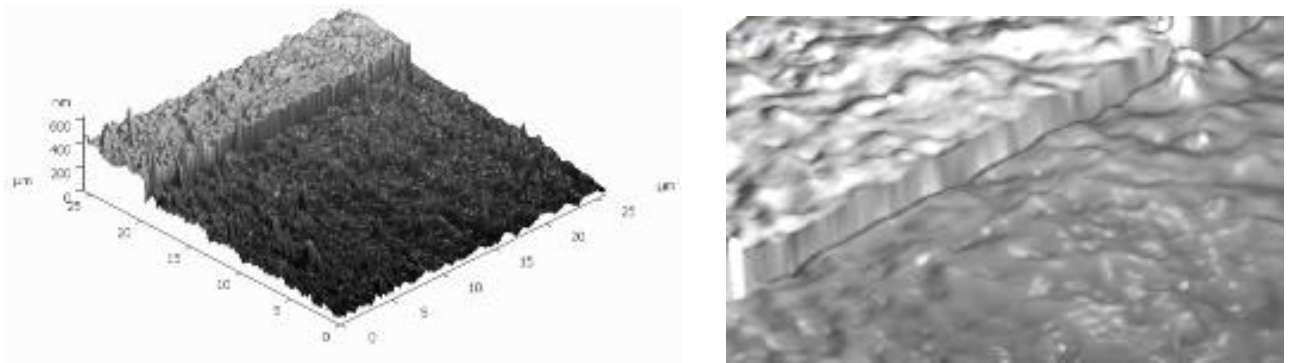


Рис. 5. АСМ изображение границы облученной YBCO пленки

На рис. 6. представлен лазерный рез шириной 10 мкм, а на рис. 7 показан сверхпроводящий микромостик шириной 4 мкм, полученные методом лазерной литографии с длиной волны излучения 532 нм, импульсной энергией 10 мДж, частотой 50 Гц, плотностью мощности излучения  $1,7 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

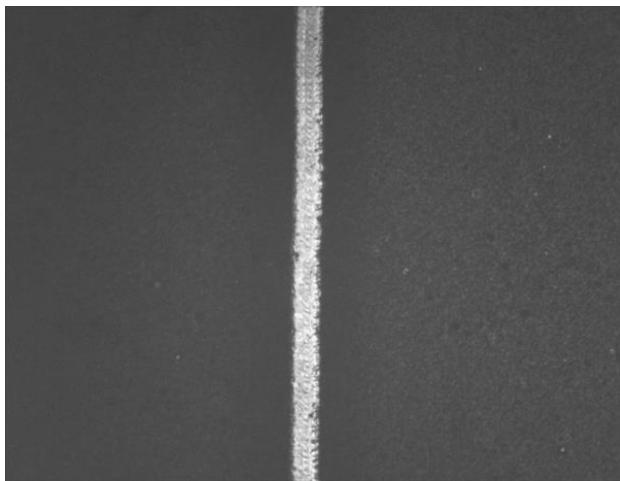


Рис. 6. Лазерный рез на YBCO пленке шириной 10 мкм

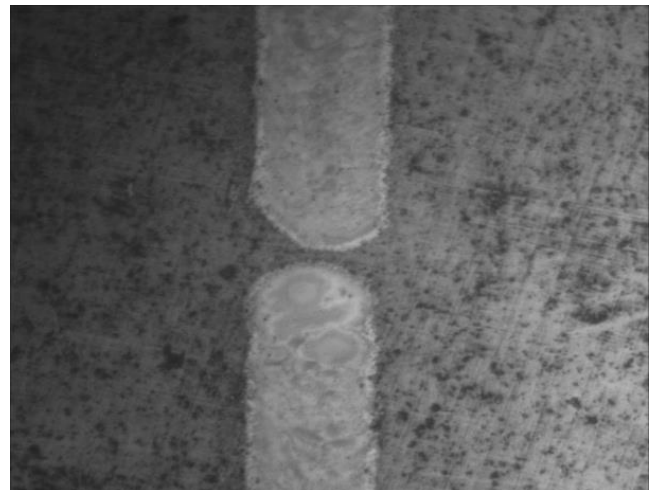


Рис. 7. Сверхпроводящий микромостик шириной 4 мкм, полученный методом лазерной литографии

### Библиографический список

1. Захаров А. В., Муравьев А. Б., Позыгун И. С. [и др.] Сверхпроводящие тонкие пленки иттрий-бариевого купрата, выращенные на напряженных подложках // Вестник НГУ. Физика. 2008. Т. 3. Вып. 4. С. 25–32.
2. Yugay K. N., Muravjev A. B., Nuh Y. [et al.] SQUIDs on the Base of Strained YBCO Films // Journal of Superconductivity. 2004. Vol. 17(6). P. 755–760.
3. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение. 1989. 304 с.

