

*Проект SWorld*



---

*Львович И.Я., Червоный И.Ф., Осадчук А.В. и др.*

---

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ  
СОВРЕМЕННЫХ УЧЕНЫХ  
ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ**

---

ВХОДИТ В РИНЦ SCIENCE INDEX

присвоен DOI: 10.21893/978-617-7414-13-0.0

***МОНОГРАФИЯ***

Одесса  
*Куприенко СВ*  
2017

УДК 001.895

ББК 94

П 26

*Авторский коллектив:*

Никифоров А.А. (1), Львович И.Я. (2), Преображенский А.П. (2),  
Чопоров О.Н. (2), Бредихин В.Н. (3), Кушнеров В.Ю. (3), Червоный И.Ф. (3),  
Шевелев А.И. (3), Евсева М.В. (4), Крылик Л.В. (4), Осадчук А.В. (4), Осадчук В.С. (4),  
Флоренсов А.Н. (5), Бойко П.М. (6), Кочеткова О.В. (7), Поликарпова Е.А. (7),  
Alatoon Mohammad Fayiz Ahmad (8), Карабиньош С.С. (8), Демко О.А. (9),  
Карабиньош С.С. (9), Толбатов А.В. (10), Толбатов В.А. (10), Толбатов С.В. (10),  
В'юненко О.Б. (10), Толбатова О.О. (10), Гафияк А.М. (11), Купчак Д.В. (12),  
Любимова О.И. (12), Бывальцев С.В. (13)

*Рецензенты:*

*Кострова В.Н.*, проректор по мониторингу качества Воронежского института высоких технологий, доктор технических наук, профессор (2)

*Корицкий Г.Г.*, кандидат технических наук, доцент, Донецкий национальный технический университет (3)

*Петрук В. Г.*, доктор технических наук, профессор, ВНТУ (4)

П 26 **Перспективные** достижения современных ученых: техника и технологии. : монография / [авт.кол. : Львович И.Я., Червоный И.Ф., Осадчук А.В. и др.]. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2017 – 219 с. : ил., табл.  
ISBN 978-617-7414-13-0

Монография содержит научные исследования авторов в области техники и технологий. Может быть полезна для инженеров, руководителей и других работников предприятий и организаций, а также преподавателей, соискателей, аспирантов, магистрантов и студентов высших учебных заведений.

**УДК 001.895**

**ББК 94**

**DOI: 10.21893/978-617-7414-13-0**

© Коллектив авторов, 2017

© Куприенко С.В., оформление, 2017

ISBN 978-617-7414-13-0



## **Монография подготовлена авторским коллективом:**

1. *Никифоров А.А.*, Международный Научно-Учебный Центр, соискатель - Глава 1
2. *Львович Игорь Яковлевич*, Воронежский институт высоких технологий, доктор технических наук, профессор - Глава 2
3. *Преображенский Андрей Петрович*, Воронежский институт высоких технологий, доктор технических наук, доцент - Глава 2
4. *Чопоров Олег Николаевич*, Волгоградский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор - Глава 2
5. *Бредихин Виктор Николаевич*, Донецкий национальный технический университет, кандидат технических наук, профессор - Глава 3
6. *Кушнеров Вмктор Юрьевич*, Донецкий национальный технический университет, аспирант - Глава 3
7. *Червоный Иван Федорович*, доктор технических наук, профессор - Глава 3
8. *Шевелев Александр Иванович*, Директор ООО "Аякс", доктор технических наук - Глава 3
9. *Евсеева Мария Васильевна*, ВНТУ, кафедра химии и химической технологии, кандидат химических наук, доцент - Глава 4
10. *Крылик Людмила Викторовна*, ВНТУ, кафедра электроники и наносистем, кандидат технических наук, доцент - Глава 4
11. *Осадчук Александр Владимирович*, ВНТУ, заведующий кафедры радиотехники, доктор технических наук, профессор - Глава 4
12. *Осадчук Владимир Степанович*, Винницкий национальный технический университет, заслуженный деятель науки и техники Украины, доктор технических наук, профессор - Глава 4
13. *Флоренсов Александр Николаевич*, Омский государственный технический университет, Кафедра Информатика и вычислительная техника, кандидат технических наук, доцент - Глава 5
14. *Бойко Петро Миколайович*, Национальный университет харчових технологій, Біотехнології продуктів бродіння і виноробства, кандидат юридических наук, доцент - Глава 6
15. *Кочеткова Ольга Владимировна*, Волгоградский государственный аграрный университет, доктор технических наук, профессор - Глава 7
16. *Поликарпова Елена Андреевна*, - Глава 7
17. *Alatoom Mohamad Fayiz Ahmad*, кандидат технических наук - Глава 8
18. *Карабиньош Сергей Степанович*, кандидат технических наук, доцент - Глава 8
19. *Демко Александр Анатолійович* - Глава 9
20. *Карабиньош Сергей Степанович*, кандидат технических наук, доцент - Глава 9
21. *Толбатов Андрій Володимирович*, Сумський національний аграрний університет, кафедра Кібернетики та інформатики, кандидат технических наук, доцент - Глава 10
22. *Толбатов Володимир Аронович*, Сумський державний університет, кафедра Комп'ютерних наук, кандидат технических наук, доцент - Глава 10
23. *Толбатов Сергій Володимирович*, кандидат технических наук - Глава 10
24. *В'юнєнко Олександр Борисович*, Сумський національний аграрний університет, кафедра Кібернетики та інформатики, кандидат экономических наук, доцент - Глава 10
25. *Толбатова Олена Олександрівна*, Сумський національний аграрний університет, студент - Глава 10
26. *Гафияк Алла Мирославовна*, Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, кандидат экономических наук, доцент - Глава 11
27. *Купчак Дарья Владимировна*, кандидат технических наук - Глава 12
28. *Любимова Ольга Ивановна*, соискатель, - Глава 12
29. *Бывальцев Сергей Васильевич*, Уральский федеральный университет, кандидат технических наук - Глава 13



## Содержание

<b>ГЛАВА 1. ПРОГРЕССОНОМИКА МИР-ТЕХНОЛОГИЗАЦИИ: РАБ-УДЕЛ ЭПИМЕТЕЯ VERSUS УМ-ФАКЕЛ ПРОМЕТЕЯ.....</b>	<b>8</b>
Введение.....	8
1.1. Что есть Квест-Эссе? .....	12
1.1.1. Исторический миф-квест «Загадка Сфинкса» и Сфинкс как есть..	12
1.1.2. Сфинкс как загадка в современной Действительности.....	14
1.1.3. Какие компьютерно-игровые квесты были бы полезны для УОИТ(НИОКР)-коллективов и УОИТ(НИОКР)-Координатора? .....	14
1.2. Программирование жизненных циклов в задачах НИОКР САПР(СОИТ): ретроспектива и перспективы.....	15
1.2.1. Что определяет и изменяет Уровень Цивилизационной Культуры, Образ и Стиль Жизни/Жизнедеятельности?.....	15
1.2.2. Что есть в Интернете по запросу «Программирование ЖЦ»? .....	16
1.2.3. Ретроспектива введения и применения Принципа ПЖЦ в условиях плановой экономики.....	16
1.2.4. Последующее формирование Методологии Прогрессономики.....	17
1.2.5. Гносео-Методическое обеспечение Прогрессономики.....	18
1.2.6. Ближние Перспективы и Возможности.....	22
1.2.7.Ино-Перспективы ПУР(Наука#Технология#Системотехника).....	24
1.3. Технология SOQRAT.....	25
1.3.1. Q-проблематика прогресса.....	29
1.3.2. Взятие информационных барьеров (по акад. В.М. Глушкову) .....	30
1.3.3. О соотношении нагрузок и разгрузок управления.....	30
1.3.4. Об автоматизации творческих разделов инженерного труда.....	30
1.3.5. О системной оптимизации.....	31
1.3.6. Принцип системно-оптимизационного оценивания.....	31
1.3.7. Аппроксимативный принцип системного оптимума (Sort).....	31
1.3.8. ОГАС{АСУ{САУ}} с позиций СИТ-ИНЖЕНЕРИИ.....	33
1.3.9. Схема метода интегрированного оценивания (МИО) .....	33
1.3.10. Трансформационность сложности МИО.....	34
1.3.11. Метод интегрированного оценивания ЖЦД-решений (МИО) .....	35
1.3.12. Основная структура МИО.....	36
1.3.13. Сущность МИО в контексте $\Sigma S$ -ИГРЫ.....	36
1.3.14. Метод системопорождающей игры в средах МИО(ЖЦД) .....	36
1.3.15. Эталонная система сравнения (ЭСС) .....	39
1.4. Технология SPURT.....	39
1.4.1. Перспективы интеграции Инженерий разных родов и видов.....	39
1.4.2. Архитектура перспективного ПК.....	40
1.4.3. Круг перспективных проблем.....	41
1.4.4. Формализация Принципа Системного Оптимума Sort.....	43
1.4.5. Развитие «кибернетика → информатика → нооматика» .....	43
1.4.6. Краткая характеристика актуальности нерешенных задач.....	45



1.4.7. Какой должна быть Управленческая ИТР-Культура? .....	45
1.4.8. В чем главная трудность сопряжения обоснований? .....	46
1.4.9. ИТР-Прогресс-Программология.....	46
Заключение. Выводы.....	47

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УЧЕТА ЗАЯВОК НА РЕМОНТ ОБОРУДОВАНИЯ.....**

