



НАУЧНЫЙ  
ФОРУМ  
nauchforum.ru

ISSN: 2541-8394



№1(30)

# НАУЧНЫЙ ФОРУМ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

МОСКВА, 2020



# НАУЧНЫЙ ФОРУМ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Сборник статей по материалам XXX международной  
научно-практической конференции*

№ 1 (30)  
Январь 2020 г.

Издается с декабря 2016 года

Москва  
2020

УДК 51/53+62

ББК 22+3

Н34

Председатель редколлегии:

*Лебедева Надежда Анатольевна* – доктор философии в области культурологии, профессор философии Международной кадровой академии, г. Киев, член Евразийской Академии Телевидения и Радио.

Редакционная коллегия:

*Ахмеднабиев Расул Магомедович* – канд. техн. наук, доц. кафедры строительных материалов Полтавского инженерно-строительного института, Украина, г. Полтава;

*Данилов Олег Сергеевич* – канд. техн. наук, научный сотрудник Дальневосточного федерального университета;

*Маршалов Олег Викторович* – канд. техн. наук, начальник учебного отдела филиала ФГАОУ ВО "Южно-Уральский государственный университет" (НИУ), Россия, г. Златоуст.

**Н34 Научный форум: Технические и физико-математические науки:**  
сб. ст. по материалам XXX междунар. науч.-практ. конф. –  
№ 1 (30). – М.: Изд. «МЦНО», 2020. – 60 с.

ISSN 2541-8394

Статьи, принятые к публикации, размещаются на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

ISSN 2541-8394

ББК 22+3

© «МЦНО», 2020

## **Оглавление**

<b>Раздел 1. Технические науки</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Авиационная и ракетно-космическая техника</b>	<b>5</b>
ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОГРАВИТАЦИИ Аревков Максим Андреевич Бузиков Руслан Александрович Воронков Александр Евгеньевич	5
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ Аревков Максим Андреевич Бузиков Руслан Александрович Воронков Александр Евгеньевич	12
<b>1.2. Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы</b>	<b>18</b>
ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОВЕРОЧНАЯ СХЕМА ДЛЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ Биккулов Вадим Шамилевич Кондаков Александр Викторович	18
<b>1.3. Химическая технология</b>	<b>25</b>
ИННОВАЦИИ В СОВМЕЩЕННЫХ РЕАКЦИОННО- МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ Каримова Талия Рафаэлевна Гариева Фаузия Равильевна	25
<b>Физико-математические науки</b>	<b>29</b>
<b>Раздел 2. Математика</b>	<b>29</b>
<b>2.1. Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление</b>	<b>29</b>
ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В УПРАВЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАДЗОРНЫХ ОРГАНОВ МЧС РОССИИ Липчевская Анастасия Николаевна	29

<b>Раздел 3. Физика</b>	<b>35</b>
<b>3.1. Оптика</b>	<b>35</b>
АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ZnSe, As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> , BaF <sub>2</sub> , PbF <sub>2</sub> , GeTe	35
Котликов Евгений Николаевич	
Новикова Юлиана Александровна	
Терещенко Георгий Викторович	
<b>3.2. Физика магнитных явлений</b>	<b>51</b>
ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ФИЗИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ	51
Закиев Денис Даутказыевич	
Маргин Андрей Николаевич	
Крутских Николай Алексеевич	
Алибеков Сергей Якубович	

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

### **РАЗДЕЛ 1.**

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

### **1.1. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

#### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОГРАВИТАЦИИ**

***Ареков Максим Андреевич***

*ассистент,  
Амурский государственный университет,  
РФ, г. Благовещенск*

***Бузиков Руслан Александрович***

*студент,  
Амурский государственный университет,  
РФ, г. Благовещенск*

***Воронков Александр Евгеньевич***

*студент,  
Амурский государственный университет,  
РФ, г. Благовещенск*

#### **SPACECRAFT ENGINEERING FOR MICROGRAVITY RESEARCH**

***Maxim Arevkov***

*Assistant,  
Amur State University,  
Russia, Blagoveshchensk.*

**Ruslan Buzikov**

*Student,  
Amur State University,  
Russia, Blagoveshchensk.*

**Alexander Voronkov**

*Student,  
Amur State University,  
Russia, Blagoveshchensk*

**Аннотация.** Выращивание белковых кристаллов является перспективным ответвлением современной науки. Изучение структуры белковых кристаллов позволит разработать новые разновидности лекарственных препаратов. Проанализировать их структуру возможно с помощью рентгеновского и нейтронного излучения. Для более совершенной кристаллической решетки, белковые кристаллы необходимо выращивать в условиях микрогравитации.

Для решения этой задачи был спроектирован космический аппарат, состоящих из технологического и транспортно – энергетического модуля, который необходимо вывести на орбиту Земли.

**Abstract.** The cultivation of protein crystals is a promising branch of modern science. The study of the structure of protein crystals will allow to develop new varieties of drugs. It is possible to analyze their structure by means of X-ray and neutron radiation. For a better crystal lattice, protein crystals should be grown in microgravity conditions.

To solve this problem, a spacecraft consisting of a technological and transport - energy module, which should be put into orbit of the Earth, was designed.

**Ключевые слова:** микрогравитация; микроускорения; стыковочный агрегат; конус стыковки; спускаемый аппарат; технологический модуль.

**Keywords:** microgravity; microacceleration; docking module; connecting cone; lander; technological module.

Для более глубокого понимания работы человеческого организма необходимо изучить его белковую структуру. Это возможно осуществить рентгеновским методом, но для его применения обязательны кристаллические образцы. На Земле белковые кристаллы можно получить в скрининговых машинах, в которых белок кристаллизуется при определенных, заранее установленных параметрах. Проблемой земного метода является сложность задания правильных условий роста

кристаллов. Вследствие чего кристаллы, выращенные на Земле, получают малых размеров и с неоднородной кристаллической решеткой. Для получения более совершенных кристаллов рационально их выращивать в условиях микрогравитации.

Микрогравитация – это состояние, при котором ускорение, вызванное гравитацией, очень мало, а гравитационная сила постоянна. Чтобы достичь такого состояния, необходимо вывести космический аппарат на орбиту.

Помешать возникновению микрогравитации могут два типа факторов.

К первому типу относятся: сопротивление атмосферы планеты, неоднородность гравитационного поля, возмущение орбиты космического аппарата из-за влияния небесных тел и другие.

Ко второму типу относятся: вибрации космического аппарата (солнечные панели, радиоантенны), функционирование бортовой системы (системы ориентации, вентиляции, двигатели ...).

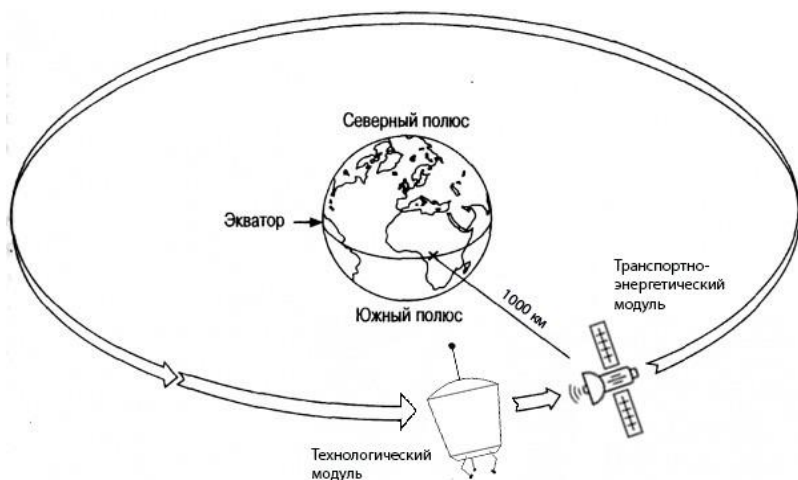
Цель данной статьи рассказать о конструкции космического аппарата, на котором возможно выращивание белковых кристаллов в условиях микрогравитации.

Концепция космического аппарата для достижения низкого уровня остаточных микроускорений предполагает использование двух модулей:

1. Технологический модуль – это небольшой спутник с печью для выращивания кристаллов, с минимальной системой питания и пассивной системой гравитационной стабилизации. В этом случае он имеет малые габариты, высокую удельную массу и симметричную несложную форму. Использование гравитационной стабилизации позволяет отказаться от двигателя в составе технологического блока. При этом исключается влияние на микрогравитационное состояние работающих двигателей и зависимость положения центра масс технологического блока от уменьшения объема топлива в бортовых баках. Симметричная форма упрощает размещение зоны кристаллизации в центре масс. В результате уровень как внешних, так и собственных остаточных микроускорений, можно будет снизить до минимума.

2. Транспортно – энергетический модуль, выполняющий функции управления системой и производства энергии для осуществления технологических процессов. Данный модуль находится на относительно небольшом расстоянии от технологического модуля, а передача энергии осуществляется с помощью сфокусированного лазерного луча. Давление такого излучения при предполагаемых уровнях мощности не превышает естественного давления солнечного света и поэтому не вызывает дополнительных возмущений движения технологического модуля.





**Рисунок 1. Концептуальная схема космической системы**

Так как объектом эксперимента являются кристаллы, получаемые на борту технологического модуля, а транспортно-энергетический модуль выполняет функции обеспечения технологического модуля, то в данной статье будет рассматриваться именно технологический модуль, к которому предъявляются высокие требования по компоновке.

При проектировании космического аппарата были поставлены следующие задачи:

1. Минимизировать массу космического аппарата;
2. Разместить целевую аппаратуру в центре масс космического аппарата;
3. Минимизировать собственные вибрации космического аппарата и их влияния на целевую аппаратуру;
4. Измерение остаточных микроускорений;
5. Доставка на Землю полученных белковых кристаллов для дальнейшего исследования.

В модуле целесообразно использовать наименее массивную, надежную и малоэнергоёмкую аппаратуру. В качестве оборудования для выращивания кристаллов, была выбрана печь «Белка». Печь располагается в центре масс технологического модуля, для обеспечения минимального влияния остаточных микроускорений. Для подавления вибрационных микроускорений с частотой более 1 Гц оборудование будет располагаться на виброзащитной платформе, которая соединена

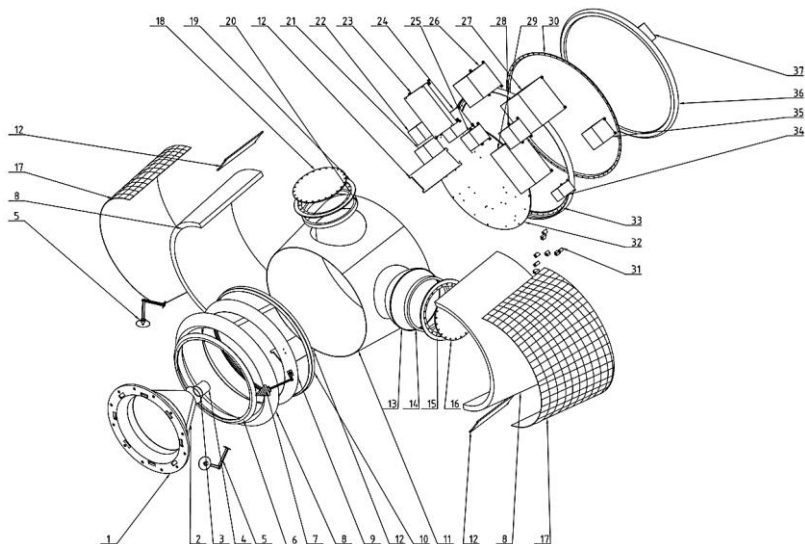
с основанием с помощью виброизолирующих узлов, выполненных по схеме «пружинный крест». За счет пассивной гравитационной стабилизации можно отказаться от бортовых систем ориентации и стабилизации, что существенно упростит конструкцию космического аппарата и, соответственно, уменьшит влияние внутренних факторов на уровень микроускорений. Энергию модуль будет получать через фотоэлектрические преобразователи от транспортно-энергетического модуля. Для контроля уровня микрогравитации используется аппарат для контроля состояния и компенсации микроускорений. В модуль так же будет установлена бортовая аппаратура: бортовой комплекс управления, аккумуляторные батареи, бортовой радиокomплекс. Для возвращения образцов на Землю будет установлена парашютная система.

С целью уменьшения микроускорений, спускаемый аппарат не имеет собственных двигательных установок, следовательно, не может осуществить возврат на Землю. Для спуска технологического модуля будем использовать транспортно-энергетический модуль с разгонным блоком. Для возможности захвата, проектируемого космического аппарата, на нем будет установлено стыковочное устройство «конус» системы «штырь-конус». Установка бортового радиотехнического комплекса «Курс» обеспечит автоматическую стыковку на орбите.

Для возвращения технологического модуля на Землю нужно обеспечить его прохождение через плотные слои атмосферы и гарантировать модулю «мягкую посадку». На высотах 5 – 10 км будет пролегать граница участков спуска и приземления. Для защиты модуля от перегрева устанавливается абляционная защита, которая допускает разрушение внешнего слоя и частичный унос массы тепловой защиты. Помимо установленных на борту модуля радиотехнических средств для поиска и обнаружения, ориентиром для визуального обнаружения в светлое время суток будет парашют, а в ночное время – светопульсные маяки.

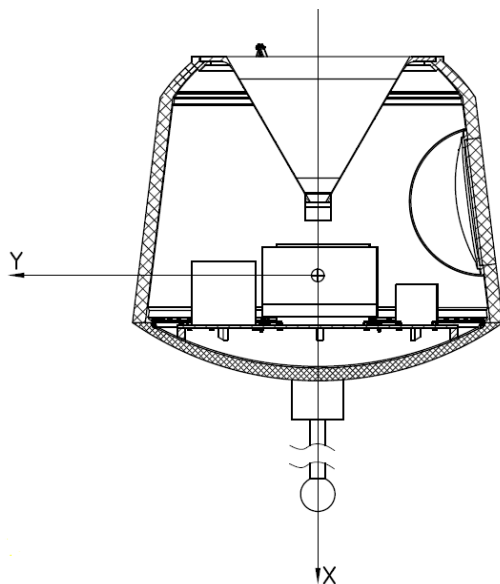
Для скользящего спуска (спуск с малым аэродинамическим качеством для снижения перегрузки и обеспечения точной посадки) будет применяться сегментальная форма модуля.

