



**Russian-Armenian University**

*Printed by the decision of the  
Academic Council of RAU*

**V E S T N I K**  
**OF RUSSIAN-ARMENIAN UNIVERSITY**  
**(SERIES: PHYSICAL-MATHEMATICAL**  
**AND NATURAL SCIENCES)**

**RAU University Press**  
**No. 2/2023**

**Российско-Армянский университет**

*Печатается по решению  
Ученого Совета РАУ*

**В Е С Т Н И К**  
**РОССИЙСКО-АРМЯНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**  
**(СЕРИЯ: ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ**  
**И ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ)**

**Издательство РАУ**  
**№ 2/2023**

Вестник РАУ, № 2. – Ер.: Изд-во РАУ, 2023.– 88 с.

**Главный редактор:** академик НАН РА, д.ф.-м.н., проф. *Казарян Э.М.*

**Зам. главного редактора:** к.ф.-м.н., д.филос.н., проф. *Аветисян П.С.*

**Ответственный секретарь:** к.х.н. *Шагинян Р.С.*

**Редакционная коллегия:**

**Математика и информатика**

*Р.Г. Арамян* – д.ф.-м.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ), Институт Математики НАН РА

*Д.Г. Асатрян* – д.т.н., проф., Институт проблем информатики и автоматизации НАН РА

*Г.Г. Казарян* – д.ф.-м.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

*О.В. Бесов* – член-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф., Математический институт им. В.А. Стеклова РАН (Россия)

*В.И. Буренков* – д.ф.-м.н., проф., Математический институт им. В.А. Стеклова РАН (Россия)

*А.Г. Сергеев* – академик РАН, д.ф.-м.н., проф., Математический институт им. В.А. Стеклова РАН (Россия)

*А.И. Аветисян* – академик РАН, д.ф.-м.н., проф., Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН (Россия)

*В.Ш. Меликян* – член-корр. НАН РА, д.т.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ), Synopsys

**Биологические и химические науки**

*А.А. Аракелян* – д.б.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ), Институт Молекулярной биологии НАН РА

*В.И. Муронца* – д.б.н., проф., Московский государственный университет (МГУ) (Россия)

*А.А. Оганесян* – к.б.н., доц., Российско-Армянский университет (РАУ)

*Р.В. Захарян* – к.б.н., Российско-Армянский университет (РАУ)

*Г.Г. Данагулян* – член-корр. НАН РА, д.х.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

*К.Б. Назарян* – д.б.н., проф., Институт Молекулярной биологии НАН РА

*Л.М. Епископосян* – д.б.н., проф., Институт Молекулярной биологии НАН РА

*А.Б. Киракосян* – д.б.н., проф., Массачусетский технологический институт (США)

**Физико-технические науки**

*Д.А. Фирсов* – д.ф.-м.н., проф., СПбПУ им. Петра Великого (Россия)

*А.В. Папоян* – член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Институт физических исследований НАН РА

*С.Г. Петросян* – член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

*А.А. Саркисян* – д.ф.-м.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

*Е.Ш. Мамасахлисов* – д.ф.-м.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

*В.Г. Аветисян* – д.т.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

Журнал основан в 2003 году и входит в перечень периодических изданий, зарегистрированных ВАК РА и РИНЦ

Российско-Армянский университет, 2023г.  
ISSN1829-0450

© Издательство РАУ, 2023

**Editor-in-Chief:** Academician of NAS RA, D.Sc. in Physics and Mathematics,  
Prof. **Kazaryan E.M.**

**Deputy Editor-in-chief:** Ph.D. in Mathematics, D. Sc. in Philosophy, Prof. **Avetisyan P.S.**

**Executive secretary:** Ph.D. in Science (Chemistry) **Shaginyan R.S.**

**Editorial team**

**Mathematics and Computer Science**

*R.G. Aramyan* – D. Sc. (Mathematics), Prof., Russian-Armenian University (RAU), Institute of Mathematics NAS RA

*D.G. Asatryan* – D. Sc. (Technical Sciences), Prof., Institute of Informatics and Automation Problems of NAS RA

*G.G. Kazaryan* – D. Sc. (Mathematics), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