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ФИЗИКА» НА ОСНОВЕ ЧАТ-БОТА



**Аннотация.** Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью усовершенствования метода самостоятельного изучения дисциплины «Физика». Основной целью работы является разработка комфортной пользовательской системы для качественного получения образовательной информации. Данная система работает в формате чат-бота, предоставляющего необходимую теоретическую информацию, а также помощь в решении практических задач. В данной работе представлены возможности виртуальных помощников в современных мессенджерах, их принцип работы и основные направления в изучении физики.

**Ключевые слова:** Чат-бот, физика, python, интернет, «ВКонтакте», самообразование.

На сегодняшний день современный человек не может обойтись без интернета, интернетом пользуется больше 50% населения нашей планеты. В различных интернет-ресурсах огромное количество информации, и каждый студент или школьник может найти весь необходимый материал за короткое время. Всемирная паутина разрастается, с каждым годом пользователям открывается все больше новых возможностей. В мессенджерах обретают популярность так называемые виртуальные помощники. Это программы, имитирующие деятельность человека. Виртуальные консультанты помогают автоматизировать различные задачи, работая по заданному алгоритму, соответственно, имитируя собеседника в чате. Ошибочно полагать, что чат-боты – инновация 21 века, ведь первые эксперименты по их созданию начались полвека назад. Если тогда условные помощники выполняли такие незамысловатые функции как сбор анекдотов, калькулятор, функции переводчика или запросы прогноза погоды, то сегодня они способны и повсеместно заменяют собой службы поддержки всевозможных сервисов. Заказать авиа- или ЖД билеты, вызвать такси, произвести платеж или перевод, построить удобный маршрут, скачать фильм или музыку – малое, что могут виртуальные собеседники. Работать с ними просто, необходимо добавить его в список собеседников и начать переписку. Чаще всего в ответ собеседник вам пришлет информацию о себе, список доступных команд или представит на экране кнопки, которые превратят окно диалога в понятное мини-приложение.

При изучении различных дисциплин учащемуся необходимо знать теоретический материал, а также уметь применять данную теорию на практике. Для помощи студенту и школьнику предлагается автоматизированная система поддержки изучения дисциплины на основе чат-бота социальной сети «ВКонтакте» [1]. Данная система позволит пользователю быстро находить необходимые материалы благодаря интуитивно понятному интерфейсу в виде чата (рис.1).

Точкой входа в систему является команда «начать», при написании которой пользователю предлагается меню из возможных разделов физики, таких как: механика, динамика, молекулярная физика, электричество, колебания и волны, оптика, теория относительности и квантовая физика [2]. Для выбора любого из разделов достаточно сделать клик мышкой по необходимой кнопке. При выборе любого из разделов появляется выбор работы с теорией и практикой в соответствующем разделе. При работе с теоретической частью предлагается определенный набор тем по физике, любую из которых пользователь может выбрать для изучения [3]. Далее ему будет доступен теоретический материал (рис.2).

-  **Дмитрий** 13:59  
начать
-  **Физика Бот** 13:59  
Выберите раздел

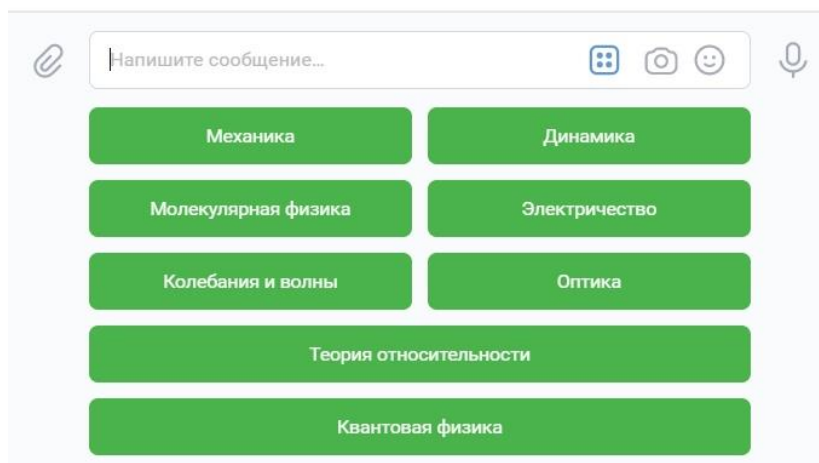




Рис. 1. Главный пользовательский интерфейс

-  **Дмитрий** 14:16  
Молекулярная Физика Теория
-  **Физика Бот** 14:16  
Выберите тему