Исходя из вышеперечисленных критериев, был спроектирован следующий космический аппарат:



**Рисунок 2. Схема членения космического аппарата**

1 – Шпангоут стыковочного конуса; 2 – Обечайка конуса; 3 – Нижний шпангоут стыковочного конуса; 4 – Стакан конуса; 5 – Антенно-фидерное устройство системы «Курс»; 6 – Шпангоут для конуса; 7 – Антенно-фидерное устройство; 8 – Теплозащитное покрытие; 9 – Верхняя обечайка; 10 – Верхний шпангоут; 11 – Обечайка; 12- Радиатор; 13 – Обечайка парашютного отсека; 14 – Юбка парашютного отсека; 15 – Шпангоут парашютного отсека; 16 – Крышка парашютного отсека; 17 – Фотоэлектрический преобразователь; 18 – Крышка люка лаза; 19 – Шпангоут для люка лаза; 20 – Юбка люка лаза; 21 – Телеметрический комплекс; 22 – Аккумуляторная батарея; 23 – Виброзащитная платформа; 24 – Комплекс контроля состояния и компенсации микроускорений; 25 – Блок питания и управления; 26 – Акселерометр; 27 – Блок управления печкой «Белка»; 28 – Бортовой комплекс управления; 29 – Блок кристаллизации «Белка»; 30 – Днище; 31 – Уголки для приборной панели; 32 – Приборная панель; 33 – Нижний шпангоут; 34 – Система сближения «Курс»; 35 – Бортовой радиокомплекс; 36 – Тепловой щит; 37 – Система гравитационной стабилизации.



**Рисунок 3. Компоновка космического аппарата**

### Список литературы:

1. Куранова И.П. Кристаллизация белков на Земле и в невесомости. Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2004 № 6.
2. В.С. Земсков, М.Р. Раухман, В.П. Шалимов, Р.К. Чуян, Л.А. Квасников, А.П. Смахтин, А.Б. Грехнев, В.Л. Саввин, Г.Ф. Реш, Ги Пиньоле. Специализированные малые спутники с беспроводной передачей энергии – перспективы для выращивания монокристаллов в космосе. Сборник трудов VII Российского симпозиума Механика в невесомости. Итоги и перспективы физических исследований гравитационно-чувствительных систем, М., РАН, 2001.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

**Аревкин Максим Андреевич**

ассистент,  
Амурский государственный университет,  
РФ, г. Благовещенск

**Бузинов Руслан Александрович**

студент,  
Амурский государственный университет,  
РФ, г. Благовещенск

**Воронков Александр Евгеньевич**

студент,  
Амурский государственный университет,  
РФ, г. Благовещенск

## DETERMINATION OF THE STABILITY RESERVE OF THE LAUNCH VEHICLE MODEL

**Maxim Arevkov**

Assistant,  
Amur State University,  
Russia, Blagoveshchensk

**Ruslan Buzikov**

Student,  
Amur State University,  
Russia, Blagoveshchensk

**Alexander Voronkov**

Student, Amur State University,  
Russia, Blagoveshchensk

**Аннотация.** Одной из востребованных задач, решаемых при постройке ракет, является стабилизация, т. е. обеспечение устойчивого полета по необходимой траектории. Устойчивость модели ракеты – это способность возвращаться в положение равновесия, при его нарушении внешними силами.

**Abstract.** One of the required problems to be solved in the design of model rockets is stability, that is ensuring a stable flight on the required trajectory. Stability of the model rocket is the ability to return to the equilibrium position when it is disturbed by external forces.

**Ключевые слова:** модель ракеты; устойчивость; твердотопливный ракетный двигатель; центр тяжести; центр давления.

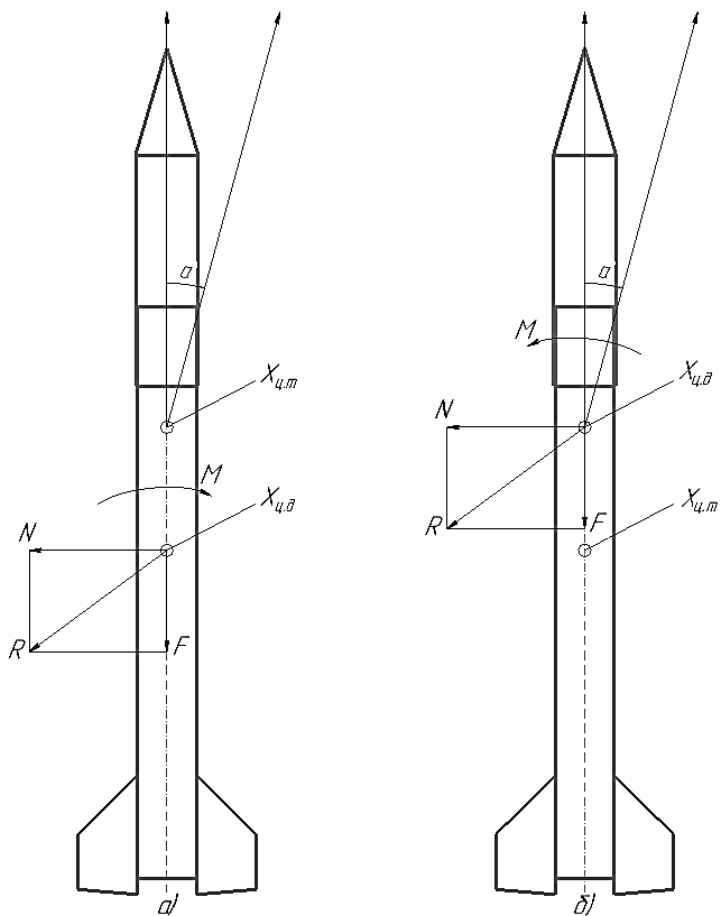
**Keywords:** model rockets; stability; solid rocket motors; centre of gravity; centre of pressure.

Цель исследования: определить запас устойчивости модели ракеты-носителя, построенной на тематической смене «Морской старт» в ВДЦ «Океан».

В данном исследовании использован аэродинамический метод обеспечения устойчивости. Суть этого метода заключается в изменении аэродинамических сил, действующих на модель ракеты в полёте. Аэродинамическая устойчивость зависит от взаимного расположения центра тяжести (ц.т.) и центра давления (ц.д.).

Предположим, что в нашем распоряжении две ракеты. Первая (рисунок 1.а) выполнена таким образом, что ее ц. д. находится впереди ц.т., а у второй (рисунок 1.б) ц.д. расположен позади ц.т. Допустим, что под действием возмущающих сил эти ракеты повернулись вокруг ц.т. на одинаковый угол. Рассмотрим, как будет вести себя каждая из моделей ракет. При изменении угла атаки ракеты, в ц.д. появится аэродинамическая сила  $R$ , которую можно разложить на две силы: осевую –  $F$  и нормальную  $N$ . Так как осевая сила  $F$  проходит через ц.т., то никакого момента относительно ц.т. она не создает. Нормальная сила создает относительно ц.т. момент  $M$ , действие которого для первой ракеты направлено на увеличение угла атаки, а для второй ракеты для уменьшения угла атаки до начального положения. Такой момент  $M$  называется стабилизирующим. Ракета (рисунок 1.а) является неустойчивой так, как под действием момента  $M$ , ракета будет увеличивать угол атаки и изменять свою траекторию, что является недопустимым. Ракета (рисунок 1.б) является устойчивой так, как под действием момента  $M$ , ракета будет уменьшать угол атаки до первоначального и придерживаться заданной траектории.

Можно сделать вывод, что аэродинамическая стабилизация обеспечивается только в том случае, когда ц.д. расположен сзади ц.т. ракеты.

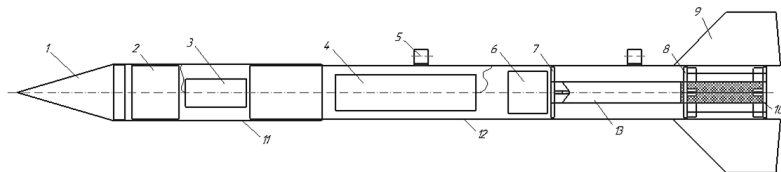


Примечание: а – модель устойчивая в полете; б – модель неустойчивая в полете.

**Рисунок 1. Влияние взаимного расположения ц. т. и ц. д. на устойчивость модели ракеты**

Задачей данной модели ракеты-носителя является вывод полезной нагрузки на высоту 80-150 метров.

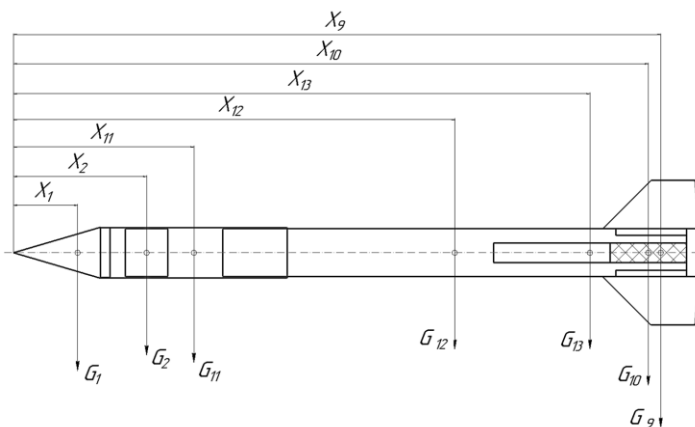
Чертеж модели ракеты представлен на рисунке 2.



Примечание: 1 – конусообразный обтекатель; 2 – полезная нагрузка; 3 – парашют отсека полезной нагрузки; 4 – парашют модели ракеты-носителя; 5 – направляющие; 6 – пыж; 7 – якорь; 8 – штангоуты; 9 – стабилизаторы; 10 – РДТГ; 11 – отсек полезной нагрузки; 12 – корпус модели ракеты-носителя; 13 – отсек для установки двигателя.

**Рисунок 2. Модель ракеты**

Определение положения центра тяжести ракеты-носителя из распределительного свойства центров тяжести.



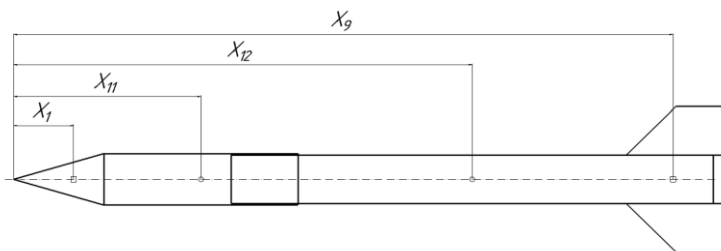
**Рисунок 3. Чертеж модели ракеты для определения центра тяжести**

В расчете пренебрегаем элементами ракеты-носителя с незначительной массой.

$$X_{ц.т} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i X_i}{\sum_{i=1}^n G_i} = \frac{G_1 X_1 + G_2 X_2 + G_{11} X_{11} + G_{12} X_{12} + G_{13} X_{13} + G_{10} X_{10} + G_9 X_9}{G_1 + G_2 + G_{11} + G_{12} + G_{13} + G_{10} + G_9} = 477 \text{ мм}$$



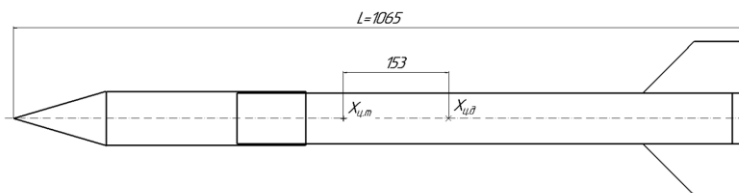
Определение положения центра давления ракеты-носителя методом площадей.



**Рисунок 4. Чертеж модели ракеты для определения центра давления**

$$X_{ц.д} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i X_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{A_1 X_1 + A_{11} X_{11} + A_{12} X_{12} + A_9 X_9}{A_1 + A_{11} + A_{12} + A_9} = 632 \text{ мм}$$

Вычисление запаса устойчивости.



**Рисунок 5. Чертеж модели ракеты для определения запаса устойчивости**

$$S = \frac{X_{ц.д} - X_{ц.г.}}{L} \cdot 100\% = 14.5\%$$

Исходя из данных расчетов видно, что исследуемая модель ракеты является устойчивой. Запас устойчивости лежит в допустимых пределах.

Также рассчитаем высоту полёта модели.

Для расчета высоты полёта модели ракеты будем использовать баллистические уравнения, с помощью которых можно приближенно, но довольно точно определить числовое значение.

Для расчета понадобятся характеристики двигателя.

Был использован твердотопливный ракетный двигатель (РДТТ) от компании Real Rockets, со следующими техническими характеристиками:

**Таблица 1.**

**Технические характеристики РД1-50-5М**

Вес, г.	Время работы, с.	Средняя тяга, Н.	Суммарный импульс, Н·с.
109	1.8	30	45-50

Максимальная высота полета модели ракеты — это сумма высоты активного и пассивного участков полёта:

$$H_{\max} = h_{\text{актив.}} + h_{\text{пассив.}} \approx 88.07 \text{ м};$$

$$h_{\text{актив.}} = 0.5 \cdot a_{\text{ср}} \cdot t^2 = 42.2 \text{ м};$$

$$a_{\text{ср}} = \frac{a_{\min} + a_{\max}}{2} = 26.05 \text{ м/с}^2;$$

$$a_{\min} = \frac{P - m_{\text{модели в момент старта}} \cdot g}{m_{\text{модели в момент старта}}} = 24.4 \text{ м/с}^2;$$

$$a_{\max} = \frac{P - m_{\text{модели в последний момент полета}} \cdot g}{m_{\text{модели в последний момент полета}}} = 27.7 \text{ м/с}^2;$$

$$h_{\text{пассив.}} = \frac{v^2}{2 \cdot g} \approx 45.87 \text{ м}.$$

По результатам расчетов, видно, что требуемая задача по высоте выполняется.