Введение.....	48
2.1. Теоретические основы АРМ, понятие, принципы построения.....	49
2.1.1. Автоматизированное рабочее место: определение и принципы организации.....	49
2.1.2. Принципы классификации АРМ.....	51
2.1.3. Построение АРМ менеджера по заявкам на ремонт оборудования: основные этапы.....	54
2.1.4. Проектирование АРМ менеджера: основные принципы и требования.....	56
2.1.5 Требования к АРМ.....	62
2.2. Проектирование и разработка АРМ "Ремонт оборудования".....	63
2.2.1 Прототипы программы "Ремонт оборудования".....	63
2.2.2 Структура базы данных АРМ "Ремонт оборудования".....	69
2.2.3 АРМ "Ремонт оборудования".....	71
Выводы.....	72

## **ГЛАВА 3. ВТОРИЧНЫЕ ДРАГОЦЕННЫЕ МЕТАЛЛЫ.....**

Введение.....	74
3.1. Классификация отходов, содержащих драгоценные металлы.....	74
3.2. Опробование отходов, содержащих драгоценные металлы.....	76
3.3. Подготовка отходов, содержащих драгоценные металлы, к металлургическому переделу.....	78
3.3.1. Дробление и измельчение.....	85
Выводы.....	92

## **ГЛАВА 4. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СОРБЦИОННЫЕ СОНСОРЫ ВЛАЖНОСТИ.....**

Введение.....	93
4.1. Микроэлектронные емкостные сенсоры влажности гребенчатой структуры на основе гигроскопических солей NaCl и BaCl <sub>2</sub> .....	93
4.2. Микроэлектронные емкостные сенсоры влажности гребенчатой структуры на основе гигроскопических солей с защитной полимерной пленкой.....	103
4.3. Микроэлектронные емкостные сенсоры влажности гребенчатой структуры на основе гетерометаллических комплексных соединений.....	106
Выводы.....	110



<b>ГЛАВА 5. КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ДИНАМИКИ КИТАЙСКОЙ ЦИВИЛИЗАЦИИ.....</b>	<b>112</b>
Введение.....	112
5.1. Роль внешних воздействий и управления в существовании систем...112	112
5.2. Выделение внутренней модели управления в цивилизации.....114	114
5.3. Роль природных условий в формировании внутренней модели.....116	116
5.4. Парадигмы вещей и процессов в основании моделей.....118	118
5.5. Дивергенция установок внутренних целей управления.....119	119
5.6. Применение математических моделей.....120	120
5.7. Влияния внутренней модели на локальную динамику.....122	122
5.8. Расхождение целевых установок управления.....124	124
5.9. Прагматические последствия различий моделей управления.....126	126
Выводы.....	128
<b>ГЛАВА 6. SEPARATION AND USES OF LIGNIN IN THE BIOETHANOL PRODUCTION FROM CELLULOSE.....</b>	<b>129</b>
Introduction.....	129
6.1. Structure of Lignin.....	131
6.2. Separation of Lignin in the Cellulosic Ethanol Process.....	132
6.3. Physical and Chemical Properties of Lignin.....	134
6.4. Applications of Lignin.....	136
6.4.1. <i>Lignin-Based Phenol Formaldehyde Resins</i> .....	136
6.4.2. <i>Lignin-Phenol co-Polymers as Adhesives</i> .....	137
6.4.3. <i>Lignin-Polyolefin Blends</i> .....	138
6.4.4. <i>Lignin-Polyvinyl Polymer Blends</i> .....	139
6.4.5. <i>Lignin-Rubber Blends</i> .....	139
6.4.6. <i>Preparation of Vanillin from Lignin</i> .....	139
6.4.7. <i>Synthesis of Vanillin-Based Polymers</i> .....	140
<b>ГЛАВА 7. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА.....</b>	<b>142</b>
Введение.....	142
7.1. Характеристика этапов метода поддержки принятия решений.....	142
7.2. Модель оценки надежности персонала.....	145
7.3. Модель оценки профессиональных рисков.....	150
Выводы.....	158
<b>ГЛАВА 8. SOME ASPECTS OF THEORETICAL CALCULATION OF PARAMETERS GRINDER-MIXER.....</b>	<b>159</b>
<b>ГЛАВА 9. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ.....</b>	<b>169</b>





<b>ГЛАВА 10. АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ МОДЕЛЮВАННЯ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА З ТОЧКИ ЗОРУ СУЧАСНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>178</b>
<b>ГЛАВА 11. ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОЇ АЛГЕБРИ.....</b>	<b>185</b>
Вступ.....	185
11.1. Дидактичні функції систем комп'ютерної алгебри.....	185
11.2. Переваги та недоліки математичних пакетів.....	186
11.3. Можливості систем комп'ютерної алгебри.....	188
Висновки.....	190
<b>ГЛАВА 12. ПУТИ РАСШИРЕНИЯ БИОТЕХНОЛОГИИ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ.....</b>	<b>191</b>
<b>ГЛАВА 13. WI-FI-РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ.....</b>	<b>196</b>
Введение.....	196
13.1. Основные характеристики Wi-Fi-решений.....	196
13.2. Энергопотребление модулей.....	197
13.3. Структура модулей.....	200
13.4. Отладочные платы.....	202
Выводы.....	202
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>204</b>



## ГЛАВА 4. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СОРБЦИОННЫЕ СЕНСОРЫ ВЛАЖНОСТИ

### Введение

В настоящее время среди первичных преобразователей разного типа особое место в измерительной технике занимают сенсоры влажности. Необходимость контроля влажности в промышленности, а также в быту делает актуальной проблему разработки и исследования сенсоров влажности разных типов, принцип действия которых базируется на изменении электрофизических параметров.

Среди большого многообразия сенсоров влажности значительный практический интерес приобрели микроэлектронные сорбционные сенсоры влажности. В сенсорах адсорбционного и абсорбционного типов поглощения или выделения влаги сорбентом сопровождается изменением его массы и электрофизических характеристик – электропроводности, диэлектрической проницаемости и т.п. [ 1 – 8].

Использование первичных преобразователей влажности в частотных устройствах позволяет значительно повысить чувствительность и точность измерений, упростить схемы дальнейшей обработки информации. В этом случае необходимо использовать влагочувствительный элемент в виде емкости, который является наиболее оптимальным за совокупностью параметров. Благодаря этому он имеет миниатюрные габариты чувствительного элемента, возможность расположения на кристалле специализированной интегральной схемы обработки сигнала [ 9 – 11].

Однако, исследования свойств емкостных влагочувствительных элементов на основе органических, неорганических и смешанных сорбентов выполнены недостаточно, что способствует дальнейшим экспериментальным и теоретическим поискам.

### 4.1. Микроэлектронные емкостные сенсоры влажности гребенчатой структуры на основе гигроскопических солей NaCl и BaCl<sub>2</sub>

Целью работы является разработка нового емкостного влагочувствительного элемента с широким диапазоном работы в окружающей среде.

В качестве экспериментальных влагочувствительных образцов использовали:

- емкостные сенсоры влажности гребенчатой структуры на основе гигроскопических солей NaCl и BaCl<sub>2</sub>, разработанные авторами в Винницком национальном техническом университете (ВНТУ) (г. Винница, Украина);
- емкостные сенсоры влажности гребенчатой структуры на основе гигроскопических солей с защитным полимерным покрытием, разработанные авторами в ВНТУ (г. Винница, Украина);
- емкостные сенсоры влажности на основе комплексных соединений, разработанные также в ВНТУ (г. Винница, Украина).

Поскольку, емкость сенсора прямо пропорциональна диэлектрической





проницаемости материала, то для материалов, которые представляют собой сложные смеси, необходимо учесть их структурные свойства и характер распределения компонентов в них.

Установлено, что все смеси в зависимости от распределения компонентов можно разделить на три типа:

- структурированные, в которых компоненты создают некоторые упорядоченные структуры;
- матричные, в которых одни компоненты представляют собой сплошную матрицу с вкраплениями других компонентов;
- статистические, в которых компоненты распределены хаотично и равноправны по взаимному расположению.

В некоторых случаях тип смеси зависит от объемного содержания компонентов. Диэлектрические свойства материала во многих случаях зависят не от изменения структуры, а от содержания влаги, которая находится в данном материале. Формой связи между водой и материалом определяется влияние содержания воды на диэлектрические свойства материала [12].

Рассмотрим процесс сорбции в емкостных сенсорах гребенчатой структуры на основе гигроскопических солей  $\text{NaCl}$  и  $\text{BaCl}_2$ . Широкое использование сенсоров влажности емкостного типа на основе гигроскопических солей объясняется их простотой в использовании и низкой себестоимостью. Соли  $\text{NaCl}$  и  $\text{BaCl}_2$  относятся к ионным кристаллам, т.е. это такие диэлектрические кристаллы, которые построены с двух кристаллических решеток помещенных друг в друга, они состоят из ионов противоположного знака. В данных ионных кристаллах могут возникать как электронные так и упруго-ионные и ионно-релаксационные поляризации. Следует отметить, что электронная поляризация обусловлена смещением электронных оболочек относительно положительных ядер, этим видом поляризации владеют все вещества. В области радиочастот, диэлектрическая проницаемость веществ  $\epsilon$  этого класса не зависит от частоты, а с увеличением температуры  $\epsilon$  слабо уменьшается. Ионная поляризация обусловлена смещением положительных и отрицательных ионов относительно своих равновесных положений. Данная поляризация присущая ионным кристаллам, диэлектрическая проницаемость которых может быть значительной ( $\epsilon$  титанита кальция составляет 150) и не изменяется с частотой в диапазоне радиочастот. Релаксационной поляризацией владеют диэлектрики, в состав которых входят молекулярные диполи, которые принимают участие лишь в тепловом движении и владеют энергией  $kT$ . В таких диэлектриках при отсутствии поля дипольные молекулы распределены хаотически, а при наложении поля диполи взаимодействуют с ним и ориентируются преимущественно в направлении поля. Таким образом, данная поляризация, а также  $\epsilon$  зависят от температуры. Необходимо отметить, что ионные кристаллы имеют невысокое значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , которая показывает во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля в однородном и изотропном диэлектрике при заданном распределении заряда в сравнении с вакуумом [13 – 15].