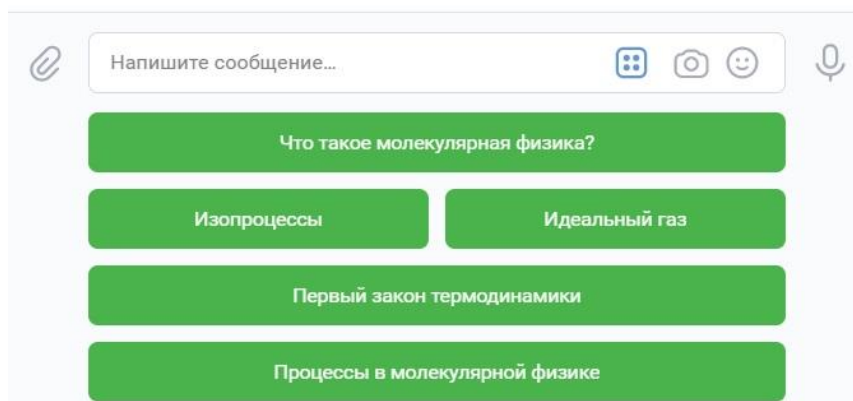


Рис. 2. Пользовательский интерфейс раздела «Молекулярная физика»

При работе с практической частью пользователь имеет возможность также выбирать темы для дальнейшей работы. При выборе необходимого раздела и темы, пользователю доступен функционал расчета основных физических величин и формул. Общая схема работы всей системы поддержки изучения дисциплины «Физика» представлена на рис. 3.