**Список литературы:**

1. Канаев В.И. Ключ – на старт! М., «Молодая гвардия», 1972.
2. Кротов И.В. Модели ракет. Издательство ДОСААФ СССР – Москва, 1979.
3. Рожков В.С. Спортивные модели ракет. Издательство ДОСААФ СССР – Москва, 1984.

## **1.2. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

### **ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОВЕРОЧНАЯ СХЕМА ДЛЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

***Биккулов Вадим Шамилевич***

*инженер,*

*Федеральное государственное унитарное предприятие*

*Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии  
(ФГУП «ВНИИР»),*

*РФ, г. Казань*

***Кондаков Александр Викторович***

*канд. хим. наук,*

*Федеральное государственное унитарное предприятие*

*Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии  
(ФГУП «ВНИИР»),*

*РФ, г. Казань*

### **STATE VERIFICATION SCHEME FOR MEASURING THE LEVEL OF LIQUID AND BULK MATERIALS**

***Vadim Bikkulov***

*Engineer,*

*State scientific metrological center*

*All-Russian Research Institute of Flow Metering,  
Russia, Kazan*

***Aleksandr Kondakov***

*Candidate of chemical Sciences,*

*State scientific metrological center*

*All-Russian Research Institute of Flow Metering,  
Russia, Kazan*

**Аннотация.** Представлено описание иерархической структуры новой государственной поверочной схемы для средств измерений уровня жидкости и сыпучих материалов, разработанной взамен действующей поверочной схемы уровня жидкости – ГОСТ 8.477-82, а также обоснование необходимости разработки новой поверочной схемы.

**Abstract.** A description of the hierarchical structure of the new state verification scheme for measuring the level of liquid and bulk materials, developed instead of the current verification scheme of the liquid level-GOST 8.477-82, as well as the rationale for the development of a new verification scheme.

**Ключевые слова:** измерение уровня; уровнемер; уровень жидкости; уровень сыпучих материалов; поверочная схема.

**Keywords:** level measurement; level gauge; liquid level; bulk material level; verification scheme.

В настоящее время на территории Российской Федерации в качестве поверочной схемы для средств измерений уровня жидкости применяется ГОСТ 8.477-82 (далее – действующая ГПС), который в современной практике передачи единицы уровня имеет ряд недостатков:

- действующая ГПС распространяется на эталоны и средства измерений в диапазоне до 20 м, в то время как более 45 % средств измерений уровня, внесенных в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений (далее – ФИФ ОЕИ), имеют верхнее значение диапазона измерений уровня более 20 метров;
- действующая ГПС не распространяется на средства измерений уровня сыпучих материалов.
- в ФИФ ОЕИ зарегистрированы эталоны с пределами допускаемой абсолютной погрешности от  $\pm 0,1$  мм, в то время как в действующей ГПС эталоны уровня 1-го разряда обозначены с пределами допускаемой абсолютной погрешности от  $\pm 0,3$  мм;
- в действующей ГПС отсутствует метод передачи единицы средств измерений уровня от средств измерений длины, а также от средств измерений массы и давления методом косвенных измерений.

В соответствии с планом разработки и утверждения государственных поверочных схем на 2019 год, утвержденным приказом Росстандарта от 29 декабря 2018 года № 2819, в ФГУП «ВНИИР» разработана новая Государственная поверочная схема для средств измерений уровня жидкости и сыпучих материалов (далее – новая ГПС).

Основанием для разработки новой ГПС является несоответствие существующей поверочной схемы потребностям государства и общества, отраслей промышленности и метрологической практике в измерениях.

Новая ГПС разработана в соответствии с проведенным анализом существующих типов уровнемеров [1] и методик их поверки.

В связи с тем, что поверка средств измерений уровня производится при помощи эталонов и средств измерений из различных государственных поверочных схем, в зависимости от сферы применения средств измерений уровня, было принято решение разделить поверочную схему на три части.

Первую часть новой ГПС (рис.1), возглавляет Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ2-2010 применяемый для передачи единицы уровня рабочим эталонам 1-го разряда.

В первой части новой ГПС применяются эталоны, заимствованные из поверочной схемы длины для передачи единицы уровня эталонам 1-го, 2-го и 3-го разрядов, а также средства измерений.

В качестве эталонов, заимствованных из других поверочных схем применяют рабочие эталоны единицы длины 2, 3 и 4 разряда.

В качестве рабочих эталонов 1-го разряда применяют уровнемерные установки с непосредственным изменением и имитацией изменения уровня жидкости и сыпучих материалов, уровнемеры (датчики уровня, измерители уровня, преобразователи уровня, указатели уровня, системы измерений уровня, измерительные каналы уровня) различного принципа действия, а также линейки измерительные.

Рабочие эталоны 1-го разряда [2] применяют для поверки рабочих эталонов 2-го разряда, а также средств измерений.

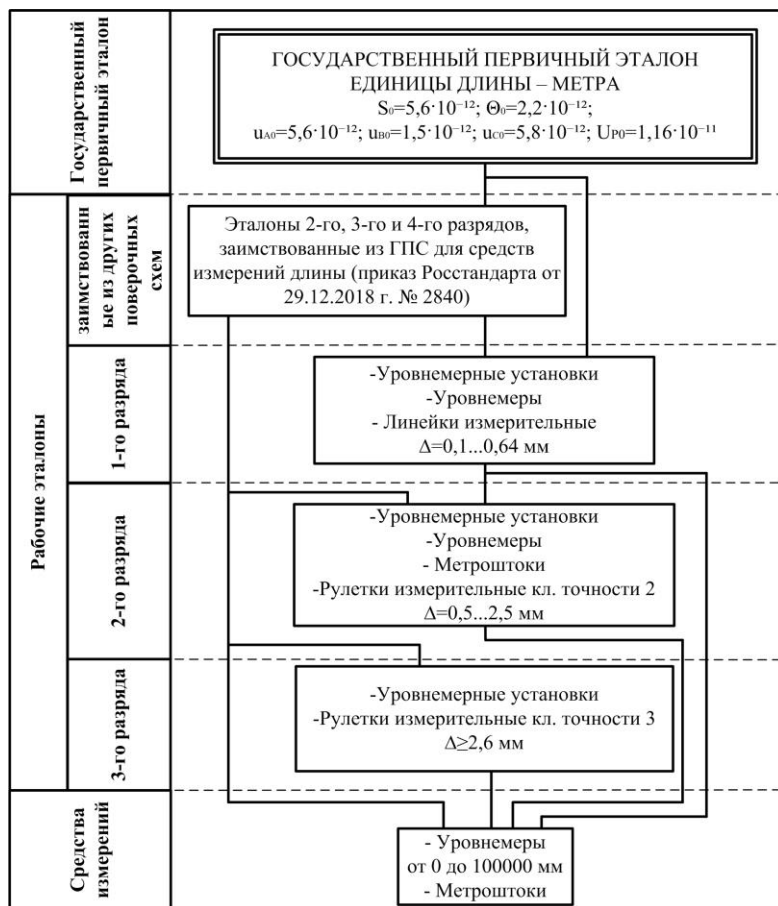
В качестве рабочих эталонов 2-го разряда применяют уровнемерные установки с непосредственным изменением и имитацией изменения уровня жидкости и сыпучих материалов, уровнемеры (датчики уровня, измерители уровня, преобразователи уровня, указатели уровня, системы измерений уровня, измерительные каналы уровня) различного принципа действия, метроштоки (в том числе электронные) и рулетки измерительные второго класса точности.

Рабочие эталоны 2-го разряда применяют для поверки средств измерений.

В качестве рабочих эталонов 3-го разряда применяют уровнемерные установки с непосредственным изменением и имитацией изменения уровня жидкости и сыпучих материалов и рулетки измерительные третьего класса точности.

Рабочие эталоны 3-го разряда применяют для поверки средств измерений.

В качестве средств измерений применяют уровнемеры различного принципа действия и метроштоки (в том числе электронные).



**Рисунок 1. Обобщенная схема первой части государственной поверочной схемы для средств измерений уровня жидкости и сыпучих материалов**

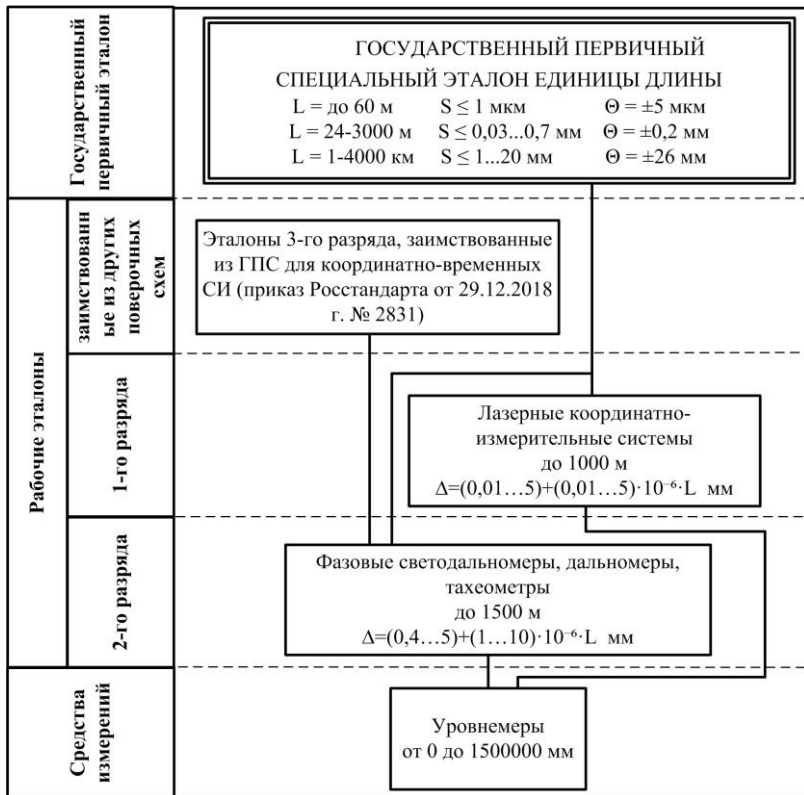
Вторую часть новой ГПС (рис.2), возглавляет Государственный специальный эталон единицы длины ГЭТ199-2018, применяемый для передачи единицы уровня рабочим эталонам 1-го и 2-го разряда.

Во второй части новой ГПС также применяются эталоны, заимствованные из других поверочных схем - рабочие эталоны приращения координат 3-го разряда из поверочной схемы для координатно-временных средств измерений.

В качестве рабочих эталонов 1-го разряда применяют лазерные координатно-измерительные системы до 1000 м.

В качестве рабочих эталонов 2-го разряда применяют фазовые светодальномеры, дальнометры и тахеометры до 1500 м.

В качестве средств измерений применяют уровнемеры различного принципа действия.



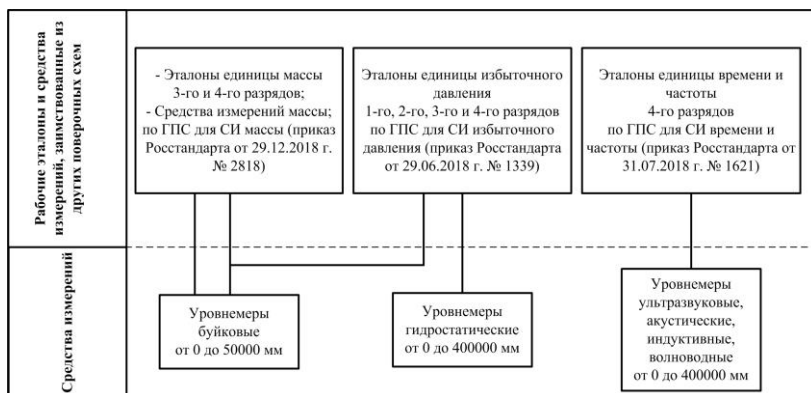
**Рисунок 2. Обобщенная схема второй части государственной поверочной схемы для средств измерений уровня жидкости и сыпучих материалов**

Третью часть новой ГПС (рис.3), возглавляют эталоны и средства измерений, заимствованных из других поверочных схем, которые применяют для передачи единицы уровня средствам измерений методом косвенных измерений.

В качестве эталонов и средств измерений, заимствованных из других поверочных схем применяют:

- рабочие эталоны единицы массы 3 и 4 разряда, в том числе средства измерений массы;
- рабочие эталоны единицы избыточного давления 1, 2, 3 и 4 разряда;
- рабочие эталоны единицы времени и частоты 4 разряда;

В качестве средств измерений применяют уровнемеры буйковые, гидростатические, ультразвуковые, акустические, индуктивные и волноводные.



**Рисунок 3. Обобщенная схема третьей части государственной поверочной схемы для средств измерений уровня жидкости и сыпучих материалов**

Новая ГПС распространяется на:

- эталоны и средства измерений уровня в диапазоне до 1500 метров.
- средства измерений уровня, в том числе сыпучих материалов [3], которые составляют порядка 25% от утвержденных типов средств измерений уровня в период с 2017 по 2018 год.
- уровнемерные установки с пределами допускаемых абсолютных погрешностей от  $\pm 0,1$  мм и средства измерений уровня с пределами допускаемых абсолютных погрешностей от  $\pm 0,4$  мм.

Новая ГПС позволят передавать единицу величины эталонам и средствам измерений уровня от эталонов и средств измерений длины, а также от эталонов и средств измерений массы, давления, времени и частоты методом косвенных измерений.

Планируемая дата введения в действие новой ГПС - 1 января 2020 года.



**Список литературы:**

1. Биккулов В.Ш., Кондаков А.В. Уровнемеры, применяемые в сфере государственного обеспечения единства измерений // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2017. № 12. С. 16-17.
2. Биккулов В.Ш., Кондаков А.В. Обзор эталонов единиц уровня жидкости // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2017. № 6. С. 4-8.
3. Биккулов В.Ш., Кондаков А.В. Влияние отражающей поверхности на метрологические характеристики бесконтактных уровнемеров // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2018. № 12. С. 5-7.