Интерес к изучению поляризации ионных кристаллов с невысоким



значением  $\varepsilon$  состоит в том, что данный вид кристаллов образует кристаллическую фазу керамических диэлектриков, которые используются в технике. Кроме того, неорганические диэлектрики это сложные соединения с ионным характером химической связи. Теория поляризации таких кристаллов с учетом ряда факторов сложная, поэтому рассмотрим более простую, предложенную Борном, приближенную теорию поляризации бинарных ионных кристаллов типа NaCl, что дает возможность определить диэлектрическую проницаемость и емкость преобразователя.

Предположим, что на ионы данного типа кристалла действует поле, равное среднему макроскопическому полю  $E$ , поэтому поляризация в данном случае имеет вид [15]:

$$P = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \cdot n \cdot E, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – электронные поляризуемости ионов первого и второго видов;

$\alpha_3$  – ионная поляризуемость пары разноименных ионов;

$n$  – число пар ионов в  $1 \text{ см}^3$ ;

$E$  – напряженность среднего макроскопического поля.

Диэлектрическая проницаемость и поляризация диэлектрика  $P$  связаны таким соотношением [15]:

$$P = \frac{\varepsilon - 1}{4 \cdot \pi} \cdot E, \quad (2)$$

тогда из формулы (2) находим значение  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot P \cdot \pi + E}{E} = \frac{4 \cdot P \cdot \pi}{E} + 1. \quad (3)$$

В выражение (3) подставим значение величины поляризации  $P$  из формулы (1) и находим  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \cdot n \cdot \pi \cdot E}{E} + 1 = 4 \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \cdot n \cdot \pi + 1,$$

то есть

$$\varepsilon = 1 + 4 \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot n \cdot \pi + 4 \cdot \alpha_3 \cdot n \cdot \pi. \quad (4)$$

Квадрат показателя преломления определяем из уравнения:

$$v^2 = 1 + 4 \cdot n \cdot \pi \cdot (\alpha_1 + \alpha_2), \quad (5)$$

с учетом (5) выражение (4) будет иметь такой вид:

$$\varepsilon = v^2 + 4 \cdot n \cdot \pi \cdot \alpha_3. \quad (6)$$



Следует отметить, что ионы относительно своих равновесных положений, осуществляют незначительные по амплитуде тепловые колебания. Существуют два типа тепловых колебаний, а именно: акустические и оптические, причем каждому кристаллу отвечает определенный интервал частот данных колебаний. Колебания называются оптическими, если при осуществлении колебаний соседние ионы двигаются навстречу друг другу, а если в результате колебания ионы двигаются в одном направлении, то данный тип колебаний называют акустическими. Оптические колебания в кристалле размещенном в электромагнитном поле возбуждаются электрическим полем в том случае, если частота поля лежит в диапазоне частот оптических колебаний кристалла. В этом случае волна поглощается в кристалле и отражается от его поверхности. Кристаллы сильно отражают электромагнитные волны в далекой инфракрасной области спектра. Кроме того, если на поверхность кристалла направить поток света, то от его поверхности отразятся те волны, которые сильно поглощаются в кристалле. Отраженный поток света называют остаточными лучами. В случае, когда лучи света от поверхности кристалла отражаются несколько раз, диэлектрическую проницаемость ионных кристаллов описывают с помощью круговой частоты остаточных лучей  $\omega$ .

Как известно, круговая частота собственных колебаний  $\omega$  материальной точки с массой  $m$  описывается выражением [15]:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент упругой связи.

Для того чтобы определить частоту колебаний бинарных кристаллов целесообразно вместо  $m$  использовать приведенную массу, то есть

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}, \quad m = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}, \quad (8)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массы положительного и отрицательного ионов.

С учетом (7) и (8) определим значение коэффициента упругой связи:

$$k = \omega^2 \cdot m = \omega^2 \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}. \quad (9)$$

Смещение иона  $\Delta x$  из состояния равновесия под действием силы  $f$  определяет коэффициент упругой связи:

$$\Delta x = \frac{f}{k}. \quad (10)$$

На ионы с зарядом  $q$  в электрическом поле действует сила  $f = q \cdot E$ , под



действием которой возникает смещение положительного и отрицательного ионов из положения равновесия, то есть

$$\Delta x = \frac{q \cdot E}{k}. \quad (11)$$

Смещение ионов из равновесных положений относительно друг друга связано с поляризацией, поэтому дипольный момент для одной пары ионов описывается выражением:

$$\mu = \frac{q^2 \cdot E}{k}, \quad (12)$$

при этом дипольный момент для пары ионов имеет другой вид:

$$\mu = \alpha_3 \cdot E, \quad (13)$$

то есть

$$\alpha_3 = \frac{q^2}{k}. \quad (14)$$

В (14) подставим значение  $k$  из (9), тогда

$$\alpha_3 = \frac{q^2}{\omega^2} \cdot \frac{(m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}. \quad (15)$$

Для получения формулы Борна, для диэлектрической проницаемости, правую часть выражения (15), т.е. числитель и знаменатель умножим на квадрат числа Авогадро  $N_A$  [15]:

$$\alpha_3 = \frac{N_A^2 \cdot q^2 \cdot (m_1 + m_2)}{N_A^2 \cdot \omega^2 \cdot m_1 \cdot m_2} = \frac{N_A \cdot q^2 \cdot (N_A \cdot m_1 + N_A \cdot m_2)}{\omega^2 \cdot N_A \cdot m_1 \cdot N_A \cdot m_2}. \quad (16)$$

С учетом того, что

$$m_1 \cdot N_A = M_1 \text{ и } m_2 \cdot N_A = M_2,$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – атомные массы ионов, выражение (16) примет вид:

$$\alpha_3 = \frac{N_A \cdot q^2 \cdot (M_1 + M_2)}{\omega^2 \cdot M_1 \cdot M_2}. \quad (17)$$

Для получения формулы Борна для диэлектрической проницаемости, выражение (17) подставим в (6)



$$\varepsilon = \nu^2 + 4 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{q^2 \cdot N_A \cdot (M_1 + M_2)}{\omega^2 \cdot M_1 \cdot M_2}. \quad (18)$$

Используя плотность кристалла  $\rho$ , выразим число пар ионов в  $1\text{см}^3$ , то есть

$$n = \frac{\rho \cdot N_A}{M_1 + M_2}. \quad (19)$$

Выражение (19) подставим в (18), тогда

$$\varepsilon = \nu^2 + 4 \cdot \pi \cdot \frac{\rho \cdot N_A^2 \cdot q^2 \cdot (M_1 + M_2)}{\omega^2 \cdot (M_1 + M_2) \cdot M_1 \cdot M_2} = \nu^2 + 4 \cdot \pi \cdot \frac{\rho \cdot N_A^2 \cdot q^2}{\omega^2 \cdot M_1 \cdot M_2}. \quad (20)$$

Круговая частота колебаний  $\omega$  связана с длиной волны остаточных лучей  $\lambda$  и скоростью света в вакууме  $c$  выражением [14]:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{c}{\lambda}. \quad (21)$$

С учетом (21) формула (20) принимает вид:

$$\varepsilon = \nu^2 + \frac{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot N_A^2 \cdot q^2 \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot c^2 \cdot M_1 \cdot M_2} = \nu^2 + \frac{\rho \cdot N_A^2 \cdot q^2 \cdot \lambda^2}{\pi \cdot c^2 \cdot M_1 \cdot M_2}. \quad (22)$$

Используя числовые значения постоянных коэффициентов, диэлектрическая проницаемость бинарных ионных кристаллов описывается таким выражением [12]:

$$\varepsilon = \nu^2 + 3 \cdot 10^6 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot \rho}{M_1 \cdot M_2}. \quad (23)$$

Как было показано в [12], влияние содержания воды на диэлектрические свойства материала определяется формой связи между водой и материалом.

В нашем случае сухой компонент (соль) и вода находятся в виде смеси промежуточного типа, свойства которой удовлетворительно описываются эмпирическим уравнением [12]:

$$\lg \varepsilon = V_1^a \cdot \lg \varepsilon_1 + (1 - V_1^a) \cdot \lg \varepsilon_2, \quad (24)$$

где  $a = 0,5 \div 1$ ;  $V_1$  – объемная доля сухого компонента (соли);

$\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость сухого компонента;

$(1 - V_1^a)$  – объемная доля воды;



$\varepsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость воды.

Изменяя значение коэффициента  $a$  данное уравнение можно применять для всех типов неупорядоченных смесей.

Найдем объемные доли компонентов в смеси, т.е.  $V_{\text{доля соли}}$ , а также  $V_{\text{доля } H_2O}$ , для этого определим общий объем  $V_{\text{общ.}}$ , который занимают эти вещества, то есть

$$V_{\text{соли}} + V_{H_2O} = V_{\text{общ.}}, \quad (25)$$

$$V_{\text{доля соли}} = \frac{V_{\text{соли}}}{V_{\text{общ.}}}, \quad (26)$$

$$V_{\text{доля } H_2O} = (1 - V_{\text{доля соли}}^a), \quad (27)$$

$$V_{\text{соли}} = S_M \cdot \sigma_{\text{соли}}, \quad (28)$$

$$S_M = l \cdot b, \quad (29)$$

где  $S_M$  – площадь меандра, мм<sup>2</sup>;

$\sigma_{\text{соли}}$  – толщина солевого покрытия, мкм;

$l, b$  – длина и ширина меандра, мм.