*O.V. Besov* – corresponding member of RAS, D. Sc. (Mathematics), Prof., Mathematical Institute Named after V.A. Steklov RAS (Russia)

*I.A. Burenkov* – D. Sc., Prof., Mathematical Institute Named after V.A. Steklov RAS (Russia)

*A.G. Sergeev* – Academician of the Russian Academy of Sciences, D. Sc. (Mathematics), Prof., Mathematical Institute Named after V.A. Steklov RAS (Russia)

*A.I. Avetisyan* – Academician of the Russian Academy of Sciences, D. Sc. (Mathematics), Prof., Institute of System Programming Named after V.P. Ivannikov RAS (Russia)

*V.Sh. Melikyan* – corresponding member of NAS RA, D. Sc. (Technical Sciences), Prof., Russian-Armenian University (RAU), Synopsys

**Biological and Chemical Sciences**

*A.A. Arakelyan* – D. Sc. (Biology), Prof., Institute of Molecular Biology NAS RA

*I.A. Muronets* – D. Sc. (Biology), Prof., Moscow State University (Russia)

*A.A. Hovhannisyanyan* – Ph.D. in Science (Biology), Russian-Armenian University (RAU)

*R.V. Zakharyan* – Ph.D. in Science (Biology), Russian-Armenian University (RAU)

*G.G. Danagulyan* – corresponding member of NASRA, D. Sc. (Chemistry), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

*K.B. Nazaryan* – D.Sc. (Biology), Prof., Institute of Molecular Biology NAS RA

*L.M. Episkoposyan* – D.Sc. (Biology), Prof., Institute of Molecular Biology NAS RA

*A.B. Kirakosyan* – D.Sc. (Biology), Prof., Massachusetts Institute of Technology (USA)

**Physical and Technical Sciences**

*D.A. Firsov* – D. Sc. (Physics), Prof., SPbPU Named after Peter the Great (Russia)

*A.V. Papoyan* – corresponding member of NAS RA, D.Sc. (Physics), Prof., Institute of Physical Research NAS RA

*S.G. Petrosyan* – corresponding member of NAS RA, D. Sc. (Physics), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

*A.A. Sargsyan* – D.Sc. (Physics), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

*E.S. Mamasakhlisov* – D.Sc. (Physics), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

*V.G. Avetisyan* – D. Sc. (Technical Sciences), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

The journal founded in 2003 is included in the list of periodicals registered by HAC RA and RSCI

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENT

### МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

<b>Хачатурян М.А., Геворгян Д.Г.</b> Об описании следов функций из одного класса мультианизотропных пространств Соболева .....	7
<b>Khachatryan R., Veziryan R.</b> Design of Implementation of a Lock-free min-max Queue .....	15

### ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>Тадевосян С.Р., Аветисян В.Г., Аветисян С.М.</b> Устройства регулирования прямого и реверсивного хода измерительного зонда при автоматических измерениях ближнего поля антенн миллиметрового диапазона .....	29
<b>Новиков А.А.</b> Влияние высокотемпературного отжига на воздухе на оптические свойства YAG: Ce, Li .....	38
<b>Арутюнян Л.А.</b> Сравнительные характеристики солнечных voltaических и традиционных электростанций .....	45
<b>Геворгян Д.Г., Гаваладжян С.П.</b> Экситонные состояния в конической квантовой точке GaAs .....	57

### ХИМИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>Тумоян Дж.Г., Казарян Ш.А., Оганесян А.А.</b> Воздействие биогенных наночастиц серебра (AgNPs) на некоторые биохимические показатели функционирования печени белых беспородных крыс Wistar .....	66
<b>Варданян Л.Р., Айрапетян С.А.</b> Листья некоторых деревьев как антиоксиданты .....	76

# МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

DOI 10.48200/1829-0450\_pmn\_2023\_2\_7  
УДК 517.518.23

Поступила: 15.12.2023г.  
Сдана на рецензию: 18.12.2023г.  
Подписана к печати: 22.12.2023г.