### 1.3. ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

#### ИННОВАЦИИ В СОВМЕЩЕННЫХ РЕАКЦИОННО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

**Каримова Талия Рафаэлевна**

*студент, Казанский национальный исследовательский  
технологический университет,  
РФ, г. Казань*

**Гариева Фаузия Равильевна**

*канд. хим. наук, профессор,  
Казанский национальный исследовательский  
технологический университет,  
РФ, г. Казань*

#### INNOVATION IN THE COMBINED REACTIVE MASS EXCHANGE PROCESSES

**Taliya Karimova**

*Student,  
Kazan National Research Technological University  
Russia, Kazan*

**Fauzia Garieva**

*Candidate of Chemical Sciences, Professor,  
Kazan National Research Technological University  
Russia, Kazan*

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются конструкция, типы и устройство современных совмещенных реакционно-массообменных реакторов.

**Abstract.** This paper discusses the types and design of modern combined reactive mass transfer reactors.

**Ключевые слова:** реактор; массообмен; конструкция; совмещение.

**Keywords:** reactor; mass transfer; design; combination.

Основу классификации совмещенных реакционно-массообменных процессов составляет признак характера процесса массообмена.

С учетом признака организации совмещения реакционно-массообменные процессы делятся на два типа: направленно-совмещенные процессы и самопроизвольно-совмещенные процессы. Совмещенный реакционно-массообменный процесс может быть организован, если возможно найти общие условия для проведения самой химической реакции и дальнейшего процесса разделения полученной реакционной смеси. Это может быть температура, давление, катализатор и ряд других параметров. Достоинством совмещенных реакционно-массообменных процессов является то, что зачастую их легко можно организовать непрерывными. Это очень важно, если говорить о крупнотоннажных производствах.

Хочется особенно выделить направление по созданию конструктивно совмещенных реакционно-массообменных процессов, когда в одном аппарате протекает несколько стадий химической технологии.

В области основного органического и нефтехимического синтеза такие совмещенные процессы широко распространены и обещают быть очень перспективными. Совмещения могут быть различными, например, предлагают совмещать не только несколько реакционных процессов, но и считаются перспективными процессы, включающие в себя совмещение реакционных процессов с массообменными.

В виде примера совмещения нескольких реакционных процессов можно привести такие сложные химические превращения, когда одна из реакций относится к экзотермической, а другая является эндотермической. Ярким примером такого способа совмещения является процесс окислительного дегидрирования углеводов [1].

К реакционно-массообменным процессам относят реакционно-ректификационные и реакционно-экстракционные процессы. Считается, что именно благодаря такому варианту совмещения достигаются высокие выходы целевых продуктов [1].

Отвод продуктов реакций может происходить за счет испарения жидкости, кристаллизации, конденсации, избирательности абсорбции или адсорбции [1].

Можно достичь уменьшения энергетических затрат на получение дихлоргидринов глицерина в совмещенном реакционно-ректификационном реакторе, снизив время контакта и увеличив выход дихлоргидринов глицерина [2]. Данное изобретение относится к способу получения дихлоргидринов глицерина – промежуточных продуктов для синтеза эпихлоргидрина. Изобретение обеспечивает снижение времени контакта до 14-16 часов и увеличение выхода дихлоргидринов

глицерина до 95%. Этот способ заключается в гидрохлорировании глицерина хлористым водородом в присутствии карбоновой кислоты и органического растворителя. Процесс проводят при температуре 70-140 °С в совмещенном реакционно-ректификационном реакторе, который представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат колонного типа с тарелками или насадками. Для протекания данного процесса важно выбрать такой органический растворитель, который образует азеотроп с водой, но не образует азеотроп с дихлоргидринами глицерина [2].

Для повышения эффективности переработки нефти предложена конструкция реакционно-ректификационного аппарата периодического действия, описанная в работе [3]. Целью данного изобретения является совмещение процессов фракционирования нефти и каталитического крекинга в жидкой фазе в присутствии металлических катализаторов и каталитического риформинга и изомеризации полученной светлой фракции в газовой фазе, на поверхности катализатора, который размещен в насадочной части ректификационной колонны. Первая реакционная зона организована в кубе ректификационной колонны, вторая реакционная зона – по высоте ректификационной колонны с размещением на перфорированных тарелках твердофазного катализатора.

Устройство представляет собой корпус, нижняя, кубовая, часть которого выполнена из нержавеющей стали и имеет кованое эллиптическое днище, плоскую крышку, горловину, соединенную с помощью резьбового соединения с ректификационной колонной, которая выполнена в виде цилиндрической обечайки с размещенными в ней контактными устройствами. К каждой насадочной секции колонны посредством штуцеров присоединены трубчатые конденсаторы для отбора узких светлых нефтяных фракций и термочувствительные элементы, которые позволяют фиксировать изменение температуры по высоте колонны. На тарелки укладывается катализатор. Насадочные секции чередуются с пустыми тарелками, которые выполнены по типу тарелокпроваляного типа, что обеспечивает конденсацию восходящих паров и их возврат на насадку-катализатор. Это способствует увеличению степени конверсии исходного вещества за счет его многократного контакта с катализатором и, как следствие, повышает селективность целевых продуктов. Верхняя часть колонны соединена при помощи резьбового отвода с трубчатым конденсатором, с помощью которого в начальный период процесса возгонки отводятся газы с низким содержанием углерода – С1-С3. Таким образом стабилизируется химический и фракционный составы продукта. На контактных устройствах организуется массообмен, совмещенный с каталитическим процессом преобразования химического состава светлых нефтяных фракций

на поверхности катализатора. Представленное изобретение может быть использовано для модернизации установок атмосферной или вакуумной перегонки нефти.

### **Список литературы:**

1. Тимофеев В.С. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза / В.С. Тимофеев, Л.А. Серафимов // 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2003. – С. 472-531.
2. Пат. 2499788 Российская Федерация, МПК C07C 29/62, C07C 31/36. Способ получения дихлоргидринов глицерина/ Г.С. Дмитриев, Л.Н. Занавескин, С.М. Занавескина; заявитель и патентообладатель Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». – № 2012111924/04; заявл. 27.03.2012; опубл. 27.11.2013.
3. Пат. 2697465 Российская Федерация, МПК B01D 3/22, B01D 3/32, B01J 19/31, C07C 4/06, C07C 5/22Конструкция реакционно-ректификационного аппарата периодического действия для осуществления термокаталитических процессов / А.И. Леонтьева, Н.Н. Балобаева, В.С. Орехов, Х.К. Кхазаал; заявитель и патентообладатель Федеральное госуд. бюджетное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» – № 2017137393; заявл. 25.10.2017; опубл. 14.08.2019.

## **ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

### **РАЗДЕЛ 2.**

### **МАТЕМАТИКА**

#### **2.1. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ, ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ**

#### **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В УПРАВЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАДЗОРНЫХ ОРГАНОВ МЧС РОССИИ**

*Липчевская Анастасия Николаевна*

*слушатель магистратуры,*

*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,*

*РФ, г. Санкт-Петербург*

#### **OPPORTUNITIES OF VECTOR OPTIMIZATION APPLICATION IN THE MANAGEMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE ACTIVITY OF THE SUPERVISORY BODIES OF THE EMERCOM OF RUSSIA**

*Anastasia Lipchevskaya*

*Graduate student*

*Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia,*

*Russia, St. Petersburg*

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы применения методов векторной оптимизации в управлении эффективностью деятельности надзорных органов МЧС России, оценки эффективности и результативности

органов надзорной деятельности МЧС России с учетом изменений законодательства в данной области.

**Abstract.** The questions of application of methods of vector optimization in management of efficiency of activity of Supervisory bodies of EMERCOM of Russia, an assessment of efficiency and efficiency of bodies of Supervisory activity of EMERCOM of Russia taking into account changes of the legislation in this area are considered.

**Ключевые слова:** эффективность; управление деятельностью; результативность; метод; векторная оптимизация.

**Keywords:** efficiency; activity management; efficiency; method; vector optimization.

В настоящее время качество выполнения решаемых задач в МЧС России во многом определяется человеческим фактором. Начиная с 2018 года в МЧС России началась реорганизация деятельности органов Государственного пожарного надзора, что предполагает под собой оптимизацию на всех уровнях, начиная с должностей инспекторского состава.

На данный момент были разработаны показатели, которые отражают результативность и эффективность деятельности органов государственного пожарного надзора [1], но, в настоящее время, отсутствуют показатели оценки результативности и эффективности должностных лиц надзорных органов МЧС России.

Периодическая оценка эффективности работы сотрудников надзорных органов МЧС России является важным стимулом в совершенствовании исполнения функции по надзору инспекторским составом, а также за выполнением обязательных требований в установленной сфере деятельности [2].

Вопросам разработки подходов и методик оценки деятельности органов ГПН всегда уделялось значительное внимание.

Для совершенствования деятельности органов Государственного пожарного надзора нужно решить множество задач:

- стандартизация методов работы в надзорной деятельности с различными категориями личного состава;
- внедрение автоматизации различных процедур с применением инновационных технологий в системе управления ГПН;
- разработка и применение механизмов и методик по усовершенствованию управления органов ГПН;
- создание в МЧС России системы обеспечения ГПН задач, стоящих перед МЧС России, основанных на научно-обоснованных разработках совершенствования надзорной деятельности;

- усовершенствование и создание наиболее оптимальной нормативно-правовой базы.

Согласно Федеральному закону от 21.12.1994 № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» [3] федеральный государственный пожарный надзор является деятельностью уполномоченных федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, а также подведомственных им государственных учреждений, осуществляющих переданные полномочия по предупреждению, выявлению и пресечению нарушений требований пожарной безопасности, установленных законодательством.

Оценка результативности и эффективности надзорной деятельности определяется снижением уровня причиняемого ущерба (вреда), возможностью обеспечения его прекращения или ликвидации, а также достижением оптимального распределения трудовых, материальных и финансовых ресурсов государства.

Проблема эффективной деятельности органов Государственного пожарного надзора на сегодняшний день остается актуальной. Ее решение в системе МЧС России предполагается осуществлять на основе дальнейшей автоматизации деятельности органов государственного противопожарного надзора с применением инновационных технологий.

Согласно Распоряжению Правительства Российской Федерации от 17.05.2016 г. № 934-р утверждены основные понятия результативности и эффективности контрольно-надзорной деятельности [4].

Обобщая опыт принятия решений в различных сферах человеческой деятельности, можно высказать ряд интуитивных пожеланий к свойствам метода, призванного обеспечить поддержку процесса принятия решения.

Постановка задачи векторной оптимизации и классификация многокритериальных методов.

В упрощенном виде задача векторной оптимизации формируется следующим образом:

Имеется  $n$  конкурирующих решений:

$\{S_i\} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ , т. е. стратегий, структур, проектов, плакатов и т. д. и  $m$  частных критериев

$\{K_j\} = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$ , не всегда согласованных между собой и противоречивых.

Для оценки конкурирующих решений по частным критериям используются различные средства: экспертные процедуры, мат. моделирование, натуральные эксперименты. При этом множество конкурирующих решений отображается в матрицу векторных оценок:



	$S_1$	$S_2$	...	$S_n$
$[k_{ij}] =$	$k_{11}$	$k_{12}$	...	$k_{1n}$
	$k_{21}$	$k_{22}$	...	$k_{2n}$
	...	...	...	...
	$k_{m1}$	$k_{m2}$	...	$k_{mn}$

Исходя из матрицы векторных оценок и системы предпочтений лица принимающего решение (далее ЛПР) выбирается рациональное решение.

Выбор рационального решения связан с преодолением неопределенностей, которые имеются в связи с наличием многих критериев. Эта неопределенность является принципиальной. Для ее компенсации есть лишь одна единственная возможность: использование системы предпочтений ЛПР (т. е. дополнительной, субъективной информации).

Использование субъективной информации ЛПР позволяет преодолеть принципиальные трудности и выбрать рациональный критерий.

Задача многокритериальной оптимизации состоит в том, что имеется множество допустимых решений  $k \in S$ , не всегда связанных между собой и противоречивых.

Чтобы оценить конкурирующие решения по различным критериям предельные значения (ограничения) отображают в многомерном векторном пространстве  $f: S \rightarrow K^m$ .

Исходя из векторных оценок выбирается наиболее эффективное (оптимальное) решение:

$$y = f(k) \rightarrow \text{optim}$$

Выбор оптимального решения связан с освоением неоднозначностей, которые формируются из-за возникновения ряда альтернатив. Эта неоднозначность категорична. Для уравнивания имеется лишь единственное решение: применение структуры приоритетов лица, принимающего решение (т. е. индивидуальных данных).

Метод должен определять подлинный процесс мысли человека. Необходимо отметить, что наука, находящаяся в основании системы, не абсолютно может замещать интеллект и навыки человека в области трактовки реального мира

Метод должен являться единой существующей концепцией по принятию решения, предполагающая внести процесс принятия решений на поток.

Метод должен служить универсальной систематической основой для принятия решений, позволяя поставить процесс принятия решений на поток. (Взамен мозговой атаки, спланированной самопроизвольно и без задуманного замысла, добиться отчетливого сценария, достигнуть ясного способа формирования взглядов по принятию решений в различной направленности процесса).

Метод должен распознавать и решать проблему, связанную с принятием решений, с учетом действительных затруднений и иных проблем. Хочется подчеркнуть, что применение общепринятых концептуальных способов недопустимо без всяческих предположений, облегчающих ситуацию.

Метод должен допускать те индивидуальные возможности, что, очень часто, имеется множество суждений, а также множество направлений принятия решений. В системе формирования единственного суждения могут возникать различного рода противоречия. Поэтому для конкретного результата нужны средства достижения договоренности.

Следовательно, для гарантии четкости важна структура численного распределения (приоритизации) всевозможных альтернатив. (Умение «осознавать» числа является уникальностью разума мышления человека). Это обуславливает постановку задачи при принятии решений.

Метод должен допускать рациональный и ясный способ анализа различных решений. Иначе процесс принятия решений вполне возможно считается неконкретным и его имеющиеся потенциалы могут быть не воплощены.

Для решения сложных структурированных задач наиболее подходит метод анализа иерархий (далее МАИ), реализованный ученым из Америки, Томасом Л. Саати [5].

Метод основан на декомпозиции проблемы на все более простые элементы и предстоящей отработке комбинаций утверждений лица, принимающего решения, по парным сравнениям.