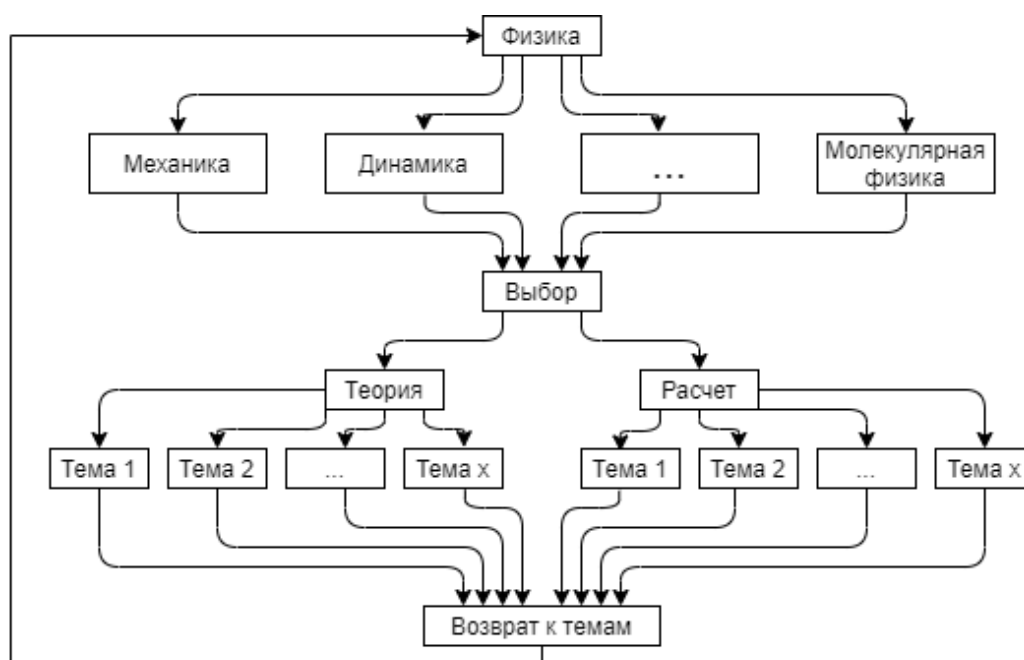


Рис. 3. Принцип работы виртуального собеседника

Данный чат-бот создан как сообщество в социальной сети «ВКонтакте». Система поддержки изучения дисциплины «Физика» написана на языке «Python 3» с применением специализированной библиотеки «VkApi» [4, 5]. Данный язык является современным и удобным для написания различных скриптов и сервисов [6]. Благодаря API-ключу программа получает доступ к сообществу, а именно: к сообщениям, фотографиям, видеозаписям и прочим элементам сообщества, которые могут быть применены в изучении дисциплины. Чат-бот начинает работать при получении нового «события», то есть, когда сообществу приходит новое сообщение, программа проверяет аналогичность этого сообщения заранее заданным параметрам. Если параметры совпадают, чат-бот отвечает пользователю необходимой информацией.

Спроектированная система позволяет быстро получать необходимую информацию, удобна в использовании, так как работает в формате диалога с пользователем, а также является легко масштабируемой. Работа с данной системой возможна с любого устройства: смартфон, планшет, компьютер. Дальнейшее развитие подобных систем позволит качественно повысить уровень знаний и возможностей изучения различных дисциплин.

### Библиографический список

1. Пишем чат бота для ВКонтакте на python с помощью longpoll: сайт. URL: <https://habr.com/ru/post/428507/> (дата обращения: 01.04.2020).
2. Данилов С. В. Классическая и релятивистская механика: конспект лекций. Омск: ОмГТУ, 2014. 60 с.
3. Дмитриева В. Ф., Прокофьев В. Л. Основы физики: учебное пособие для студентов вузов. – 2-е изд. М.: Высш. шк., 2001. 527 с.
4. Лутц М. Изучаем Python, 4-е издание.: пер. с англ. СПб.: Символ-Плюс, 2011. 1280 с.
5. Лутц М. Программирование на Python, том I, 4-е изд.: пер. с англ. СПб.: Символ-Плюс, 2011. 992 с.
6. Любанович Б. Простой Python. Современный стиль программирования. СПб.: Питер, 2016. 480 с.

*И.А. Шныптев<sup>1</sup>, Г.И. Косенко<sup>2</sup>, О.М. Сухарева<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), Омск, Россия

<sup>3</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕМАТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КРОВИ

**Аннотация.** Рассмотрен один из способов проведения гематологического анализа крови. Показано, что используемый метод зависит от чистоты апертуры и при ее загрязнении дает некорректный результат. Отмечено возможное улучшение метода.

**Ключевые слова:** гематологический анализ, метод Культера.

Анализ крови является важным фактором при постановке диагноза в процессе лечения. Новый уровень в развитии гематологии связан с повышением скорости проведения анализа, автоматизацией процесса и повышением точности. В составе крови эритроциты занимают примерно половину объема. Можно отметить, что количество научных работ и статей по биомеханике эритроцита человека за последние десятилетия значительно превышает по количеству работы с другими клетками [1]. Эритроцит морфологически устроен относительно просто. Нормальные популяции клеток имеют схожую форму и узкое распределение по концентрации гемоглобина. Относительно высокая однородность эритроцитов по многим параметрам облегчает регистрацию любых изменений в клетке. Поэтому даже простые эмпирические методы исследования популяции красных кровяных телец оказываются достаточно информативными.

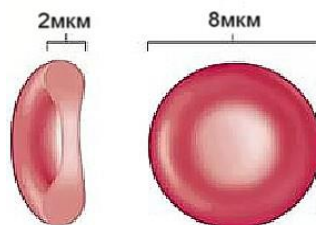


Рис. 1. Внешний вид эритроцита

Существуют различные способы измерения количества эритроцитов и их размеров. Например, было предложено новое направление в проточной цитометрии – сканирующая проточная цитометрия – обеспечивающее уникальные возможности для измерения светорассеяния от одиночных частиц и, как следствие, для морфологического анализа клеток [2]. Но наиболее распространенный сейчас метод анализа эритроцитов – метод электрического импеданса, иначе кондуктометрический или также называемый по имени его создателя метод Культера (Coulter). Этот метод используется в гематологических анализаторах второго поколения и практически составляет более 70% от всех эксплуатируемых на данный момент гематологических анализаторов в России.