## ОБ ОПИСАНИИ СЛЕДОВ ФУНКЦИЙ ИЗ ОДНОГО КЛАССА МУЛЬТИАНИЗОТРОПНЫХ ПРОСТРАНСТВ СОБОЛЕВА

*М.А. Хачатурян<sup>1</sup>, Д.Г. Геворгян<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Российско-Армянский (Славянский) университет*

<sup>2</sup>*Римский университет Ла Сапиенца (Рим, Италия)*

*khmikayel@gmail.com*

### АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются следы функций и их производных из мультианизотропного пространства Соболева  $W_2^{\mathfrak{R}}(\mathbb{R}^n)$  в случае одного класса вполне правильных многогранников  $\mathfrak{R}$ .

**Ключевые слова:** вполне правильный многогранник, мультианизотропное пространство Соболева, след функции.

### 1. Введение

Впервые теоремы вложения для пространств Соболева были получены им в 30-е годы прошлого столетия. Позднее эти результаты были изложены Соболевым в его монографии [1]. В дальнейшем активно продолжалось построение и исследование различных шкал

пространств дифференцируемых функций типа Соболева. Теория анизотропных пространств Соболева  $W_p^{(l_1, l_2, \dots, l_n)}(R^n)$  в случае  $p = 2$  полностью разработана Л.Н. Слободецким [2, 3]. При изучении некоторого класса гипоеллиптических уравнений, введенного Л. Хермандером, возникла необходимость изучения мультианизотропных функциональных пространств Соболева  $W_p^{\mathfrak{N}}(R^n)$ , определяемых с помощью вполне правильного многогранника  $\mathfrak{N}$  [4], и которые являются обобщением анизотропных пространств Соболева. Впервые пространства такого типа изучались в работах С.М. Никольского, В.П. Михайлова, Г.Г. Казаряна. Развитию теории мультианизотропных пространств посвящён цикл работ Г.А. Карапетяна [5–10].

В данной работе получены оценки для следов функций  $f \in W_2^{\mathfrak{N}}(R^n)$  и их обобщенных производных  $D_{x_3 \rightarrow x_n}^s f$  ( $0 \leq s < l$ ) на гиперплоскости  $x_3 \rightarrow x_n = a$  для одного частного случая вполне правильного многогранника  $N$ . Полученные результаты являются аналогами прямых теорем вложения для анизотропных соболевских пространств. Отметим, что в работе обобщается прямая теорема вложения, полученная в работе [11], где трехмерный вполне правильный многогранник  $\mathfrak{N}$  представляет из себя пирамиду с вершиной  $(0, 0, l)$  и с основанием  $\mathfrak{N}_0$ .

## 2. Определения, обозначения и вспомогательные результаты

Пусть  $R^n$  –  $n$ -мерное евклидово пространство точек  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $Z_+$  и  $Q_+$  множества, соответственно, целых и рациональных неотрицательных чисел,  $Q_+^n$  – множество  $n$ -мерных векторов с компонентами из  $Q_+$ ,  $Z_+^n$  – множество  $n$ -мерных мультииндексов  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ , где  $\alpha_j \in Z_+$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Для  $x, \xi \in R^n$ ,  $t \in Z_+$  и  $\alpha \in Z_+^n$  обозначим  $|\alpha| := \alpha_1 + \dots + \alpha_n$ ,  $x\xi = \sum_{k=1}^n x_k \xi_k$ ,  $\xi^t := (\xi_1^t, \xi_2^t, \dots, \xi_n^t)$ ,  $\xi^\alpha := \xi_1^{\alpha_1} \xi_2^{\alpha_2} \dots \xi_n^{\alpha_n}$ ,  $D^\alpha := D_{x_1}^{\alpha_1} D_{x_2}^{\alpha_2} \dots D_{x_n}^{\alpha_n}$ , понимаемая как обобщенная производная, по С.Л. Соболеву, порядка  $\alpha$ .



Через  $S(R^n)$  обозначим класс Шварца быстро убывающих на бесконечности функций. Через  $F[\varphi]$  и  $F^{-1}[\varphi]$  обозначим, соответственно, прямое и обратное преобразование Фурье функции  $\varphi \in S(R^n)$ . Пусть  $1 \leq k < n$ ,  $x = (x', x'')$ ,  $\xi = (\xi', \xi'')$ , где  $x' = (x_1, x_2, \dots, x_k) \in R^k$ , и  $x'' = (x_{k+1}, \dots, x_n) \in R^{n-k}$ . Частичное преобразование Фурье функции  $\varphi(x) \in S(R^n)$  относительно группы переменных  $x'$  и частичное обратное преобразование Фурье функции  $\psi(\xi) \in S(R^n)$  относительно группы переменных  $\xi'$  будем обозначать через  $F_{x'}[\varphi](\xi', x'')$  и  $F_{\xi'}^{-1}[\psi](x', \xi'')$ , соответственно.