В процессе возможно будет проявлена количественная оценка (интенсивность) взаимосвязи элементов в иерархии. Дальше эти предположения характеризуются количественно. МАИ содержит комбинированные операции множества утверждений, приобретение предпочтений принципов и выявления актуальных решений.

$$k = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}},$$

где:  $a = a_i / \sum_{j=1}^n k$

МАИ состоит из следующих этапов:

1. Постановка проблемы и определение желаний.
2. Построение иерархии (целей, критериев, альтернатив).
3. Построение множеств матриц парных сравнений для всех нижних уровней по одной матрице для каждого элемента располагающегося сверху уровня.
4. Проверка индекса упорядоченности каждой матрицы.
5. Использование иерархического синтеза для оценки своих векторов весами альтернатив (критериев) и найти сумму по всем предусмотренным оцененным элементам собственных векторов уровня иерархии, находящегося ниже.

Так как органы надзорной деятельности являются сложно структурированной системой, то для решения задач на различных уровнях данной системы наиболее подходит МАИ.

Потому что иерархия есть определенный тип системы, основанный на суждении, что все компоненты системы могут быть объединены в хаотичные множества.

Компоненты каждого множества располагаются под воздействием элементов отдельного четко обусловленного ряда и, в большей степени, воздействуют на элементы другого ряда. В МАИ элементы в каждом ряду иерархии (уровне) являются самостоятельными.

Анализируя различные показатели эффективности и применяя различные многокритериальные методы, основанные на решении сложных проблем при принятии управленческих решений, с помощью метода анализа иерархии можно повысить эффективность управления органов надзорной деятельности МЧС России.

### **Список литературы:**

1. Приказ МЧС России от 18.12.2017 г. № 576 «Об утверждении перечней показателей результативности и эффективности деятельности надзорных органов МЧС России».
2. Постановление правительства РФ от 12.04.2012 г №290 «О федеральном государственном пожарном надзоре».
3. Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ «О пожарной безопасности».
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.05.2016 г. № 934-р «Основные направления разработки и внедрения системы оценки результативности и эффективности контрольно-надзорной деятельности».
5. Насыров Р.В., Тайгина Е.А., Фарукшин Р.М. Управление в сложных системах. Учеб.пособие-Изд-во УФА: УГАТУ 2009.

## РАЗДЕЛ 3.

### ФИЗИКА

#### 3.1. ОПТИКА

#### АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ZnSe, As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, BaF<sub>2</sub>, PbF<sub>2</sub>, GeTe

***Котликов Евгений Николаевич***

*д-р физ.-мат. наук, профессор,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения,  
РФ, г. Санкт-Петербург*

***Новикова Юлиана Александровна***

*канд. физ.-мат. наук, доцент,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения,  
РФ, г. Санкт-Петербург*

***Терещенко Георгий Викторович***

*канд. физ.-мат. наук, доцент,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения,  
РФ, г. Санкт-Петербург*

#### ANALYSIS OF EQUIVALENT STRUCTURE SPECTRA BASED ON ZnSe, As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, BaF<sub>2</sub>, PbF<sub>2</sub>, GeTe Films

***Evgeny Kotlikov***

*Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,  
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
Russia, St. Petersburg*

**Yuliana Novikova**

*Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor,  
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
Russia, St. Petersburg*

**Georgy Tereshchenko**

*Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor,  
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
Russia, St. Petersburg*

**Аннотация.** Проведен анализ спектров эквивалентных структур, имитирующих в широкой области спектра пленку с требуемым показателем преломления. В эквивалентную структуру входят чередующиеся пленки из двух веществ с высоким и низким показателями преломления. Рассчитаны эквивалентные показатели преломления и спектры эквивалентных структур на основе пленок ZnSe, As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, BaF<sub>2</sub>, PbF<sub>2</sub>, GeTe.

**Abstract.** The spectra of equivalent structures that simulate a film with a required refractive index in a wide spectral region are analyzed. The equivalent structure includes alternating films of two substances with high and low refractive indices. The equivalent refractive indices and spectra of equivalent structures based on ZnSe, As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, BaF<sub>2</sub>, PbF<sub>2</sub>, GeTe films were calculated.

**Ключевые слова:** пленки; интерференционные покрытия; эквивалентные структуры; показатели преломления.

**Keywords:** films; interference coatings; equivalent structures; refractive indices.

В оптическом приборостроении широко используются многослойные интерференционные покрытия (ИП). ИП используются в различных целях: просветление оптических элементов, создание оптических фильтров, зеркал, светоделителей, интерференционных поляризаторов. Для изготовления ИП необходимы оптические материалы с различными показателями преломления. Набор таких материалов ограничен [1-3]. Для расширения технологических возможностей для создания ИП можно использовать многослойные эквивалентные структуры, имитирующие пленку с заданным показателем преломления [4-7]. Это позволяет упростить разработку и реализацию ИП с требуемыми характеристиками. Для замены слоя с определенным показателем преломления в ИП в большинстве случаев достаточно эквивалентной трехслойной структуры. Экспериментальный опыт по созданию ИП различных назначений показал, что условие идентичности показателя преломления лучше

выполняется при использовании эквивалентного слоя со структурой LHL, где L – слой с низким показателем преломления  $n_L$ , а H – слой с высоким показателем преломления  $n_H$ . В настоящей работе рассмотрена методика формирования эквивалентных слоев и спектров на их основе. Эта методика используется в программе синтеза интерференционных покрытий Film Manager [8].

Возможность использования эквивалентных структур следует из матричного метода расчета спектра ИП [4,5]. В случае нормального падения света на ИП, решая граничную задачу для многослойного покрытия можно получить матричное уравнение связывающее полные тангенциальные составляющие векторов электрического  $\vec{E}$  и магнитного полей  $\vec{H}$  в  $j$  и  $j-1$  слоях при нормальном падении электромагнитной волны [4]:

$$\begin{pmatrix} E_{j-1} \\ H_{j-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Phi_j & (i/N_j) \sin \Phi_j \\ iN_j \sin \Phi_j & \cos \Phi_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_j \\ H_j \end{pmatrix} = \mathbf{M}_j \begin{pmatrix} E_j \\ H_j \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где:  $\Phi_j = 2\pi N_j l_j / \lambda$  – фазовая толщина,  $N_j = n_j - ik_j$  – комплексный показатель преломления слоя,  $n_j$  – показатель преломления,  $k_j$  – показатель поглощения,  $l_j$  – толщина  $j$ -го слоя ИП.

Выписав соотношение (1) последовательно для всех слоев покрытия начиная с  $m$ -го, и исключив значения амплитуд полей на всех границах внутренних слоев последовательной подстановкой можно получить выражение, связывающее амплитуды электрического и магнитного полей на нулевой и  $m$ -ой границах:

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_3 \dots \mathbf{M}_m \begin{pmatrix} E_m \\ H_m \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{\text{sys}} \begin{pmatrix} E_m \\ H_m \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^m \mathbf{M}_j \begin{pmatrix} 1 \\ N_{m+1} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Матрица  $\mathbf{M}^{\text{sys}}$  называется характеристической матрицей интерференционной системы. Пусть  $m_{ij}$  – матричные элементы характеристической матрицы многослойной системы, тогда

$$\mathbf{M}^{\text{sys}} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Характеристические матрицы одиночного слоя и симметричной комбинации пленок имеют равные диагональные элементы. Перемножая две характеристические матрицы **A** и **B** слоев с различными показателями преломления  $n_A$  и  $n_B$ , и оптическими толщинами  $h_A$  и  $h_B$ , можно убедиться в том, что матрица произведения **C** имеет неравные диагональные элементы. Однако, если матрицу **C** умножить на матрицу **A**, то матрица **АВА**, также имеет равные диагональные элементы. Можно показать, что матрица **M<sup>sys</sup>**, являющаяся произведением любой симметричной комбинации **ABCDE...EDCBA** имеет равные диагональные элементы. Матрице **M<sup>sys</sup>** можно придать вид матрицы одиночного слоя если ввести следующие величины: эквивалентную фазовую толщину

$$\Phi_E = \arccos\{m_{11}\} \quad (4)$$

и эквивалентный показатель преломления

$$N_E = +\sqrt{\frac{m_{21}}{m_{12}}}. \quad (5)$$

При этом матрица **M<sup>sys</sup>** принимает вид

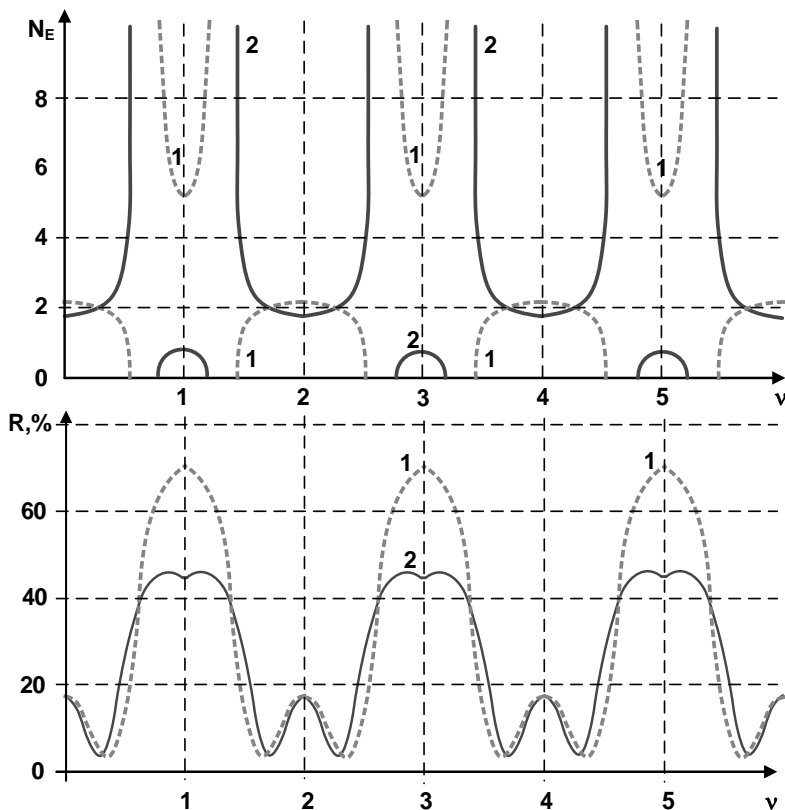
$$\mathbf{M}^{\text{sys}} = \begin{pmatrix} \cos \Phi_E & (i/N_E) \sin \Phi_E \\ iN_E \sin \Phi_E & \cos \Phi_E \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Так как элементы матрицы **M<sup>sys</sup>** зависят от длины волны, то величины  $\Phi_E$  и  $N_E$  также являются функциями длины волны. Эти зависимости имеют сложный характер, причем спектральные интервалы в которых  $\Phi_E$  и  $N_E$  принимают действительные значения, чередуются с областями где эти величины не являются действительными. Из выражений (4) и (5) следует, что  $\Phi_E$  и  $N_E$  действительны при  $m_{11} < 1$ . При  $m_{11} > 1$   $N_E$  является чисто мнимой величиной, а  $\Phi_E$  – комплексной.

Области длин волн, которым отвечают мнимые значения эквивалентного показателя преломления или комплексные значения эквивалентной толщины называются полосами заграждения, а все остальные области – полосами пропускания.

Используя понятия *эквивалентный показатель преломления и эквивалентная толщина*, можно любую пленку **P** для фиксированной длины волны заменить симметричной комбинацией пленок **АВС...СВА**.

В данном случае эквивалентность пленки **P** и комбинации **ABC...CBA** следует понимать в том смысле, что обе эти комбинации описываются одной и той же матрицей. На рис. 1, в качестве примера, представлены зависимости эквивалентного показателя преломления и коэффициента отражения от нормированной частоты для трехслойных симметричных покрытий типа **HLH** и **LHL**. Здесь **H** и **L** – четвертьволновые слои с высоким  $n_H$  и низким  $n_L$  показателями преломления, соответственно.



**Рисунок 1.** Зависимости эквивалентного показателя преломления  $N_E$  и энергетического коэффициента отражения  $R$  от нормированной частоты  $v$  симметричных комбинаций **HLH**(1) и **LHL**(2) на подложке с  $n_s=2,4$ . ( $n_L=1,35$ ,  $n_H=2,65$ , оптическая толщина всех слоев  $h=\lambda_0/4$ )



Понятие эквивалентность играет большую роль при проектировании, поскольку позволяет легко представить свойства ряда весьма сложных многослойных систем более простыми эквивалентными. Метод эквивалентных структур оказался чрезвычайно перспективным при конструировании реализуемых на практике покрытий. Сначала находится структура с произвольными значениями показателей преломления и толщин. Далее производится замена отдельных слоев, для которых не найдены пленкообразующие материалы, на эквивалентные трехслойные симметричные системы, состоящие из реальных веществ. Затем находится окончательная конструкция покрытия в результате оптимизации толщин слоев с учетом дисперсии показателя преломления.

Рассмотрим комбинацию, состоящую из трех слоев, выполненных из материалов с показателями преломления  $n_A$  и  $n_B$ , фазовыми толщинами  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$  и оптическими толщинами  $h_A$  и  $h_B$ . Матричные элементы такой системы имеют вид

$$m_{11} = m_{22} = \cos 2\Phi_A \cos \Phi_B - A_0 \sin 2\Phi_A \sin \Phi_B; \quad (7a)$$

$$m_{12} = -[\Psi + B_0 \sin \Phi_B] / n_A; \quad m_{21} = -n_A [\Psi - B_0 \sin \Phi_B]; \quad (7б)$$

$$\Psi = \sin 2\Phi_A \cos \Phi_B + A_0 \cos 2\Phi_A \sin \Phi_B \quad (7в)$$

$$A_0 = \left(\rho + \frac{1}{\rho}\right) / 2; \quad B_0 = \left(\rho - \frac{1}{\rho}\right) / 2; \quad \rho = n_A / n_B \quad (7г)$$

Из соотношений (7) можно получить выражения для эквивалентного показателя преломления и фазовой толщины:

$$N_E = n_A \sqrt{(\Psi - B_0 \sin \Phi_B) / (\Psi + B_0 \sin \Phi_B)}, \quad (8)$$

$$\cos \Phi_E = \cos 2\Phi_A \cos \Phi_B - A_0 \sin 2\Phi_A \sin \Phi_B. \quad (9)$$

При конструировании покрытий обычно бывает необходимо по заданным значениям эквивалентных показателя преломления и оптической толщины  $h_E$ , показателям преломления  $n_A$  и  $n_B$  вычислить оптические толщины симметричной комбинации  $h_A$  и  $h_B$ .