Определим объем воды  $V_{H_2O}$

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}, \quad (30)$$

где  $m_{H_2O}$  – масса воды, г;

$\rho_{H_2O}$  – плотность воды, г·см<sup>-3</sup>.

$$m_{H_2O} = \chi \cdot G, \quad (31)$$

где  $\chi$  – величина, которая учитывает связь между массовым содержанием влаги и давлением пара [16]:

$$\chi = \delta \cdot \frac{p_v}{P - p_v}, \quad (32)$$

где  $\delta = \frac{M_{H_2O}}{M_B}$  – относительная масса водяного пара по отношению к

сыхому воздуху при одинаковых давлениях и температурах;

$M_{H_2O} = 18,015$ ,  $M_B = 29$  – молекулярные массы водяного пара и сухого воздуха, г·моль<sup>-1</sup>;

$p_v$  – парциальное давление пара при температуре  $T$ , Па;

$P$  – давление воздуха 101325 Па.

Температура влажного термометра и давление пара связаны следующим выражением [16]:

$$p_v = p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w), \quad (33)$$





$$A = \frac{c_{pB}}{\delta \cdot L_{T_w}} \cdot \frac{P - p_s}{P}, \quad (34)$$

где  $p_s$  – давление насыщенного пара при температуре  $T$ , Па;

$A$  – психрометрическая постоянная, которая при  $T_w = 20$  °С составляет 0,00064;

$T$  – температура окружающей среды, °С;

$T_w$  – температура влажного термометра, °С;

$c_{pB}$  – удельная теплоемкость сухого воздуха (1,006 кДж/кг при  $T = 20$  °С);

$L_{T_w}$  – скрытая теплота парообразования при температуре влажного термометра  $T_w$ , кДж/кг.

Выражение (33) подставим в (32) и получим такое соотношение [16]:

$$\chi = \delta \cdot \left( \frac{p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w)}{P - (p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w))} \right). \quad (35)$$

Рассчитаем массу сухого воздуха в исследуемом объеме. Нормальными условиями для газов есть: температура 0 °С, давление 101325 Па. При нормальных условиях объем одного моля газа составляет 22,416 дм<sup>3</sup>.

Масса сухого воздуха, г:

$$G = \frac{273,2 \cdot M_B \cdot P \cdot V}{101,325 \cdot 22,4 \cdot (273,2 + T)} = \frac{0,1204 \cdot P \cdot M_B \cdot V}{273,2 + T}, \quad (36)$$

где  $V$  – объем, который занимает данная масса газа, дм<sup>3</sup>.

С учетом (31) и значения  $\rho_{H_2O}$  определим объем воды:

$$V_{H_2O} = \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}}. \quad (37)$$

Тогда  $V_{общ.}$  можно определить как

$$V_{общ.} = \left( S_M \cdot \sigma_{соли} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}} \right). \quad (38)$$

В этом случае выражение (26) с учетом (28) и (38) примет вид:

$$V_{доля соли} = \frac{S_M \cdot \sigma_{соли}}{\left( S_M \cdot \sigma_{соли} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}} \right)}. \quad (39)$$

Общее выражение для определения диэлектрической проницаемости смеси промежуточного типа  $\varepsilon_{СПТ}$  имеет вид:



$$\lg \varepsilon_{СПТ} = V_{\text{доля соли}}^a \cdot \lg \varepsilon_{\text{соли}} + k \cdot (1 - V_{\text{доля соли}}^b) \cdot \chi \cdot \lg \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (40)$$

где  $a = 0,5 \div 1$ ;  $b = 0,5 \div 1$  при условии, что  $a < b$ ;  $k = 1 \div 5$ .

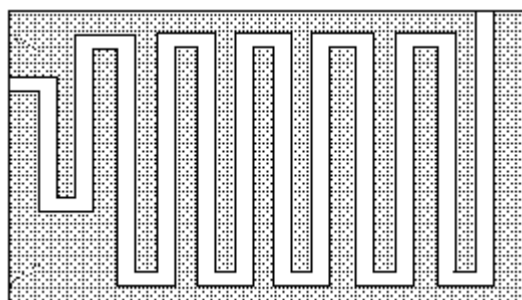
С учетом (27), (35) и (39) выражение (40) приобретает вид:

$$\lg \varepsilon_{СПТ} = \left( \frac{S_M \cdot \sigma_{\text{соли}}}{S_M \cdot \sigma_{\text{соли}} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}} \right)^a \cdot \lg \varepsilon_{\text{соли}} + k \cdot \left( 1 - \left( \frac{S_M \cdot \sigma_{\text{соли}}}{S_M \cdot \sigma_{\text{соли}} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}} \right)^b \right) \times$$

$$\times \delta \left( \frac{p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w)}{P - (p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w))} \right) \cdot \lg \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \quad (41)$$

Таким образом, определена зависимость диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{СПТ}$  для смеси промежуточного типа (соль и вода) от параметров ее составляющих. Далее перейдем к экспериментальным исследованиям структуры.

Емкостный сенсор влажности изготовлен на ситалловой подложке размером  $0,7 \times 0,9$  см, на поверхности которой нанесена пленка меди, которая образует обкладки конденсатора в виде меандра с соответствующей геометрией  $7,85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1,2 \cdot 10^{-6}$  м (рис.1). Влагодчувствительной пленкой сенсора, является гигроскопическая соль. Для создания влагодчувствительной пленки использовали разбавленные растворы солей  $\text{NaCl}$  и  $\text{BaCl}_2$ , которые наносили на поверхность конденсатора пульверизатором на расстоянии 40 – 50 см в виде четырех, пяти и шести слоев.



**Рис. 1. Внешний вид емкостного влагодчувствительного элемента гребенчатой структуры**

Для расчета емкости разработанной структуры воспользуемся формулой для определения емкости тонкопленочного конденсатора с гребенчатой структурой [17]:

$$C = (\varepsilon_{II} + 1) \cdot \varepsilon_0 \cdot l \cdot [2 \cdot A_1 \cdot (N - 1) + A_2], \quad (42)$$

где  $\varepsilon_{II}$  диэлектрическая проницаемость подложки;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума, Ф/м;



$N$  – число секций;

$l, a, b$  – величины, которые учитывают геометрию конденсатора, мм;

$d_{II}$  – толщина подложки, мм;

$$A_1 = 0,61 \cdot (d_{II} / a)^{0,25} \cdot (b / d_{II})^{0,44};$$

$$A_2 = 0,77 \cdot b / [(2 \cdot N - 1) \cdot (a + b)] + 0,41.$$

Учтем диэлектрическую проницаемость смеси промежуточного типа (41) в формуле емкости конденсатора (42):

$$C = (\varepsilon_{II} + \varepsilon_{СПП} + 1) \cdot \varepsilon_0 \cdot l \cdot [2 \cdot A_1 \cdot (N - 1) + A_2], \quad (43)$$

где  $A_1 = 3 \cdot (d_{II} / a)^{0,25} \cdot (b / d_{II})^{0,44}$ .

То есть,

$$C = \left( \left( \frac{S_M \cdot \sigma_{соли}}{S_M \cdot \sigma_{соли} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^a \cdot \lg \varepsilon_{соли} + \varepsilon_{II} + 1 + \delta \cdot k \cdot \left( \frac{p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w)}{P - (p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w))} \right) \right) \times$$

$$\times \left( 1 - \left( \frac{S_M \cdot \sigma_{соли}}{S_M \cdot \sigma_{соли} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^b \right) \cdot \lg \varepsilon_{H_2O} \cdot \varepsilon_0 \cdot l \cdot [2 \cdot A_1 \cdot (N - 1) + A_2]. \quad (44)$$

Используя выражение (44), рассчитана емкость влагочувствительных элементов разработанных на основе пленок гигроскопических солей NaCl или BaCl<sub>2</sub> с помощью пакета прикладных программ «Matlab 7.1». На рис. 2 представлены теоретические и экспериментальные зависимости емкости влагочувствительных элементов от изменения относительной влажности воздуха в диапазоне от 0 до 100 %.