Рассмотрим физическую основу работы второго метода. Берется проба крови, разводится до определенной пропорции, затем полученный состав помещается в некоторый объем, соединенный через апертуру с другим таким же объемом. С двух сторон апертуры установлены электроды. При прохождении через апертуру эритроцитов проводимость изменяется, и по изменению тока фиксируют прохождение эритроцита. К сожалению, в процессе эксплуатации апертура может загрязняться. На ее стенки могут налипать различные липиды, оседать соли и т. д. Все это может приводить к искажению полученных результатов.

Для проведения модельных расчетов зададимся выражением для формы эритроцита. Например, в [3] приведено следующее выражение для описания формы эритроцита:

$$T^2(x) = (0,86)^2(1 - x^2)(0,01384083 + 0,2842917x^2 + 0,01306932x^4).$$

Здесь  $T$  – толщина эритроцита,  $x = r/R_0$ ,  $R_0$  – радиус эритроцита,  $r$  – текущее расстояние от края до центра. Основной недостаток этого выражения то, что оно справедливо только для одного заданного диаметра (6,5 мкм). Поэтому гораздо удобнее для расчетов выражение из [4]:

$$T(x) = \varepsilon \cdot d \cdot (1 - x^2)^{1/2}(0,1583 + 1,5262x^2 - 0,8579x^4).$$

Оно похоже на предыдущее, но имеет масштабирующий параметр  $\varepsilon = T_{max}/d$  – отношение наибольшей толщины к диаметру;  $x$  определено, как и раньше. Таким образом, мы можем варьировать диаметр эритроцита в широких пределах. Ориентируясь на рис. 1, будем полагать это отношение один к четырем.

Для определенности полагаем, что длина апертуры 1500 мкм, диаметр 50 мкм. Будем полагать, что через апертуру не могут проходить несколько эритроцитов одновременно. Кроме того, как показано в [2], за счет гидрофокусировки эритроциты ориентируются диаметром вдоль апертуры. Поэтому сопротивление апертуры с эритроцитом внутри можно записать в простом виде.

$$R = \rho \left( \frac{l_a - d_э}{S_a} + \frac{d_э}{S_a - S_э} \right).$$

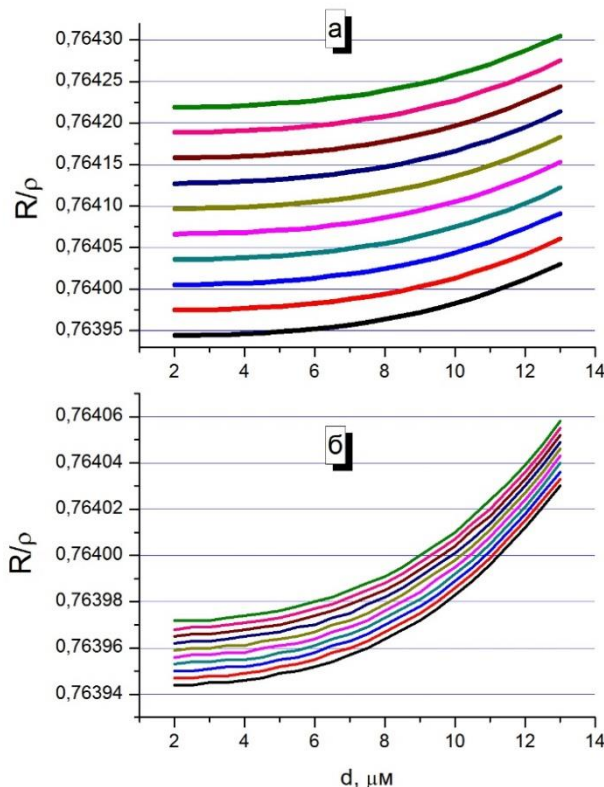


Рис. 2. Зависимость отношения сопротивления к удельному сопротивлению раствора (в мкм<sup>-1</sup>) от диаметра эритроцита

Здесь  $l_a$  – длина апертуры,  $S_a$  – сечение апертуры,  $d_э$  – диаметр эритроцита,  $S_э$  – эффективное сечение эритроцита (определялось как отношение объема эритроцита к его диаметру),  $\rho$  – удельное сопротивление раствора.