Из выражений (7) можно получить соотношение

$$\sin \Phi_B = \left[ \left( \frac{n_A}{N_E} - \frac{N_E}{n_A} \right) \sin \Phi_E \right] / \left[ \frac{n_A}{n_B} - \frac{n_B}{n_A} \right]. \quad (10)$$

Знак перед  $\sin\Phi_B$  выбирают таким образом, чтобы все действительные значения  $N_E$  были положительными. В этом случае

$$\Phi_B = (-1)^k \arcsin \left( \left[ \left( \frac{n_A}{N_E} - \frac{N_E}{n_A} \right) \sin \Phi_E \right] / \left[ \frac{n_A}{n_B} - \frac{n_B}{n_A} \right] \right) + k\pi, \quad (11)$$

где:  $k=0,1,2,3, \dots$

Таким образом величина  $\Phi_B$  известна. Чтобы найти  $\Phi_A$  надо решить уравнение (9). Введем обозначения:

$$a = \cos \Phi_E, b = \cos \Phi_B, c = A_0 \sin \Phi_B. \quad (12)$$

Тогда соотношение (9) примет вид:

$$a = b \cos 2\Phi_A - c \sin 2\Phi_A. \quad (13)$$

Для решения уравнения (13) используется универсальная подстановка:

$$\cos\{2\Phi_A\} = (1 - \operatorname{tg}^2 \Phi_A) / (1 + \operatorname{tg}^2 \Phi_A); \sin\{2\Phi_A\} = 2 \operatorname{tg}^2 \Phi_A / (1 + \operatorname{tg}^2 \Phi_A),$$

при  $2\Phi_A = \pi + 2\pi k$ , где  $k=1,2,3, \dots$

Решением уравнения (13) является выражение

$$\begin{aligned} \Phi_A &= \operatorname{arctg}(d) + k\pi, \text{ где } k = 0,1,2,3 \text{ и} \\ d &= (-c + \sqrt{b^2 + c^2 - a^2}) / (a + b). \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь  $a, b, c$  вычисляются по формулам (12).

Если  $(b^2 + c^2) < a^2$  то уравнение (13) не имеет действительных решений. На практике более удобно использовать решение при  $k=0$ . В этом случае оптические толщины слоев  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$  имеют наименьшие значения. При проектировании интерференционных покрытий удобнее пользоваться не фазовыми толщинами слоев  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$ , а оптическими  $h_A$  и  $h_B$ , измеренными в четвертях масштабной длины волны. Если длина волны измеряется в относительных длинах волн  $\lambda_{\text{отн}} = \lambda / \lambda_0$ , то из (11) - (14) получаем выражения для вычисления оптических толщин

$$h_E = 2\lambda_E \Phi_E / \pi,$$

$$h_B = 2\lambda_E \arcsin \left( \left[ \left( \frac{n_A}{N_E} - \frac{N_E}{n_A} \right) \sin \Phi_E \right] / \left[ \frac{n_A}{n_B} - \frac{n_B}{n_A} \right] \right) / \pi, \quad (15)$$

$$h_A = 2\lambda_E \arctg(d) / \pi.$$

где:  $\lambda_E$  – длина волны, на которой выполняется условие эквивалентности.

В таблице 1 приведены рассчитанные нами значения оптических толщин слоев А и В конструкции АВА, вычисленные при заданных  $N_E$  и  $h_E = \lambda_0/4$ , по формулам (15). Для слоев А и В использованы три пары веществ с показателями преломления 1,35 и 2,3; 1,35 и 2,65; 2,4 и 4.

**Таблица 1.**

**Рассчитанные оптические толщины слоев  $h_A$  и  $h_B$  эквивалентной конструкции АВА с  $h_E = \lambda_0/4$  при различных значениях эквивалентного показателя преломления  $n_E$ .**

$n_A=1,35; n_B=2,3$			$n_A=1,35; n_B=2,65$			$n_A=2,4; n_B=4$		
$N_E$	$h_A$	$h_B$	$N_E$	$h_A$	$h_B$	$N_E$	$h_A$	$h_B$
1,35	1,000	0,000	1,35	1,000	0,000	2,4	1,000	0,000
1,4	0,476	0,042	1,5	0,443	0,093	2,6	0,446	0,096
1,5	0,431	0,121	1,6	0,408	0,151	2,8	0,395	0,187
1,6	0,388	0,198	1,7	0,374	0,207	3,0	0,346	0,277
1,7	0,346	0,274	1,8	0,342	0,263	3,2	0,297	0,368
1,8	0,305	0,350	1,9	0,311	0,318	3,4	0,248	0,464
1,9	0,264	0,429	2,0	0,281	0,374	3,6	0,196	0,571
2,0	0,222	0,514	2,1	0,250	0,432	3,8	0,134	0,702
2,1	0,176	0,609	2,2	0,220	0,493	4	0	1
2,2	0,121	0,728	2,3	0,189	0,558			
2,3	0,000	1	2,4	0,155	0,630			
			2,5	0,117	0,717			
			2,65	0,000	1,000			

Анализ данных из таблицы 1 позволяет получить следующие приближенные соотношения для эквивалентной толщины и эквивалентного показателя преломления симметричной комбинации, состоящей из  $m$  слоев с показателями преломления  $n_i$  и толщинами

$$h_i: h_E \sim \sum h_i \text{ и } n_E \sim \frac{\sum n_i h_i}{\sum h_i}. \quad (16)$$

В процессе анализа и синтеза многослойных периодических систем часто используют трехслойные симметричные комбинации с фиксированным отношением оптических толщин слоев. В этих случаях выражения для  $N_E$  и  $\Phi_E$  упрощаются. При выборе  $\Phi_B=2\Phi_A$  выражения для эквивалентного показателя преломления  $N_E$  и эквивалентной фазовой толщины  $\Phi_E$  приобретают вид:

$$N_{E(0.5AB0.5A)} = n_A \sqrt{(\cos \Phi_B - G) / (\cos \Phi_B + G)}; G = B_0 / (1 + A_0), \quad (17)$$

$$\cos \Phi_E = 1 - (1 - A_0) \sin^2 \Phi_B. \quad (18)$$

Из выражения (17) следует, что  $N_E$  принимает комплексные значения при выполнении неравенства:

$$(\cos \Phi_B - G) / (\cos \Phi_B + G) < 0 \quad (19)$$

Решением неравенства (19) являются значения фазовой толщины слоя В удовлетворяющие условию

$$-\arccos G + 2\pi k < \Phi_B < \arccos G + 2\pi k, \text{ где } k=0,1,2,\dots \quad (20)$$

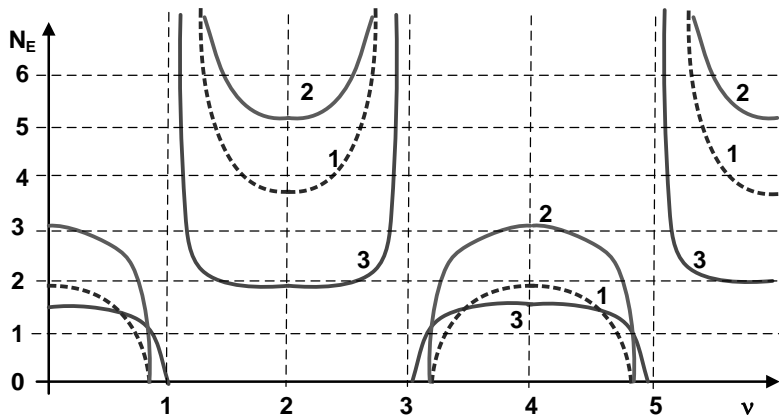
Фазовая толщина  $\Phi_e$  зависит от длины волны. Следовательно, диапазоны длин волн в которых эквивалентный показатель преломления принимает мнимые и действительные значения будут чередоваться. Центры полос заграждения комбинации 0.5AB0.5A при  $2h_A=h_B=\lambda_0/4$  находятся на длинах волн, для которых выполняется условие

$$1/\lambda = 1 + 2k, \text{ где } k=0,1,2,3,\dots \quad (21)$$

На рис. 2 изображены зависимости эквивалентных показателей преломления  $N_E$  от относительной частоты  $\nu$  для комбинаций типа

0.5LH0.5L, 0.5HL0.5H, состоящих из пар веществ с показателями преломления  $n$ : 1,35 и 2,65; 2,4 и 4; 1,35 и 1,7. Этим парам соответствуют следующие отношения высокого и низкого значений показателей преломления  $n_H/n_L$ : 1,96, 1,67, 1,26. Из рис. 2 видно, что системы 0.5LH0.5L, 0.5HL0.5H имеют области заграждения в окрестности точек  $\nu=1,3,5 \dots$ , а также, чем больше отношение  $n_H/n_L$ , тем шире полосы пропускания, и меньше полосы пропускания.

Рассмотрим зависимости относительной ширины полос пропускания от нормированной частоты для эквивалентных слоев типа 0.5AB0.5A (см. рис. 2). Отсчет полос будем вести от точки  $\lambda=0$ . Для первой полосы –  $\Delta\lambda \sim \infty$ , для второй полосы  $\Delta\lambda \sim 3$ , для третьей полосы –  $\Delta\lambda \sim 1,66$ , для четвертой  $\Delta\lambda \sim 1,4$ . Таким образом при увеличении частоты происходит уменьшение относительной ширины полос пропускания симметричных трехслойных комбинаций. Самой широкой является первая полоса пропускания. Поэтому для синтеза ИП можно будет пользоваться именно этой спектральной областью.



**Рисунок 2а.** Зависимость эквивалентного показателя преломления  $N_E$  симметричной комбинаций 0.5HL0.5H от нормированной частоты  $\nu$ .

На рис. (а) и (б) 1 –  $n_L=1,35$ ;  $n_H=2,65$ ; ( $n_H/n_L=1,96$ );  
2 –  $n_L=2,4$ ;  $n_H=4$ ; ( $n_H/n_L=1,66$ ); 3 –  $n_L=1,35$ ;  $n_H=1,7$  ( $n_H/n_L=1,26$ )

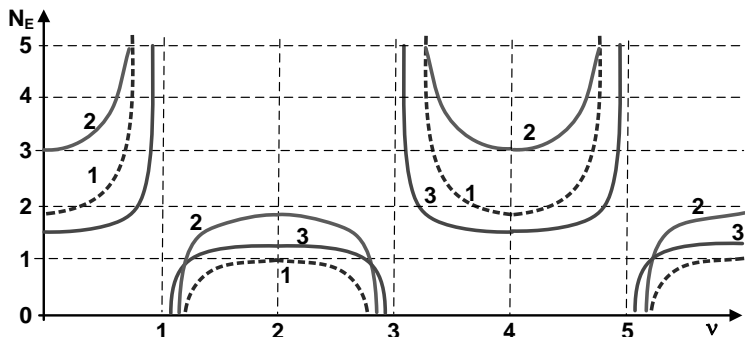


Рисунок 2б. Зависимость эквивалентного показателя преломления  $N_E$  симметричной комбинации 0.5LH0.5L (б) от нормированной частоты  $\nu$

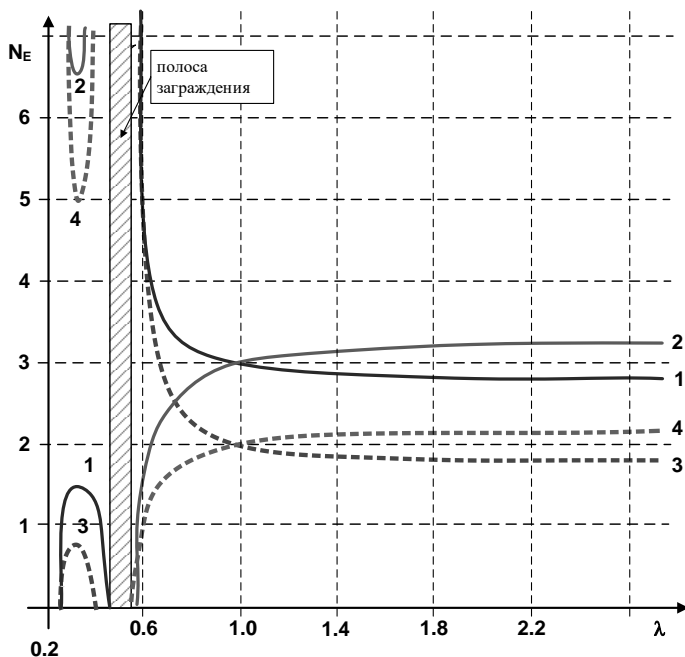


Рисунок 3. Зависимости эквивалентных показателей преломления  $N_E$  от относительной длины волны  $\lambda$  для симметричных трехслойных конструкций:

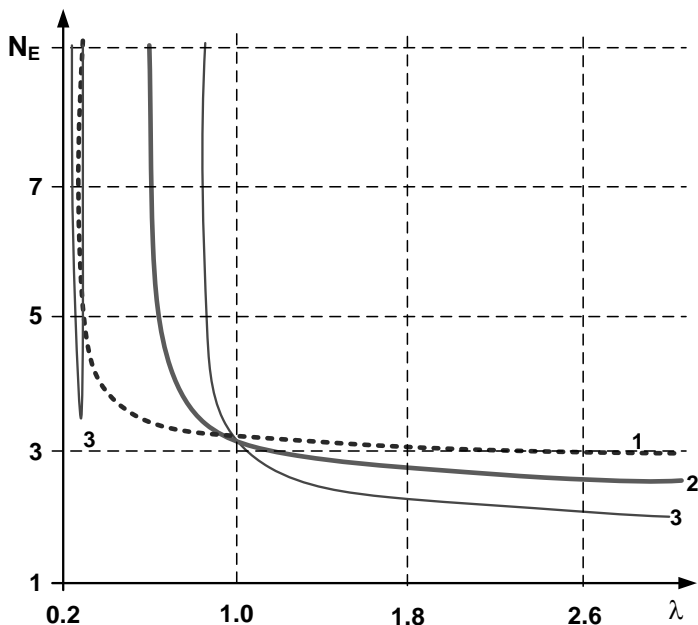
- 1 – конструкция LHL (ZnSe и Ge),  $n_L=2,4$ ;  $h_L=0,346$ ;  $n_H=4$ ;  $h_H=0,277$ ;  
 2 – конструкция HLH (Ge и ZnSe),  $n_H=4$ ;  $h_H=0,297$ ;  $n_L=2,4$ ;  $h_L=0,368$ ;  
 3 – конструкция LHL(BaF<sub>2</sub> и As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>),  $n_L=1,35$ ;  $h_L=0,281$ ;  $n_H=2,65$ ;  
 $h_H=0,374$ ;  
 4 – конструкция HLH (As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> и BaF<sub>2</sub>),  $n_H=2,65$ ;  $h_H=0,346$ ;  $n_L=1,35$ ;  
 $h_L=0,257$ .