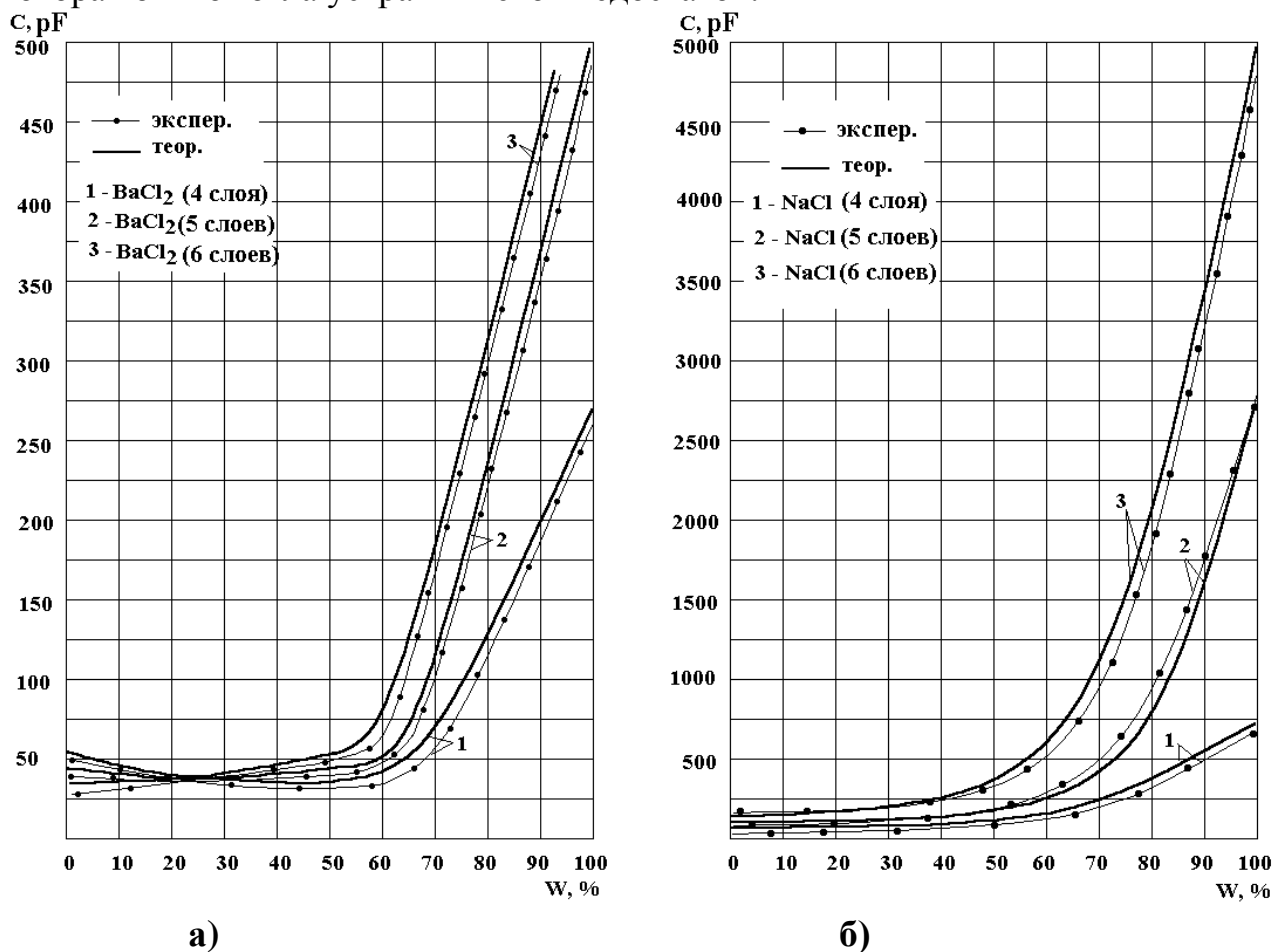
Экспериментальные исследования показали, что при увеличении количества слоев нанесенной соли расширяется диапазон изменения емкости сенсора. Так, для BaCl<sub>2</sub> он представляет: для четырех слоев – 240 pF, для шести слоев – 510 pF, в то время как для NaCl: для четырех слоев – 670 pF, для шести слоев – 4900 pF при изменении относительной влажности от 0 до 100%.

Как видно из графика (рис. 2), теоретические и экспериментальные зависимости имеют хорошее совпадение. Адекватность математической модели можно оценить с помощью относительной погрешности, которая составляет ±5%.

Разработанные емкостные сенсоры гребенчатой структуры на основе гигроскопических солей NaCl и BaCl<sub>2</sub> имеют существенный недостаток, который заключается в том, что с увеличением уровня относительной влажности окружающей среды до 100% на поверхности сенсора образуется точка росы [18]. Это препятствовало их дальнейшему практическому



применению. Поэтому возникла потребность в создании защитной пленки, которая бы помогла устранить этот недостаток.



а) б)  
**Рис. 2. Теоретические и экспериментальные зависимости емкости влагочувствительных элементов от изменения относительной влажности воздуха, разработанных на основе: а) –  $BaCl_2$ ; б) –  $NaCl$**

#### 4.2. Микроэлектронные емкостные сенсоры влажности гребенчатой структуры на основе гигроскопических солей с защитной полимерной пленкой

Рассмотрим процесс сорбции в емкостных сенсорах гребенчатой структуры на основе гигроскопических солей с защитной полимерной пленкой.

Известно, что практически все органические полимеры изменяют свои физико-химические свойства при поглощении влаги, что позволяет использовать некоторые из них в сенсорах влажности, в том числе кондуктометрического и емкостного типов. Органическая полимерная пленка в таких сенсорах выполняет функции самостоятельного влагочувствительного материала. Иногда она содержит неорганические влагочувствительные соединения или негигроскопические проводящие частицы (мелкодисперсного углерода, золота, серебра, палладия или других веществ).

В качестве влагочувствительных покрытий при изготовлении сенсоров используются акрилаты, полимеры метакрилата, полиакриламиды, полиэтиленимиды, гидроксилцеллюлоза, продукты сополимеризации хлорсодержащих полимеров (например, хлорированный полипропилен) и



полиамидной смолы, кремнийорганические полимеры, которые содержат аминогруппы [8]. Тем не менее, исследования емкостных свойств влагочувствительных элементов на основе органических полимерных пленок с разными добавками проведены недостаточно.

Для эксперимента использовали образцы первичных преобразователей влажности, которые состояли из двух слоев. Первым слоем служила смесь промежуточного типа, то есть влагочувствительные соли NaCl или BaCl<sub>2</sub>, свойства которых удовлетворительно описываются эмпирическим уравнением (24) [12], а вторым слоем – слой полиметилметакрилата, который является смесью матричного типа с дискретно распределенными микрочастицами влаги.

Для матричных смесей диэлектрическая проницаемость, описывается формулой Оделевского [12]:

$$\varepsilon_{\text{матр}} = \varepsilon_{\text{пол}} \cdot \left( 1 + \frac{V_{\text{доля}H_2O}}{\frac{1 - V_{\text{доля}H_2O}}{3} + \frac{\varepsilon_{\text{пол}}}{\varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{\text{пол}}}} \right), \quad (45)$$

где  $\varepsilon_{\text{пол}}$  – диэлектрическая проницаемость полиметилметакрилата;

$\varepsilon_{H_2O}$  – диэлектрическая проницаемость воды;

$V_{\text{доля}H_2O}$  – объемная доля воды.

Теперь перейдем к определению объемных долей компонентов, т.е.  $V_{\text{доля}H_2O}$ , для этого определим общий объем  $V_{\text{общ.}}$ , который занимают эти вещества, то есть

$$V_{\text{пол}} + V_{H_2O} = V_{\text{общ.}}, \quad (46)$$

$$V_{\text{доля пол}} = \frac{V_{\text{пол}}}{V_{\text{общ.}}}, \quad (47)$$

$$V_{\text{пол}} = S_{\text{пол}} \cdot d_{\text{пол}}, \quad (48)$$

где  $S_{\text{пол}}$  – площадь полиметилметакрилата;

$d_{\text{пол}}$  – толщина слоя полиметилметакрилата.

$$V_{\text{доля}H_2O} = (1 - V_{\text{доля пол}}). \quad (49)$$

С учетом (46), (47), (48) и (49) выражение (45) приобретает вид:

$$\varepsilon_{\text{матр}} = \varepsilon_{\text{пол}} \cdot \left( 1 + \frac{\left( 1 - \frac{S_{\text{пол}} \cdot d_{\text{пол}}}{S_{\text{пол}} \cdot d_{\text{пол}} + V_{H_2O}} \right)}{\left( 1 - \frac{S_{\text{пол}} \cdot d_{\text{пол}}}{S_{\text{пол}} \cdot d_{\text{пол}} + V_{H_2O}} \right) + \frac{\varepsilon_{\text{пол}}}{\varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{\text{пол}}}} \right). \quad (50)$$



Итак, определив зависимость диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  для структурированных смесей от параметров ее составляющих, перейдем к экспериментальным исследованиям структуры.

Для расчета емкости двухслойной структуры воспользуемся формулой (42) для определения емкости тонкопленочного конденсатора с гребенчатой структурой.

Учитывая диэлектрическую проницаемость смеси промежуточного типа (41) и смеси матричного типа (50) выражение (42) приобретает вид [17]:

$$C = (\varepsilon_{II} + \varepsilon_{СПТ} + \varepsilon_{матр} + 1) \cdot \varepsilon_0 \cdot l \cdot [2 \cdot A_1 \cdot (N - 1) + A_2], \quad (51)$$

где  $A_1 = 3 \cdot (d_{II} / a)^{0,25} \cdot (b / d_{II})^{0,44}$ .