На рис. 2 нижняя кривая соответствует чистой апертуре. На панели а) уменьшение диаметра апертуры составляет 0,001 мкм для каждой следующей кривой. На панели б) уменьшение диаметра составляет 0,0001 мкм. Влияние загрязнения на величину  $R/\rho$  очень незначительное. На верхней панели это четвертый знак после запятой, на нижней – пятый. Но основная проблема состоит в том, что с увеличением диаметра эритроцита отношение  $R/\rho$  увеличивается. Это приводит к тому, что одно и то же отношение (горизонтальные линии) отвечает разным диаметрам эритроцита. Например, на нижней панели, одно и то же отношение дают диаметры от 2 до 13 мкм, т.е. весь рассматриваемый диапазон. При больших загрязнениях ситуация «улучшается». Одно и то же отношение дают два-три разных диаметра



эритроцитов. Все это приводит к необходимости остановки измерений и промывки апертуры. Как показывает эксперимент, это не зависит от типа используемого аппарата (рис. 3).

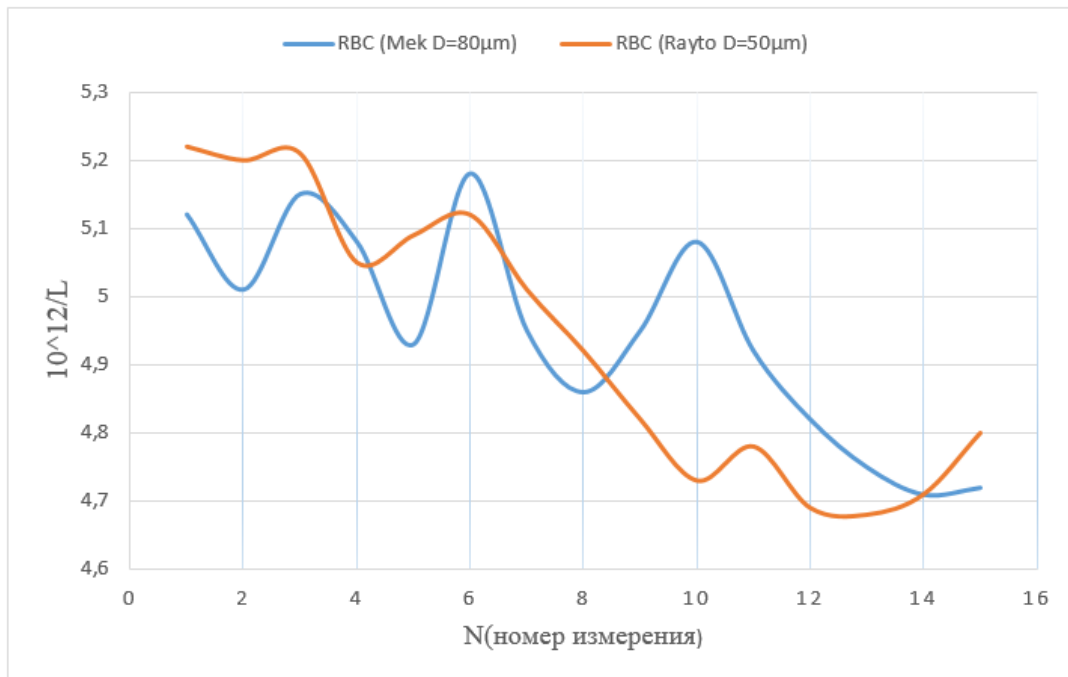


Рис. 3. Зависимость количества эритроцитов от числа измерений на аппаратах МЕК-6410К (синяя линия) и RT7600 (оранжевая линия)