Из рис. 3 видно, что условие эквивалентности выполняется точно только на длине волны  $\lambda=1$ . При  $\lambda>1$  эквивалентные показатели преломления принимают значения близкие к тем, которые они принимают при 1. А на  $\lambda<1$  условие эквивалентности выполняется только на очень узких спектральных участках, разделенных полосами заграждения. На рис. 3 штриховкой выделена полоса заграждения в области  $\lambda=0,5$ . В спектрах эквивалентных слоев, которые имеют равные эквивалентные оптические толщины  $h_E$ , полосы заграждения имеют одинаковое положение.

Поэтому поиск структур просветляющих покрытий (ПП) с фиксированными четвертьволновыми слоями на начальных этапах синтеза удобен тем, что полосы заграждения слоев, замененных эквивалентными, будут иметь одинаковое положение. Так как при толщинах слоев равных  $\lambda_0/4$  длинноволновая граница полосы заграждения  $\lambda_{\text{stop}}$  находится на относительной длине волны близкой к 0,6, при поиске структуры ПП на начальных этапах мы использовали диапазоны длин волн, удовлетворяющих условию  $\lambda>0,6$ . При замене слоя эквивалентным не во всех случаях использовалась  $\lambda_E=1$ . В некоторых случаях для получения ПП с более качественными спектральными характеристиками для каждого слоя подбиралась своя  $\lambda_E$  немного большая или меньшая 1. При замене слоев покрытия эквивалентными конструкциями происходит некоторое сужение области просветления из-за больших значений дисперсии  $n_E$  при  $\lambda<1$ . Поэтому на начальных этапах синтеза ПП предпочтительнее получать ширину области просветления несколько большую, чем это необходимо. Например, если после замены слоев на эквивалентные было нужно получить относительную ширину области просветления  $\Delta\lambda$  равную 4, то на начальных этапах проводился поиск ПП с  $\Delta\lambda=5$ .

На рисунке 4 приведены рассчитанные нами зависимости  $N_E(\lambda)$  для симметричных трехслойных конструкций LHL (PbF<sub>2</sub>/GeTe/PbF<sub>2</sub>) с эквивалентными толщинами  $h_E=0,5$ ; 1,0; 1,5 и  $N_E=3$  ( $n(\text{GeTe})=3,54$ ;  $n(\text{PbF}_2)=1,65$  в диапазоне  $\lambda=4-10$  мкм [3]). Толщины слоев комбинаций были вычислены по формулам (17) при  $\lambda_E=1$ . Из сравнения спектров следует, что длинноволновая граница полосы заграждения  $\lambda_{\text{stop}}$  прямо пропорциональна эквивалентной толщине  $h_E$  и при  $\lambda_E=1$  выполняется

приближенное соотношение:  $\lambda_{\text{stop}} \sim 0.6h_E$ . Чем меньше эквивалентная толщина, тем ближе значения эквивалентного показателя преломления  $N_E$  к заданному  $n$  в требуемом спектральном диапазоне.



**Рисунок 4.** Зависимости эквивалентных показателей преломления  $N_E$  от относительной длины волны  $\lambda$  для симметричных трехслойных конструкций типа  $LHL(n_L=1,65; n_H=3,5)$  с эквивалентными толщинами  $h_E=0,5$  (1);  $h_E=1$  (2) и  $h_E=1,5$  (3)

Формулы (15) можно использовать для конструирования не только трехслойных эквивалентных комбинаций, но и для комбинаций с большим числом слоев. Например, для получения пятислойной конструкции с показателем преломления  $n$  и толщиной  $h$ , подлежащий замене эквивалентным слоем делится на два слоя с показателями преломления  $n$  и толщинами  $h/2$ . После этого каждый слой заменяется эквивалентной трехслойной комбинацией.

Толщины смежных слоев с одинаковыми показателями преломления складываются. В таб. 2. представлены результаты конструирования трех-, пяти- и семислойных эквивалентных конструкций с  $n_E=3$  и  $h_E=1$  на основе комбинации  $\text{GeTe}/\text{As}_2\text{S}_3/\text{GeTe}$  ( $n(\text{GeTe})=3,5$ ;  $n(\text{As}_2\text{S}_3)=2,3$  в диапазоне  $\lambda$  от 5 до 10 мкм.

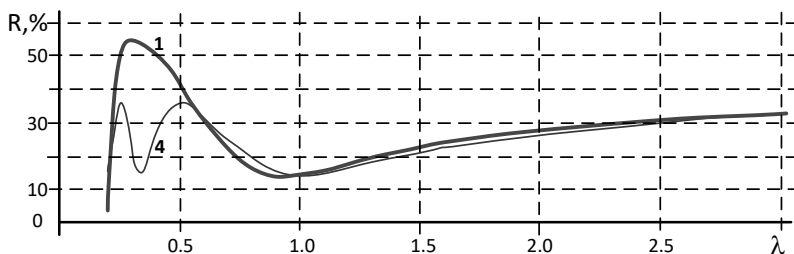


Таблица 2.

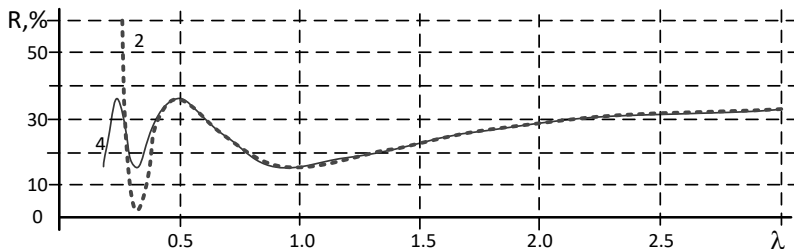
**Конструкции эквивалентных структур с различным числом слоев  
на основе GeTe и As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>**

№ слоя	ИП 3 слоя (HLH)		ИП 5 слоев (HLHLH)		ИП 7 слоев (HLHLHLH)	
	$n$	$h, \lambda_0/4$	$n$	$h, \lambda_0/4$	$n$	$h, \lambda_0/4$
1	3,5	0,374	3,5	0,164	3,5	0,106
2	2,3	0,233	2,3	0,163	2,3	0,115
3	3,5	0,374	3,5	0,327	3,5	0,212
4			2,3	0,163	2,3	0,115
5			3,5	0,164	3,5	0,212
6					2,3	0,115
7						

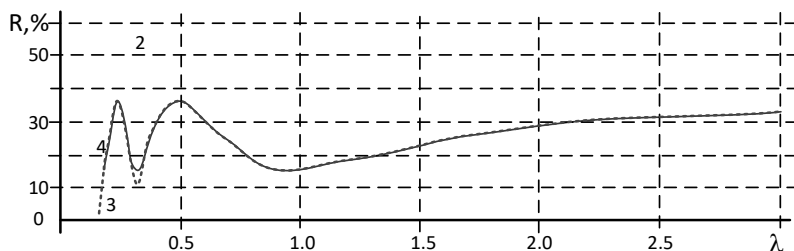
На рисунках 5 а, б, в, в качестве примера, приведены спектры отражения эквивалентных конструкций HLH, HLHLH, HLHLHLH и пленки с  $n=3$  и  $h=1$  на подложке с  $n_3=4$ . Сравнивая спектры можно сделать вывод, что чем больше количество слоев в эквивалентной конструкции, тем больше степень совпадения спектральных характеристик исходной и эквивалентной конструкций покрытия. Семислойной эквивалентной комбинации вполне достаточно, чтобы с высокой степенью точности имитировать спектральные характеристики однородной пленки. Однако, на практике число слоев покрытия ограничено. Поэтому несмотря на то, что имитационные свойства эквивалентных слоев улучшаются при увеличении количества слоев, авторами в основном используются трехслойные конструкции эквивалентных слоев.



**Рисунок 5а. Спектр отражения трехслойной эквивалентной комбинации HLH (1) в сравнении со спектром отражения пленки (4) с показателем преломления  $n=3$  и  $h=1$**



**Рисунок 5б.** Спектр отражения пятислойной эквивалентной комбинации HLHLH (2) в сравнении со спектром отражения пленки (4) с показателем преломления  $n=3$  и  $h=l$



**Рисунок 5в.** Спектры отражения семислойной эквивалентной комбинации HLHLHLH (3) в сравнении со спектром отражения пленки (4) с показателем преломления  $n=3$  и  $h=l$

Рассмотренные в статье эквивалентные структуры позволяют упростить процесс синтеза ИП различного назначения, так как на первом этапе можно использовать слои с произвольными показателями преломления, не связанными с реальными материалами. На втором этапе можно заменить слои полученного ИП на эквивалентные структуры, которые состоят всего из двух веществ с высоким и низким показателем преломления. Теория эквивалентных структур прочно базируется на матричном методе вычисления свойств ИП.

### Список литературы:

1. Котликов Е.Н., Кузнецов Ю.Н., Лавровская Н.П., Тропин А.Н. Оптические пленкообразующие материалы для инфракрасной области спектра // Научное приборостроение. 2008. № 3. С. 32-36.

2. Котликов Е.Н., Терещенко Г.В. Исследование оптических констант плёнок, используемых для синтеза широкополосных просветляющих покрытий // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 82, № 4. С. 653–659.
3. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Юрковец Е.В. Метод определения оптических констант плёнок на поглощающих подложках // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 10. С. 64-69.
4. Бернинг П.Х. Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок. в кн. Физика тонких пленок. Т.1. М.; Мир,1967. С.91-151.
5. Яковлев П.П., Мешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий. М.; Машиностроение,1987. - 192с.
6. Котликов Е.Н., Терещенко Г.В. использование халькогенидных соединений для изготовления просветляющих покрытий в средней ИК-области спектра // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 3. С. 110.
7. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Плехоткина Г.Л., Прилипко В.К. Проектирование ахроматических просветляющих покрытий // Датчики и системы. 2016. № 1 (199). С. 54-57.
8. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Коваленко И.И. Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий Film Manager. // Научный журнал, информационно-управляющие системы. Политехника. 2015 г. – № 3(76). – С. 51-59.

### **3.2. ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ФИЗИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ**

***Закиев Денис Даутказыевич***

*инженер,*

*Поволжский государственный технологический университет,  
РФ, г.Йошкар-Ола*

***Маргин Андрей Николаевич***

*студент,*

*Поволжский государственный технологический университет,  
РФ, г.Йошкар-Ола*

***Крутских Николай Алексеевич***

*канд.техн. наук, доцент,*

*Поволжский государственный технологический университет,  
РФ, г.Йошкар-Ола*

***Алибеков Сергей Якубович***

*д-р техн. наук, профессор,*

*Поволжский государственный технологический университет,  
РФ, г.Йошкар-Ола*

#### **THE STUDY OF THE FORCES OF PHYSICAL INTERACTION BETWEEN THE MAGNETIC FIELDS OF PERMANENT MAGNETS**

***Denis Zakiev***

*Engineer,*

*Volga State Technological University,  
Russian Federation, Yoshkar-Ola*

**Andrey Margin**

*Student,  
Volga State Technological University,  
Russian Federation, Yoshkar-Ola*

**Nikolay Krutskikh**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Volga State Technological University,  
Russian Federation, Yoshkar-Ola*

**Sergey Alibekov**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Volga State Technological University,  
Russian Federation, Yoshkar-Ola*

**Аннотация.** Приведены основные известные теоретические способы расчета постоянных магнитов и механических сил возникающих между их магнитными полями. Представлен способ исследования физических сил взаимодействия между постоянными магнитами и предложена обобщенная математическая функция описывающая зависимость возникающей силы от расстояния между постоянными магнитами. Представлен обобщенный способ исследования постоянных магнитов для разработки динамических магнитных опор и подвесов состоящих из магнитных сегментов позволяющих получать равномерное магнитное поле.

**Abstract.** The main known theoretical methods for calculating permanent magnets and mechanical forces arising between their magnetic fields are given. A method for studying the physical forces of interaction between permanent magnets is presented, and a generalized mathematical function is described that describes the dependence of the arising force on the distance between the permanent magnets. A generalized method for the study of permanent magnets for the development of dynamic magnetic supports and suspensions consisting of magnetic segments allowing to obtain a uniform magnetic field is presented.

**Ключевые слова:** исследования; коэрцитивная сила; магнитная муфта; магнитная опора; межмагнитное взаимодействие; постоянный магнит.

**Keywords:** research; coercive force; magnetic coupling; magnetic support; intermagnetic interaction; permanent magnet.

Исследование физических сил, возникающих между постоянными магнитами (ПМ), представляет интерес в связи с расчетом различных устройств и механизмов в которых используются ПМ, например, таких как магнитные муфты для бесконтактной передачи вращающего момента с ведущего вала на ведомый или магнитных подвесов и опор, обладающих значительными преимуществами по сравнению с традиционными опорами, повышающими общую надежность, долговечность и КПД механизма, вследствие сведения к минимуму сил механического трения в совокупности с отсутствием системы управления, т. к. использование ПМ устраняет необходимость наличия источника питания, что повышает автономную и эксплуатационную надежности системы в целом.