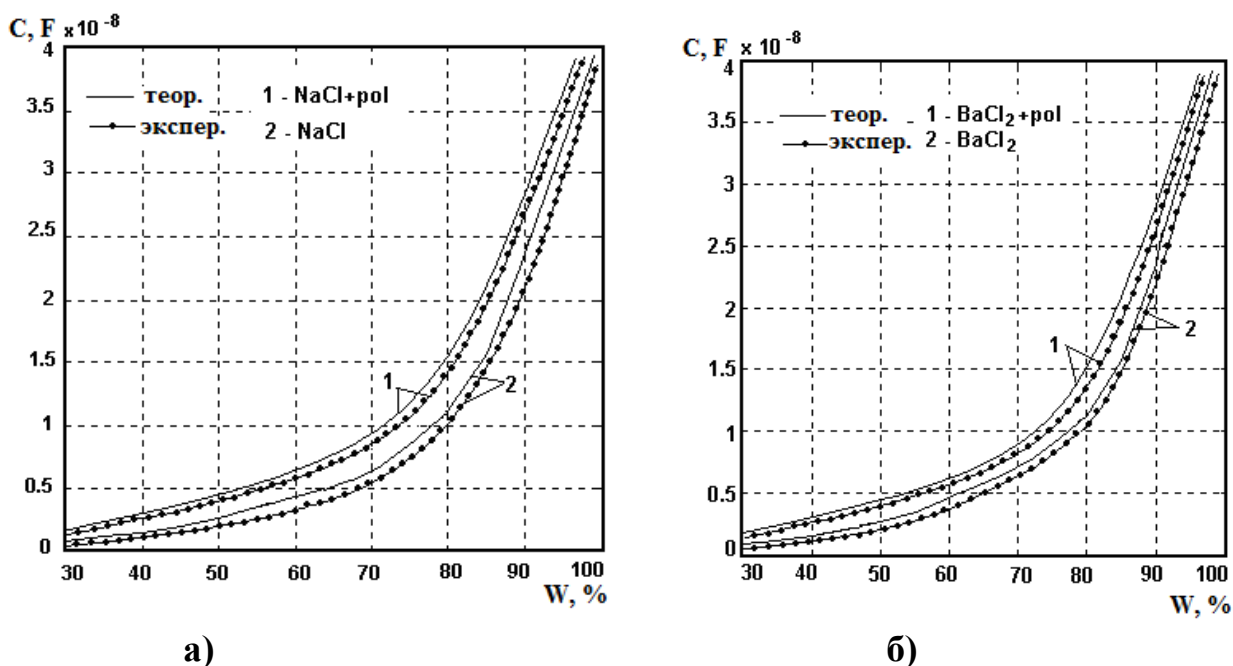
То есть,

$$C = \left( \left( \frac{S_M \cdot \sigma_{соли}}{S_M \cdot \sigma_{соли} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^a \cdot \lg \varepsilon_{соли} + \varepsilon_{пол} \cdot \left( 1 + \frac{\left( 1 - \frac{S_{пол} \cdot d_{пол}}{S_{пол} \cdot d_{пол} + V_{H_2O}} \right)}{1 - \frac{\left( 1 - \frac{S_{пол} \cdot d_{пол}}{S_{пол} \cdot d_{пол} + V_{H_2O}} \right)}{3} + \frac{\varepsilon_{пол}}{\varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{пол}}} \right) + \right. \\ \left. + \varepsilon_{II} + 1 + \delta \cdot k \cdot \left( \frac{p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w)}{P - (p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w))} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{S_M \cdot \sigma_{соли}}{S_M \cdot \sigma_{соли} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^b \right) \cdot \lg \varepsilon_{H_2O} \right) \times \\ \times \varepsilon_0 \cdot l \cdot [2 \cdot A_1 \cdot (N - 1) + A_2]. \quad (52)$$

Влагочувствительной пленкой разработанного сенсора (рис.1) является двухслойная структура, нижним слоем, которой служит гигроскопическая соль, а верхним – полимер. Для создания влагочувствительной пленки использовали разбавленные растворы солей NaCl или BaCl<sub>2</sub>, которые наносили на поверхность конденсатора пульверизатором. На полученное влагочувствительное покрытие наносили защитный слой полиметилметакрилата (в дальнейшем pol).

Используя выражение (52), рассчитана емкость влагочувствительных элементов разработанных на основе гигроскопических солей NaCl или BaCl<sub>2</sub>, для двухслойных структур NaCl+pol или BaCl<sub>2</sub>+pol с помощью пакета прикладных программ «Matlab 7.1». На рис. 3. представлены теоретические и экспериментальные зависимости емкости влагочувствительных элементов на основе гигроскопических солей и двухслойных структур, от изменения относительной влажности воздуха в диапазоне от 30 до 100%.





**Рис. 3. Теоретические и экспериментальные зависимости емкости влагочувствительных элементов от изменения относительной влажности воздуха, разработанных на основе: а) – NaCl+ pol и NaCl; б) – BaCl<sub>2</sub>+ pol и BaCl<sub>2</sub>**

Экспериментальные исследования показали, что создание полимерного покрытия в качестве защитного слоя, с целью предотвращения выпадения точки росы, уменьшает диапазон изменения емкости. Так, при изменении относительной влажности от 30 до 100% диапазон изменения емкости для влагочувствительного элемента на основе NaCl составляет от  $0,030 \cdot 10^{-8}$  до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  F, а для двухслойной структуры на основе NaCl+pol – от  $0,125 \cdot 10^{-8}$  до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  F. Для влагочувствительного элемента на основе BaCl<sub>2</sub> – диапазон изменения емкости составляет от  $0,060 \cdot 10^{-8}$  до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  F, а для двухслойной структуры на основе BaCl<sub>2</sub>+pol – от  $0,130 \cdot 10^{-8}$  до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  F.

Проведенные нами исследования емкостных влагочувствительных элементов, разработанных на основе гигроскопических солей NaCl и BaCl<sub>2</sub> довели, что они работают только в ограниченном диапазоне относительной влажности, ниже точки росы [18], что является их основным недостатком. Дальнейшие исследования емкостных влагочувствительных элементов на основе гигроскопических солей показали, что создание защитного полимерного покрытия с целью предотвращения выпадения точки росы уменьшает диапазон изменения емкости сенсоров [19].

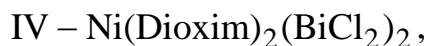
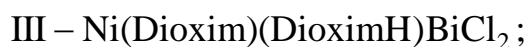
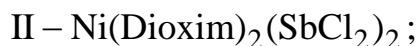
Для решения этой проблемы, в качестве влагочувствительного слоя, использовали гетерометаллические комплексные соединения.

#### **4.3. Микроэлектронные емкостные сенсоры влажности гребенчатой структуры на основе гетерометаллических комплексных соединений**

Рассмотрим процесс сорбции в емкостных сенсорах гребенчатой структуры на основе гетерометаллических комплексных соединений – сурьму-



или висмутсодержащих диоксиматов никеля (II), формулы которых обозначим I – IV:

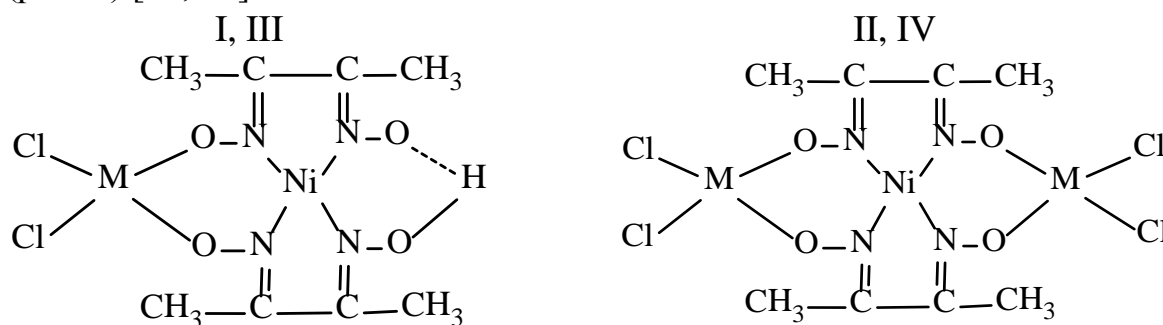


где  $\text{DioximH}_2 = \text{H}_3\text{C} - \text{C}(\text{NOH}) - \text{C}(\text{NOH}) - \text{CH}_3$ .

Гетерометаллическое комплексное соединение I получено по такой методике: к смеси 2,89 г (10 ммоль) бис-диметилглиоксимата никеля (II) и 2,29 г (10 ммоль) хлорида сурьмы (III) прибавляли 60 мл хлороформа и при непрерывном перемешивании нагревали на водяной бане (~ 50 °С) до растворения исходных веществ. При этом получали раствор темного цвета из которого во время охлаждения выпадал однородный мелкокристаллический осадок сиреневого цвета, который фильтровали на стеклянном фильтре, промывали небольшим количеством хлороформа и высушивали в вакуум-эксикаторе над силикагелем.

Таким же способом при взаимодействии бис-диметилглиоксимата никеля (II) с хлоридом сурьмы (III) в соотношении 1:2 получали комплексное соединение II.

Висмутсодержащие комплексы III и IV получены по аналогичной методике с использованием в качестве исходных веществ бис-диметилглиоксимата никеля (II) и хлорида сурьмы (III) в соотношении 1:1 или 1:2. Состав, строение и физико-химические свойства комплексных соединений I – IV доказаны на основе данных элементного, рентгенофазового анализов, магнетохимического, ИК-спектроскопического и термогравиметрического исследований. Для выделенных соединений на основе проведенных исследований предложено такую схему размещения химических связей (рис. 4) [20, 21]:



**Рис. 4. Схема размещения химических связей в гетерометаллических комплексных соединениях I – IV: М = Sb для I, II; М = Bi для III, IV**

Исследование электрических свойств выделенных соединений I – IV в спрессованном виде показало, что они являются диэлектриками при комнатной температуре. Полученные гетерометаллические комплексные соединения I – IV практически нерастворимы в спиртах, ацетоне, бензоле, плохо



растворимые в диметилформамиде и диметилсульфоксиде, являются гигроскопическими и способны изменять окраску при изменении относительной влажности окружающей среды.

В нашем случае увлажненный материал, который состоит из сухого компонента (гетерометаллического комплексного соединения) и воды находится в виде смеси промежуточного типа, свойства которого удовлетворительно описываются эмпирическим уравнением (24) [12].

Численные значения диэлектрических проницаемостей гетерометаллических комплексных соединений (I – IV) определены с помощью формулы Клаузиуса-Моссотти [22, 23].