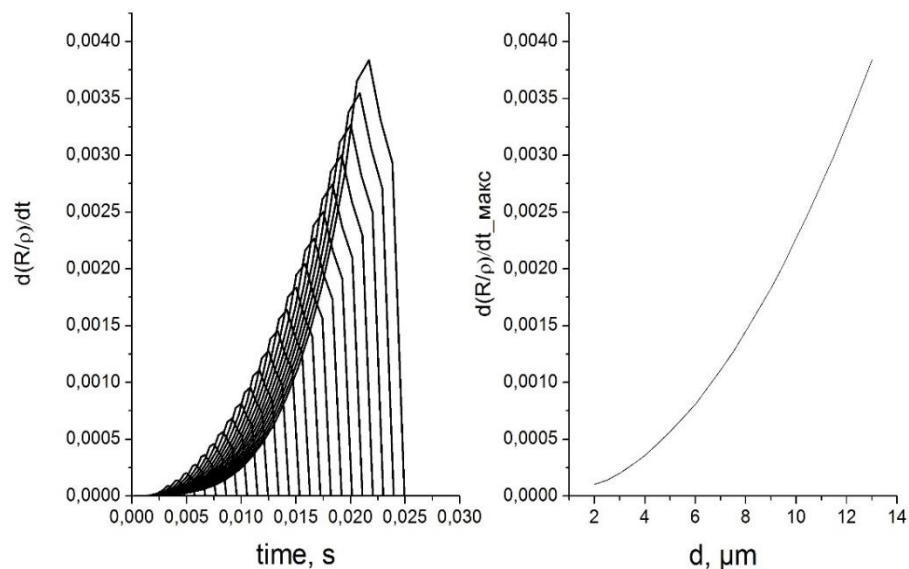


Рис. 4. Левая панель: зависимость скорости изменения отношения  $R/\rho$  от времени. Правая панель: зависимость максимальной скорости изменения  $R/\rho$  от диаметра эритроцита

Как представляется, гораздо более информативным будет измерение скорости нарастания отношения  $R/\rho$  в момент входа эритроцита в апертуру. Эту величину можно записать как

$$\frac{d(R/\rho)}{dt} = \frac{S_3 \frac{dx_3}{dt}}{S_a(S_a - S_3)} + \frac{x_3 \frac{dS_3}{dt}}{(S_a - S_3)^2},$$

где  $S_a$  – сечение апертуры,  $S_3$  – сечение эритроцита (той его части, которая уже вошла в апертуру),  $x_3$  – длина части диаметра эритроцита, вошедшей в апертуру. Эта величина существенно зависит от скорости прокачки раствора через апертуру  $dx_3/dt$ . Мы будем полагать, что она равна 300 мкм/с. Расчет мы провели для диаметров эритроцитов от 2 до 13 мкм, с шагом 0,5 мкм в том же диапазоне загрязнений, что и для первой серии расчетов. Полученный результат показан на рис. 4.

Как видно из рис. 4, для каждого диаметра эритроцита кривая имеет свою продолжительность по времени, кроме этого, достигает разных максимумов. Влияние загрязнения в этом случае не превосходит толщины линии. Зависимость параметра кривых  $[d(R/\rho)/dt]_{\text{макс}}$  от диаметра эритроцита показана на правой панели. Она может быть легко параметризована

$$\left[ \frac{d(R/\rho)}{dt} \right]_{\text{макс}} = 10^{-5}(1,27 - 0,466d + 2,30d^2).$$

Таким образом, мы рассмотрели один из методов гематологического анализа крови. Как следует из проведенных расчетов, используемый метод существенным образом зависит от чистоты используемой аппаратуры, что в условиях реальной лаборатории выполняется не всегда в силу различных причин. Показано, что если несколько изменить методику измерений, то удастся существенно уменьшить роль загрязнения апертуры на конечный результат и улучшить определение диаметра эритроцитов.

### Библиографический список

1. Fung Y. C. Biomechanics: mechanical properties of living tissues. 2nd ed. Springer-Verlag, 1993. 568 p.
2. Тарасов П. А. Определение характеристических параметров эритроцитов методами динамической проточной цитометрии: дис. ... к-та ф.-м. наук, Новосибирск, 2005, 110 с.
3. Skalak R., Tozeren A., Zarda R. P., Chien S. Strain Energy Function of Red Cell Membranes. // Biophysical Journal. 1973. Vol. 13. P. 245–264.
4. Fung Y. C., Tsang W. C., Patitucci P. High-resolution data on the geometry of red blood cells. // Biorheology. 1981. Vol. 18. P. 369–385.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция 1 МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