Для заданного набора векторов из  $Q_+^n$  через  $\mathfrak{N}$  обозначим наименьший выпуклый многогранник, содержащий все точки этого набора. Многогранник  $\mathfrak{N}$  называется «вполне правильным», если он имеет вершину в начале координат и отличные от начала координат вершины на каждой оси координат, а внешние нормали всех  $(n - 1)$ -мерных некоординатных граней имеют положительные компоненты. Обозначим через  $r^k$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ) вершины многогранника  $\mathfrak{N}$ , отличные от нуля, которые будем называть «главными вершинами». Для произвольного  $t \in Q_+$  через  $t\mathfrak{N}$  обозначим вполне правильный многогранник с главными вершинами  $tr^k$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ). Для заданного вполне правильного многогранника  $\mathfrak{N}$  обозначим  $P_{\mathfrak{N}}(\xi) := 1 + \sum_{k=1}^M (\xi^2)^{r^k}$ .

Легко проверяются следующие две леммы.

**Лемма 2.1.** Для произвольного  $n$ -мерного вполне правильного многогранника  $\mathfrak{N}$  и числа  $q > 0$  выражения  $P_{\mathfrak{N}}(\xi)^q$  и  $P_{q\mathfrak{N}}(\xi)$  эквивалентны, т.е. с некоторыми постоянными  $C_1, C_2 > 0$  выполняется соотношение

$$C_1 P_{\mathfrak{N}}^q(\xi) \leq P_{q\mathfrak{N}}(\xi) \leq C_2 P_{\mathfrak{N}}^q(\xi) \quad \forall \xi \in R^n. \quad (2.1)$$

**Лемма 2.2.** Если для двух  $n$ -мерных вполне правильных многогранников  $\mathfrak{N}$  и  $\mathfrak{M}$  выполняется условие  $\mathfrak{N} \subset \mathfrak{M}$ , то с некоторой постоянной  $C > 0$

$$P_{\mathfrak{N}}(\xi) \leq C P_{\mathfrak{M}}(\xi) \quad \forall \xi \in R^n. \quad (2.2)$$

**Определение 2.1.** Мультианизотропное пространство Соболева дробного порядка  $W_2^{\mathfrak{N}}(R^n)$  определяется как множество

$$W_2^{\mathfrak{N}}(R^n) := \{u: u \in L_2(R^n), \sqrt{P_{\mathfrak{N}}(\xi)}F[u](\xi) \in L_2(R^n)\},$$

наделенное нормой

$$\|u\|_{W_2^{\mathfrak{N}}(R^n)} = \left( \int_{R^n} P_{\mathfrak{N}}(\xi) |F[u](\xi)|^2 d\xi \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.3)$$

Отметим, что если главными вершинами многогранника  $\mathfrak{N}$  являются мультииндексы  $\alpha^k \in Z_n^+$ , то данное нами определение дробного мультианизотропного пространства совпадает с классическим определением мультианизотропного пространства Соболева для целочисленных производных

$$W_2^{\mathfrak{N}}(R^n) := \{f: f \in L_2(R^n), D^{\alpha^k} f \in L_2(R^n) \forall k = 1, 2, \dots, M\},$$

наделенное эквивалентной к выражению (2.3) нормой

$$\|f\|_{W_2^{\mathfrak{N}}(R^n)} = \|f\|_{L_2(R^n)} + \sum_{k=1}^M \|D^{\alpha^{(k)}} f\|_{L_2(R^n)}.$$

Отметим, что для любого  $n$ -мерного вполне правильного многогранника  $\mathfrak{N}$ ,  $W_2^{\mathfrak{N}}(R^n)$  является Банаховым пространством, и множество функций  $C_0^\infty(R^n)$  плотно в  $W_2^{\mathfrak{N}}(R^n)$  (см. [11])