Для изготовления ПМ используют оксид железа  $Fe_2O_3$  в соединении с ферритом бария или ферритом стронция, литые и металлокерамические сплавы на основе Fe-Al-Ni-Co (альнико), редкоземельные магниты (РЗМ) на основе SmCo (самарий-кобальт) и неодимовые NdFeB (неодим-железо-бор).

Достоинством ферритовых магнитов является низкая стоимость, устойчивость к размагничиванию и коррозионная стойкость. Как недостаток можно выделить хрупкость и низкие показатели остаточной индукции.

Магниты из сплава альнико характеризуются устойчивостью к нагреву, высокой коррозионной стойкостью, но обладают низкой коэрцитивной силой, вследствие чего легко размагничиваются.

Самарий-кобальтовые магниты (SmCo) при высокой технологичности, стойкости к высоким температурам и коррозионной стойкости, обладают высокой себестоимостью.

Неодимовые магниты (NdFeB) характеризуются высокой коэрцитивной силой при низкой стоимости, но обладают низкой коррозионной стойкостью, вследствие чего покрываются медью, никелем или цинком.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к современным изделиям заключающимся в низких себестоимости и весе, малых габаритных размерах и высокой надежности наиболее оптимальным является использование неодимовых магнитов (NdFeB).

Применение РЗМ приводит к компактности и миниатюрности и считается более целесообразным и экономически обоснованным [3].

Магниты делятся на классы (N33, N35, N38...), которые характеризуются величинами остаточной магнитной индукции, коэрцитивной силы, но в большей степени их мощностью, измеряемой в  $кДж/м^3$  и определяемой как относительная сила, которую необходимо приложить к магниту для отрыва его от листа (как правило стального)

при соблюдении ряда условий по направлению прикладываемой силы, толщине, габаритам, состоянию поверхности и материалу, чем выше класс магнита, тем выше величина этой силы. К цифровой маркировке магнита добавляется буквенная, например N35M, которая обозначает верхний предел эксплуатационной температуры магнита. **N** (Normal) – до 80°C; **M** (Medium) – до 100°C; **H** (High) – до 120°C; **SH** (Super High) до 150°C; **UH** (Ultra High) – до 180°C; **EH** (Extra High) – до 200°C.

При расчете магнитных систем измерительных приборов и средств автоматики применяют три основных метода: метод отношений, метод размагничивающего фактора и метод эквивалентного соленоида. Метод отношений используют при расчете магнитов с арматурой, метод размагничивающего фактора – при расчете магнитов без арматуры в форме брусков и цилиндров, метод эквивалентного соленоида – при расчете магнитов без арматуры, выполненных из материалов с очень высокими значениями коэрцитивной силы и энергетического произведения, т. е. РЗМ [3].

Метод эквивалентного соленоида основан на возможности рассматривать ПМ как однослойный соленоид, имеющий очень тонкую обмотку, по которой протекает намагничивающий ток. Условием эквивалентности является равенство магнитных моментов соленоида и магнита [3].

Расчет сил, возникающих при взаимодействии между ПМ, осуществляется методом эквивалентных диполей [3], [4]. Суть метода заключается в замене магнитов эквивалентными магнитными диполями. Условием эквивалентности является равенство значений магнитного момента у диполя и магнита:

$$q_m \cdot l = M_m \cdot V_m, \quad (1)$$

где:  $q_m$  – магнитный заряд;  $l$  – плечо эквивалентного диполя;  $M_m$  – намагниченность материала магнита;  $V_m$  – объем магнита.

Исходя из закона Кулона – модуль силы взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме прямо пропорционален произведению модулей этих зарядов и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними, при условии, что  $l \ll r_0$ , где  $r_0$  – расстояние между центрами диполей, сила  $F$  взаимодействия магнитов определяется как:

$$F = (3 \cdot \mu_0 \cdot P_{m1} \cdot P_{m2}) / (2 \cdot \pi \cdot z^4), \quad (2)$$

где:  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $z$  – расстояние между магнитами;  $P_{m1}$  и  $P_{m2}$  – магнитные моменты первого и соответственно второго магнитов.

Вследствие того, что в формулу (2) в качестве характеристик магнитов входят только их магнитные моменты, она может быть применена для магнитов любой формы, при условии, чтобы расстояние между ними превышало их размеры, и их магнитные моменты были параллельны. Сила взаимодействия между ПМ обратно пропорциональна четвертой степени расстояния между ними, вследствие диполь-дипольного характера взаимодействия.

Для расчета сил межмагнитного взаимодействия, существуют различные программные продукты, например, ELCUT, в котором производится моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Решение задач магнитостатики могут проводиться как в линейной так и нелинейной постановках, в ELCUT используется уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала  $A$  ( $\mathbf{B} = \text{rot } A$ ,  $\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции).

Силы отталкивания или притяжения между двумя ПМ равны [1], что также подтверждается расчетами выполняемыми в ELCUT, поэтому экспериментальные исследования взаимодействия между ПМ сводятся к нахождению силы притяжения.

Установка для проведения экспериментов изображена на Рис.1.

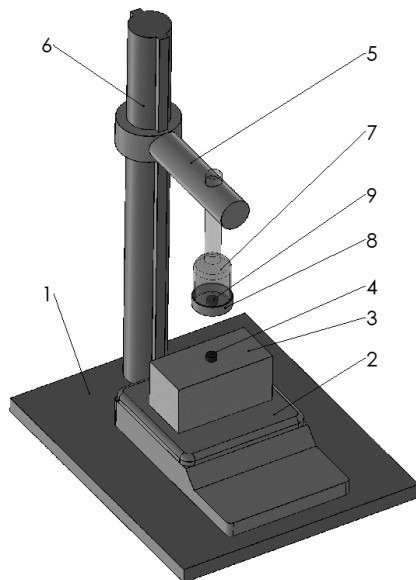
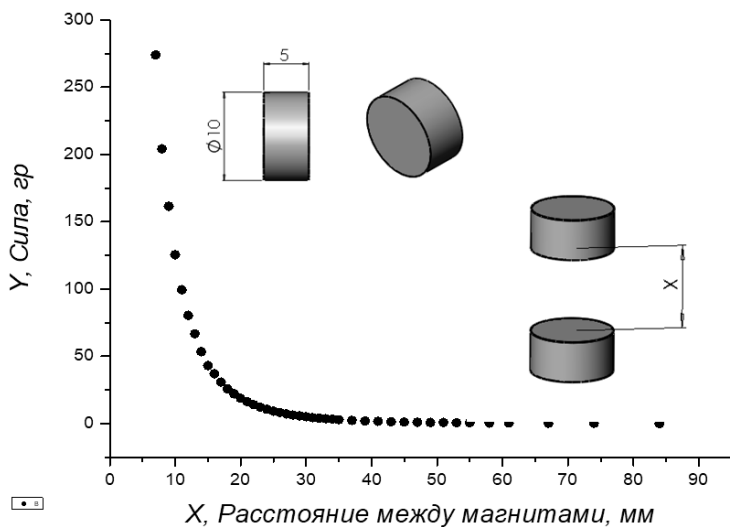


Рисунок 1. Экспериментальная установка



В нижней части, на основании 1, устанавливаются электронные весы 2 с точностью измерения 0,01г., на которых располагается груз 3 выполненный из немагнитного материала, на котором крепится исследуемый магнит 4. Вверху установки, на держателе 5, установленном на направляющей штанге 6 с возможностью осевого перемещения, крепится полая емкость 7, выполненная из немагнитного материала как и съемная крышка 8, в которую помещается второй образец исследуемого магнита 9.

Для проведения эксперимента на установку помещаются магниты 9 и 4 разноименными полюсами друг напротив друга. По показаниям весов фиксируется вес груза 3 с магнитом 4 и обозначается как базовый. После этого магнит 9 смещается вниз к магниту 4 на минимально возможное расстояние между ними для самоустановки магнита 9 относительно магнита 4 и соответственно совмещения их магнитных полей. После этого магнит 9 отводится в исходное положение и, с определенным дифференцированным шагом, начинает опускаться вниз, с одновременным снятием и записью, в каждой точке останова, показаний весов и расстояния между магнитами. Сила взаимодействия между ПМ определяется как разность, в каждой точке останова, изначального базового значения от текущего показания весов.



**Рисунок 2. График зависимости сил притяжения двух геометрически равных РЗМ класса N38, в зависимости от расстояния между ними**

Проведены исследования сил взаимодействия ряда РЗМ (NdFeB) отличающихся между собой как по форме, так и по размерам. По данным, полученным в результате проведенных опытов, были построены графические и математические зависимости. В качестве примера, на Рис.2, представлен график зависимости сил притяжения двух геометрически равных РЗМ класса N38, в зависимости от расстояния между ними.

В виде частичной выборки часть проводимых измерений сверялась с данными по расчетам полученными в программном пакете ELCUT\_6.3Student выражаемых в пондеромоторной силе, как суммарной магнитной силе, действующей на тела, заключенных в заданном объеме. Расхождения с полученными данными в ELCUT и данными по эксперименту в среднем составило от 5 до 15%, что возможно связано как с погрешностью измерений и параметров материала, так и ограничением по числу узлов в сетке конечных элементов накладываемых в ELCUT и выбору контура интегрирования, что влияет на точность получаемых результатов.

Вычисление сил межмагнитного взаимодействия с помощью формулы (2), дает относительно точный результат только после введения в формулу поправочных коэффициентов. Неудобство ее использования также обусловлено отсутствием в ней четких граничных условий, т. к. известно что область ее применения ограничена определенным соотношением линейных размеров магнитов и расстоянием между ними.

Для всех выбранных пар исследуемых магнитов, в независимости от их формы и размеров, наиболее оптимальной, по методу наименьших квадратов [2], оказалась обобщенная математическая функция вида:

$$(a/x^2) + b/x + c, \quad (3)$$

которая показала хорошую сходимость с экспериментальными данными.

С учетом рассчитанных коэффициентов полученная квадратичная зависимость, для магнитов Рис.2, выглядит как:  $(17087,3/x^2) - (523,8/x) + 3,8$ , где  $x$  – расстояние между магнитами. Данное уравнение дает достаточно точный результат начиная с расстояния между магнитами 37мм и ниже. Именно в этом пределе наблюдается наименьшее (менее 10%) расхождение между опытными и рассчитанными по зависимости (3) результатами.

Учитывая, что параметры магнитных материалов даются с точностью 5%, а принятые методы расчета магнитных проводимостей имеют ряд допущений, точность расчета магнитных систем в 10-15 % считается удовлетворительной [3].

Для зависимости расстояния 37мм и выше до момента начала физического контакта магнитных полей, также характерна квадратичная зависимость. В результате обобщенные результаты измерений, для каждой пары магнитов, представляются в виде системы состоящей из двух уравнений, граничные условия выбора между которыми определяются нелинейной зависимостью их суммарного объема от расстояния между ними и которые могут быть выражены, например, в виде степенного полинома. В полученную систему уравнений, для расчета взаимодействия между магнитами других классов, вводятся поправочные коэффициенты на величину остаточной магнитной индукции.

В результате, расчет систем межмагнитного как статического, так и динамического взаимодействия, с учетом возросших скоростей расчета и обработки информации процессорной техникой, может быть представлен в виде обобщения получаемых эмпирических систем уравнений, посредством использования различных алгоритмов таких языков программирования как C++, C# или Java, в единой математической модели.

Полученный выше результат исследований может быть применен к магнитным муфтам, для расчета передаваемого ими крутящего момента. Для систем, состоящих из магнитных опор и подвесов, работающих не в статическом режиме, представляет интерес экспериментальные исследования сил возникающих между магнитами при наличии градиента смещения между их плоскостями симметрии, которые выражаются функциональной зависимостью  $F(x, \Delta r, V)$ , где  $F$  – величина возникающей силы,  $x$  – расстояние между магнитами,  $\Delta r$  – величина асимметричного смещения в системе ПДСК по плоскости взаимодействия,  $V$  – объем магнита, или безразмерная величина характеризующая геометрические параметры ПМ.

Данные исследования позволяют с достаточной степенью точности рассчитать, например, системы магнитных опор или подвесов, выполненных не из сплошного ПМ, а набираемых из магнитных сегментов. Величины полученных сил, в совокупности с методами 3D моделирования позволяют определить общее оптимальное количество магнитных пар в системе и выполнить их оптимальную расстановку, в которой сведены к минимуму «провалы» (неравномерность) магнитного поля за счет их перекрытия соседними и противоположащими парами ПМ.

Проведенное исследование позволяет повысить КПД магнитной опоры (подвеса), снизить ее себестоимость, отказаться от ограничений по привязке к существующим размерам сплошных ПМ при проектировании магнитных опор, или дорогостоящего изготовления ПМ нестандартного размера, а также позволяет определить общее оптимальное количество магнитных пар в системе и выполнить их оптимальную

расстановку с целью уменьшения «провалов» (неровности) магнитного поля за счет перекрытия с соседними и противоположащими парами постоянных магнитов.

### Список литературы:

1. Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Машиностроение, 2014. –267с.
2. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – Изд. 2-е, доп. и испр. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 349с.
3. Постоянные магниты: Справочник / Альтман А.Б., Герберг А.Н., Гладышев П.А. и др.; Под ред. Ю.М. Пятина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. Энергия, 1980. – 488с., ил.
4. Слободянюк А.И. Физика для избранных: Магнитостатика. Электродинамика. Теория колебаний – Минск: Белорусская ассоциация «Конкурс», 2011. - 448 с.

**НАУЧНЫЙ ФОРУМ:  
ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

*Сборник статей по материалам XXX международной  
научно-практической конференции*

№ 1 (30)  
Январь 2020 г.

В авторской редакции

Подписано в печать 20.01.20. Формат бумаги 60x84/16.  
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 3,75. Тираж 550 экз.

Издательство «МЦНО»  
123098, г. Москва, ул. Маршала Василевского, дом 5, корпус 1, к. 74  
E-mail: tech@nauchforum.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного  
оригинал-макета в типографии «Allprint»  
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 3



**НАУЧНЫЙ  
ФОРУМ**  
[nauchforum.ru](http://nauchforum.ru)