1. *Р.О. Дзивульский, Т.А. Чуранкина, В.Г. Чуранкин, А.М. Ласица*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЕ ИЗ ТВЕРДОГО СПЛАВА  
ПРИ ОБРАБОТКЕ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ .....3
2. *А.А. Зайцев*  
Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь  
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ  
ПОКРЫТИЙ.....7
3. *А.О. Лептюк<sup>1</sup>, А.Д. Гусакова<sup>1</sup>, А.А. Горячкина<sup>1</sup>, А.С. Васянович<sup>1</sup>, Е.А. Рогачев<sup>1</sup>,  
Н.А. Погорелова<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия  
СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗЦОВ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ,  
ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ .....11
4. *А. К. Насырова*  
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия  
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА И МИКРОТВЕРДОСТИ  
ТЕРМОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ 7YSZ, ПОЛУЧЕННЫХ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННЫМ  
ОСАЖДЕНИЕМ .....15
5. *А.С. Ракитина, С.К. Христофоров, Л.П. Шонина, Е.А. Рогачев*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО-  
ЛЕГИРОВАННОМ МЕТАЛЛЕ, ПОДВЕРЖЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИЮ АГРЕССИВНОЙ  
СРЕДЫ .....18
6. *Е.А. Рогачев, А.С. Мазурова, Д.К. Сарсембаева, К.В. Олейник, А.Е. Постнов*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННОСТИ СТАЛИ МЕТОДОМ СЗМ .....23
7. *А.П. Солоненко<sup>1,2</sup>, А.И. Блесман<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Омский государственный медицинский университет, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
СРАВНИТЕЛЬНОЕ ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БИОАКТИВНОСТИ  
СИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ РАЗЛИЧНОЙ СТЕХИОМЕТРИИ .....26
8. *В.И. Степаненко, П.М. Корусенко, С.Н. Несов*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО  
ИМПУЛЬСНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ.....31

9. *И.А. Цыбульников, А.А. Рахно, Е.А. Рогачев*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОСЯНОГО  
ПОКРОВА ЧЕЛОВЕКА, ПОДВЕРГНУТЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ НИЗКИХ  
ТЕМПЕРАТУР.....36

10. *А.Е. Шевченко<sup>1</sup>, А.П. Солоненко<sup>1,2</sup>, А.И. Блесман<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский государственный медицинский университет, г. Омск, Россия  
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГРАНУЛ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИАПАТИТА И  
ВОЛЛАСТОНИТА .....39

## Секция 2 **ФИЗИКА**

1. *С.В. Белим*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ИССЛЕДОВАНИЕ ОБМЕННОГО ПОДМАГНИЧИВАНИЯ МЕТОДОМ  
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....43

2. *Е.Г. Глухова, С.В. Бирюков*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ  
ЭФФЕКТАХ И ЯВЛЕНИЯХ .....47

3. *И.И. Гончар<sup>1</sup>, М.В. Чушнякова<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
COVID-19 И ДИСТАНЦИОННОЕ ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ В ТЕХНИЧЕСКОМ  
ВУЗЕ.....51

4. *И.Е. Дёмин*  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, г. Омск, Россия  
ПОЛУЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ГАЗОВ  
ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ ОТКЛИКА НА ПРИМЕРЕ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТОНКИХ ПЛЁНОК  $50\%In_2O_3-50\%Ga_2O_3$  .....55

5. *О.А. Ивченко<sup>1</sup>, А.А. Бабарико<sup>2</sup>, Н.А. Хмырова<sup>3</sup>, А.А. Козлов<sup>1</sup>, Р.Э. Мирзоджонов<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup>Омский автобронетанковый инженерный институт, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия  
<sup>3</sup>Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия  
ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ .....59

6. *А.М. Костащук, А.Н. Вакилов*  
Омский государственный университет им.Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия  
ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕНОРМАЛИЗАЦИОННОЙ КОНСТАНТЫ СВЯЗИ ТРЕХМЕРНОЙ  
МОДЕЛИ ИЗИНГА .....62

7. *Н.С. Кучинская, Л.А. Литневский*  
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия  
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРМИ-ДИРАКА» ПРИ ОТЛИЧНЫХ ОТ НУЛЯ ТЕМПЕРАТУРАХ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ.....65
8. *М.В. Мамонова, Д.С. Калинин*  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия  
ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНСТАНТЫ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЪЕМНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ Fe, Co, Ni .....69
9. *И.С. Позыгун, Г.М. Серолян, С.А. Сычев*  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия  
ЛАЗЕРНАЯ ЛИТОГРАФИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР .....72
- <sup>10.</sup> *Д.А. Сутер, А.А. Кабанов*  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ФИЗИКА» НА ОСНОВЕ ЧАТ-БОТА .....76
- <sup>11.</sup> *И.А. Шныптев<sup>1</sup>, Г.И. Косенко<sup>2</sup>, О.М. Сухарева<sup>3</sup>*  
<sup>1</sup>Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия  
<sup>2</sup>Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), Омск, Россия  
<sup>3</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕМАТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КРОВИ .....79