В нашем случае общее выражение для определения диэлектрической проницаемости смеси промежуточного типа  $\varepsilon_{СПТ}$  имеет вид:

$$\lg \varepsilon_{СПТ} = V_{доля К.С.}^a \cdot \lg \varepsilon_{К.С.} + k \cdot (1 - V_{доля К.С.}^b) \cdot \chi \cdot \lg \varepsilon_{H_2O}, \quad (53)$$

где  $V_{доля К.С.}$  – объемная доля комплексного соединения;

$\varepsilon_{К.С.}$  – диэлектрическая проницаемость комплексного соединения;

$k = 1 \div 5$ ;  $b = 0,5 \div 1$  при условии, что  $a < b$ ;

$\chi$  – величина, которая учитывает связь между массовым соотношением влаги и давлением пара [16], рассчитана с использованием выражения (35);

$\varepsilon_{H_2O}$  – диэлектрическая проницаемость воды.

Объемную долю комплексного соединения  $V_{доля К.С.}$  определяем из выражения:

$$V_{доля К.С.} = \frac{S_M \cdot \sigma_{К.С.}}{\left( S_M \cdot \sigma_{К.С.} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}} \right)}, \quad (54)$$

где  $S_M$  – площадь меандра, мм<sup>2</sup>;

$\sigma_{К.С.}$  – толщина нанесенного слоя комплексного соединения, мкм;

$G$  – масса сухого воздуха, г [16], рассчитана из уравнения (36);

$\rho_{H_2O}$  – плотность воды, г/см<sup>3</sup>.

С учетом (35), (36) и (54) выражение (53) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \lg \varepsilon_{СПТ} = & \left( \frac{S_M \cdot \sigma_{К.С.}}{S_M \cdot \sigma_{К.С.} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^a \cdot \lg \varepsilon_{К.С.} + k \cdot \left( 1 - \left( \frac{S_M \cdot \sigma_{К.С.}}{S_M \cdot \sigma_{К.С.} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^b \right) \times \\ & \times \delta \cdot \left( \frac{p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w)}{P - (p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w))} \right) \cdot \lg \varepsilon_{H_2O}. \end{aligned} \quad (55)$$



Таким образом, определив зависимость диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{СПТ}$  для смеси промежуточного типа (в данном случае это гетерометаллическое комплексное соединение и вода) от параметров ее составляющих, далее приступим к исследованиям экспериментальных образцов.

Емкостный сенсор влажности гребенчатой структуры изготовлен на ситалловой подложке размером  $0,7 \times 0,9$  см, с соответствующей геометрией  $7,85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1,2 \cdot 10^{-6}$  м (рис. 1). Влажочувствительные слои создавали используя разведенные диметилформаидные растворы гетерометаллических комплексных соединений I – IV методом пульверизации.

Для расчета емкости такой структуры воспользуемся формулой для определения емкости тонкопленочного конденсатора с гребенчатой структурой, выражение (42) [17]. Учтем диэлектрическую проницаемость комплексного соединения (55) в формуле емкости конденсатора (42), и в результате получим:

$$C = \left( \left( \frac{S_M \cdot \sigma_{К.С.}}{S_M \cdot \sigma_{К.С.} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^a \cdot \lg \varepsilon_{К.С.} + \varepsilon_{II} + 1 + \delta \cdot k \cdot \left( \frac{p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w)}{P - (p_s - A \cdot P \cdot (T - T_w))} \right) \right) \times \left( 1 - \left( \frac{S_M \cdot \sigma_{К.С.}}{S_M \cdot \sigma_{К.С.} + \frac{G \cdot \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^b \right) \cdot \lg \varepsilon_{H_2O} \cdot \varepsilon_0 \cdot l \cdot [2 \cdot A_1 \cdot (N - 1) + A_2]. \quad (56)$$

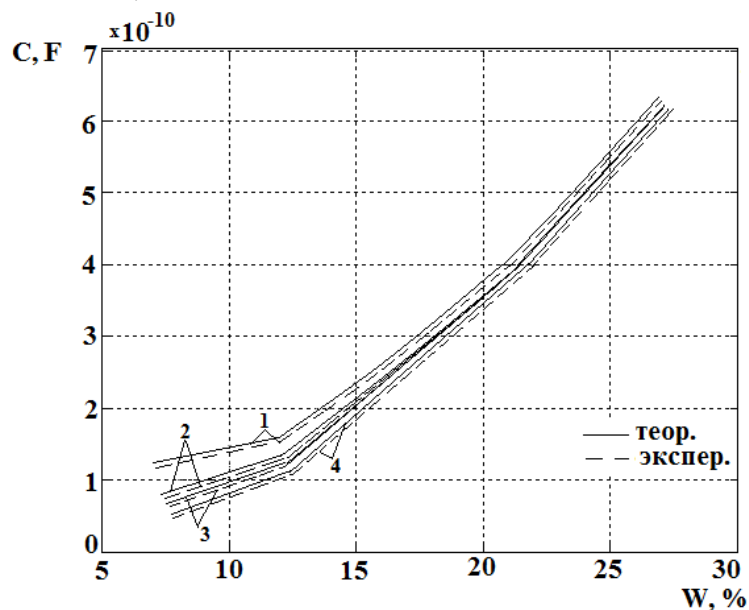
Используя выражение (56) рассчитаны емкости влажочувствительных элементов для влажочувствительных слоев содержащих гетерометаллические комплексные соединения I – IV с помощью пакета прикладных программ «Matlab 7.1».

На рис. 5, 6 представлены теоретические и экспериментальные зависимости емкости влажочувствительного элемента содержащего комплексные соединения от относительной влажности воздуха в диапазоне  $7 \div 27\%$  и  $30 \div 95\%$ , соответственно.

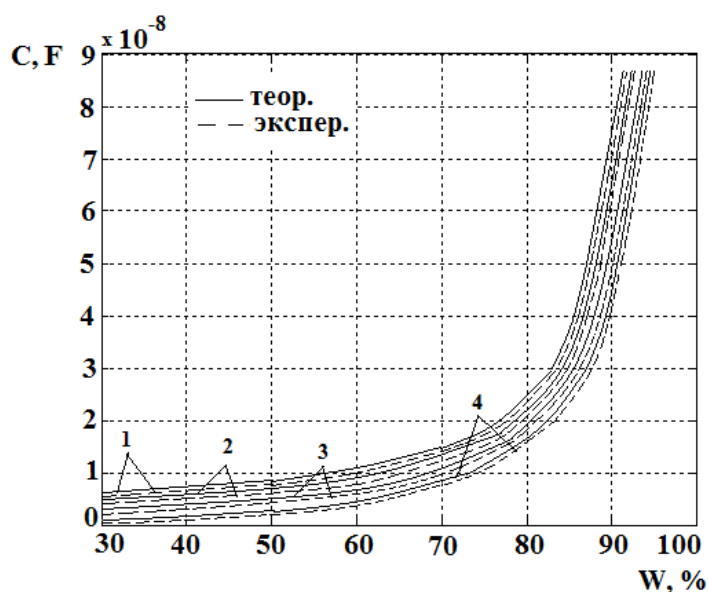
Экспериментальные исследования показали, что в диапазоне влажности от 7 до 27% более чувствительным является емкостный элемент изготовленный на основе гетерометаллического комплексного соединения II, которое содержит два атома сурьмы, чувствительность такого элемента равна 285 pF/%. В диапазоне относительной влажности  $30 \div 75\%$  зависимость емкости от относительной влажности практически линейная, а чувствительность равна 135 pF/%. Что касается диапазона  $75 \div 95\%$ , то в этом интервале наблюдается резкое увеличение чувствительности вплоть до 450 pF/% для всех емкостных элементов разработанных на основе гетерометаллических комплексных



соединений I – IV. Как видно из графика, теоретические и экспериментальные зависимости имеют хорошее совпадение. Относительная погрешность составляет  $\pm 3,5\%$ .



**Рис. 5. Теоретические и экспериментальные зависимости емкости от относительной влажности воздуха в диапазоне  $7 \div 27\%$  для влагочувствительных элементов, разработанных на основе комплексных соединений: 1 - III; 2 - IV; 3 - I; 4 – II**



**Рис. 6. Теоретические и экспериментальные зависимости емкости от относительной влажности воздуха в диапазоне  $30 \div 95\%$  для влагочувствительных элементов, разработанных на основе комплексных соединений: 1 - III; 2 - IV; 3 - I; 4 – II**

### Выводы

В представленной работе приведены результаты разработки микроэлектронных сорбционных сенсоров влажности.



Емкостные сенсоры влажности разработаны на ситалловых подложках размером  $0,7 \times 0,9$  см, на поверхности которых нанесена пленка меди, которая образует обкладки конденсатора в виде меандра с соответствующей геометрией  $7,85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1,2 \cdot 10^{-6}$  м. Влагодчувствительными слоями сенсоров являются гигроскопические соли NaCl или BaCl<sub>2</sub>. Экспериментальные исследования показали, что при увеличении количества слоев нанесенной соли расширяется диапазон изменения емкости сенсоров.

Экспериментально доказано, что создание полимерного покрытия в качестве защитного слоя, с целью предотвращения выпадения точки росы, уменьшает диапазон изменения емкости сенсоров.

Установлено, что в диапазоне влажности  $7 \div 27\%$  более чувствительным является емкостный элемент разработанный с использованием сурьмусодержащего диоксимата никеля (II), который содержит два атома сурьмы, его чувствительность равна 285 pF/%. В диапазоне  $75 \div 95\%$  наблюдается резкое увеличение чувствительности сенсоров до 450 pF/% не зависимо от соотношения атомов сурьмы или висмута к никелю, которые входят в состав гетерометаллических комплексных соединений. Таким образом, на чувствительность сенсора существенно влияет природа комплексного соединения.

В данной работе теоретически, с помощью физико-математических моделей емкостных влагодчувствительных элементов, и экспериментально доказана зависимость емкости влагодчувствительных элементов от изменения влажности воздуха и показано, что они могут быть использованы на практике.

Полученные теоретические и экспериментальные данные имеют хорошее совпадение.





## *Литература*

### *Глава 1:*

1. Никифоров А.А. Наука XXI: Теоретика трансформ-проектирования превентивных программ прогресс-управления ускорением развития роботостроения. – Глава 1 кол. монографии. – С. 7-48, 226-230. // Информационно-коммуникационные технологии в управлении: *монография* [авт.кол.: Косолапов А.А. и др.]. – Одесса: Куприенко СВ, 2015. – 245с.
2. Никифоров А.А. Прогрессономика: Quo Vadis Homo Scientum Futurorum? (Куда/как идешь, Человек Научного Знания Предвиденья Будущего?). – Глава 1 кол. монографии. - В 2-х книгах. – Кн. 1. – С. 8-66. // Инновационные подходы к развитию техники и технологий: *монография* [авт.кол.: Антонов В.М. и др.]. – Одесса: Куприенко СВ, 2015. – 172с.
3. Никифоров А.А. Наука Зазеркалья: Град инновинга Лапута. – Глава 1 кол. монографии. - В 3-х книгах. – Кн. 1. – С. 8-56. // Наука и инновации в современном мире: техника и технологии: *монография* [авт.кол.: Львович И.Я. и др.]. – Одесса: Куприенко СВ, 2017. – 162с.
4. Никифоров А.А. Программирование жизненных циклов в задачах НИОКР САПР(СОИТ): Ретроспектива и перспективы // Научный взгляд в будущее. – Вып. 2(2). Том 2. Технические науки. ЦИТ: n216-093. – Одесса: Куприенко СВ, 2016. – С. 42-56.
5. Генцен Г. Исследования логических выводов // Математическая теория логического вывода. - М.: Наука, 1967. - С. 9-76.
6. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. - М.: Мир, 1971. - 400 с.
7. Sato M. Theory of Hyperfunctions. I, II. - Journal of the Faculty of Science, University of Tokyo. Sect. 1. Part I. -1959, 8 (1): 139–193; Part I. -1960, 8 (2): 387–437.
8. Шапира П. Теория гиперфункций. - М.: Мир, 1972. - 155 с.
9. Фельдбаум А.А. О проблемах теории дуального управления (Доклад, 2-й Междунар. конгресс ИФАК) – М.: ВИНТИ, 1963. – 30с.
10. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Наука, 1966. – 623с.

### *Глава 2:*

1. Козлов А. С. Проектирование и исследование бизнес-процессов. - М.: Флинта, 2006. - 250 с.
2. Крылов Е. В. Техника разработки программ. В 2-х книгах. Книга 2. Технология, надежность и качество программного обеспечения. - М.: Высшая школа, 2008. - 381 с.
3. Мещеряков С. В., Иванов В. М. Эффективные технологии создания информационных систем. - М.: Политехника, 2005. - 321 с.
4. Репин В. В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. - М.: РИА "Стандарты и качество", 2008. - 252 с.
5. Рудаков А. В. Технология разработки программных продуктов. - М.: Академия, 2005. - 214 с.
6. Сгибнев А. В. Информационные технологии и реинжиниринг бизнес-процессов в российских условиях. - М.: КомКнига, 2005. - 94 с.
7. Терехов А. Н. Технология программирования. - М.: ИНТУИТ, 2007. - 56 с.
8. Титоренко Г. А. Автоматизированные информационные технологии в



экономике: Учебник. - М.: ЮНИТИ, 2005. - 301 с.

9. Шандров Б. В., Чудаков А. Д. Технические средства автоматизации. - М.: Академия, 2007. - 307 с.

*Глава 3:*

1. Баркан М.Ш., Чиненкова М.И. Технология извлечения драгоценных металлов из отходов электротехники [Электронный ресурс]. Режим выборки:

<http://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=233>

2. Погорелый А.Д. Теория металлургических процессов. М.: Металлургия, 1971, 504 с.

3. Уткин Н.И. Металлургия цветных металлов. М.: Металлургия, 1986. 438 с.

4. Лёгкие цветные металлы и сплавы. Справочник. Т2. Тихонов Б.С., Под общей ред. Подвишенского С.Н., Теслицкой М.В.-М.: ЦНИИЭИЦМ, 1999. 256 с.

5. Тяжёлые цветные металлы и сплавы. Справочник. Т1. Тихонов Б.С., под общей редакцией Подвишенского С.Н., М.: ЦНИИЭИЦМ, 1999 Ил.: 60. 452 с.

6. Тугоплавкие металлы, их сплавы и соединения. Справочник. Т III. Никерова Л.Н., Таужнянская З.А., Доронина Л.Н., Кручер Г.Н. Под общей ред. Подвишенского С.Н., Теслицкой М.В. М.: ЦНИИЭИЦМ, 2001. Табл. 586. 484 с.

7. Котляр Ю.А., Меретуков М.А. Металлургия благородных металлов. М.: АСМИ. 2002. илл. 302. табл. 228. 466 с.

8. Романтиев Ю.П. Металлургия благородных металлов. М.: МИСиС, 2007.- 259 с.

9. Зеликман А.Н., Металлургия редких металлов. М.: Металлургия. 1964.

10. Зырянов М.Н., Рассеянные редкие элементы. Иркутск: Книжное изд-во, 1960.

*Глава 4:*

1. Подлепецкий Б. И., Симаков А. Б. Микроэлектронные датчики влажности // Сборник обзоров. Зарубежная электронная техника. – 1987. – № 2(309). – С. 64 – 97.

2. Zhi Chen, Chi Lu. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms // Sensor Letters. – 2005. – Vol. 3, – P. 274 – 295; doi: 10.1166/sl.2005.045.

3. Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive // Sensors. – 2014. – № 14. – P. 7881 – 7939; doi: 10.3390/s140507881.

4. Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman. Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca, Mg, Fe, Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption // Sensors. – 2016. – № 16. – P. 1135; doi: 10.3390/s16071135.

5. Mario Pelino, Carlo Cantalini. Principles and applications of ceramic humidity sensors // Active and Passive Elec. Comp. – 1994. – Vol. 16, – P. 69 – 87.

6. Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor // Journal of microelectromechanical system. – february 2010. – Vol. 19, – № 1. – P.183 –191; doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036584.

7. Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes // Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical. – 30 March 2006. – Vol. 114, –



№ 1. – Р. 254 – 262.

8. Бутурлин А. И., Крутоверцев С. А., Чистяков Ю. Д. Микроэлектронные датчики влажности // Сборник обзоров. Зарубежная электронная техника. – 1984. – № 9. – С. 3 – 54.

9. Бабаян Р. Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом // Приборы и системы управления. – 1996. – № 11. – С. 24 – 26.

10. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В. Сенсори вологості: монографія [Текст]. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2003. – 208 с.

11. Маргелов А. Датчики влажности компании Honeywell // Chip News. – 2005. – № 8(101). – С. 40 – 42.

12. Бугров А. В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. – М.: Машиностроение, 1982. – 94 с.

13. Виглеб Т. Датчики. – М.: Мир, 1989. – 196 с.

14. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики: справочник. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.

15. Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М., Воробьев А. А., Тареев Б. М. Теория диэлектриков. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 344 с.

16. Аш Ж. Датчики измерительных систем. – М.: Мир, 1992. – 424 с.

17. Березин А. С., Мочалкина О. Р. Технология и конструирование интегральных микросхем: учебн. пособие [для вузов]. – М.: Радио и связь, 1983. – 232 с.

18. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В., Євсєєва М. В. Дослідження ємнісних вологочутливих елементів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – №5. – С. 65 – 71.

19. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В., Євсєєва М. В. Ємнісний сенсор вологості гребінцевої структури на основі полімерних матеріалів // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 2(12). – С. 222 – 227.

20. Гандзий М. В., Цапков В. И., Самусь Н. М. Сурьму- или висмутсодержащие диоксиматы никеля (II) или меди (II) // Журнал неорганической химии. – 1991. – Т. 36, вып. 9. – С. 2297–2300.

21. Осадчук О. В., Крилик Л. В., Євсєєва М. В. Ємнісні сенсори вологості на основі стибій- або бісмутвмісних діоксиматів ніколу (II) // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 1(221). – С. 131 – 135.

22. Верещагин А. Н. Поляризуемость молекул. – М.: Наука, 1980. – 177 с.

23. Вилков Л. В., Пентин Ю. А. Физические методы исследования в химии. – М.: Высшая школа, 1987. – 376 с.

#### *Глава 5:*

1. Араб-Оглы Э. Кибернетика и моделирование социальных процессов// Кибернетика ожидаемая. Кибернетика неожиданная. — М.: Наука, 1968.— С. 152-167.

2. Винер Н. Кибернетика: или управление и связь в животном и машине. — М.: Советское радио, 1968. — 326 с.

3. Ефремов И.А. Дорога ветров. Гобийские заметки. М.: Учпедгиз. 1958. — 630 с.

4. Флоренсов Н.А. Скульптуры земной поверхности. М.: Наука, 1983. — 174 с.

5. Ананьев Г. С. Динамическая геоморфология.— М.: Изд-во МГУ, 1999.— 427 с.

6. Пржевальский Н. М. Путешествие к Лобнору и на Тибет. М.: Дрофа. 2007. — 1264 с.