### 3. Описание следов функций из пространства $W_2^{\mathfrak{N}}(R^n)$

Пусть  $\mathfrak{N}_0 \subset R^{n-1}$  вполне правильный  $(n-1)$ -мерный многогранник,  $q \in (0,1)$  некоторое рациональное число,  $s_0$  и  $l$  натуральные числа:  $0 < s_0 < l$ . Рассмотрим  $n$ -мерный вполне правильный многогранник  $\mathfrak{N} \subset R^n$  с вершиной  $(0, \dots, 0, l)$  и такой, что все остальные главные вершины многогранника лежат на сечениях  $\mathfrak{N}$  гиперплоскостями  $x_n = s_0$  и  $x_n = 0$ , а сечения эти в свою очередь равны соответственно многогранникам  $q\mathfrak{N}_0$  и  $\mathfrak{N}_0$ .

Для заданного целого положительного числа  $s < l$  через  $\mathfrak{N}_s$  обозначим проекцию на гиперплоскость  $x_n = 0$  сечения многогранника  $\mathfrak{N}$  гиперплоскостью  $x_n = s$  и положим  $\mathfrak{M}_s := m_s \mathfrak{N}_s$ , где

$$m_s := \begin{cases} 1 - \frac{1-q}{2(s_0 - (1-q)s)}, & 0 \leq s < s_0, \\ 1 - \frac{1}{2(l-s)}, & s_0 \leq s < l. \end{cases}$$

**Замечание 3.1.** В дальнейшем, для простоты записи опустим коэффициент  $1/(2\pi)^{\frac{n}{2}}$  в преобразовании Фурье, так как это будет влиять лишь на константу  $C$  в формулировках теорем.

**Теорема 3.1.** Пусть  $u \in C_0^\infty(R^n)$  произвольная функция,  $s: 0 \leq s < l$  целое число, тогда существует  $C > 0$  – такое, что для произвольной  $a \in R$  выполняется неравенство.

$$\|D_{x_n}^s u|_{x_n=a}\|_{W_2^{\mathfrak{M}_s}(R^{n-1})} \leq C \|u\|_{W_2^{\mathfrak{N}}(R^n)}. \quad (3.1)$$

*Доказательство.* По определению нормы в пространстве  $W_2^{\mathfrak{M}_s}(R^{n-1})$  имеем

$$\|D_{x_n}^s u|_{x_n=a}\|_{W_2^{\mathfrak{M}_s}(R^{n-1})}^2 = \int_{R^{n-1}} P_{\mathfrak{M}_s}(\xi') |F_{x'}[D_{x_n}^s u](\xi', a)|^2 d\xi'. \quad (3.2)$$

где  $\xi' = (\xi_1, \dots, \xi_{n-1})$ . Из свойств преобразования Фурье имеем, что

$$F_{x'}[D_{x_n}^s u](\xi', x_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} (i\xi_n)^s F[u](\xi', \xi_n) e^{ix_n \xi_n} d\xi_n \quad (3.3)$$

Рассмотрим два случая.

1) Случай  $0 \leq s < s_0$ . Из представления (3.3) получим

$$\begin{aligned} F_{x'}[D_{x_n}^s u](\xi', a) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{ia\xi_n}}{\left(P_{\mathfrak{N}_s}(\xi') + P_{q\mathfrak{N}_0}(\xi')\xi_n^{2(s_0-s)}\right)^{1/2}} \times \\ &\times (i\xi_n)^s \left(P_{\mathfrak{N}_s}(\xi') + P_{q\mathfrak{N}_0}(\xi')\xi_n^{2(s_0-s)}\right)^{1/2} \cdot F[u](\xi', \xi_n) d\xi_n. \end{aligned}$$

Применяя неравенство Гёлдера и учитывая, что, согласно лемме 2.2, с некоторой постоянной  $C_1 > 0$  выполняется неравенство

$$\xi_n^{2s}(P_{\mathfrak{N}_s}(\xi') + P_{q\mathfrak{N}_0}(\xi')\xi_n^{2(s_0-s)}) \leq C_1 P_{\mathfrak{N}}(\xi) \forall \xi \in R^n,$$

получим

$$|F_{x'}[D_{x_n}^s u](\xi', a)|^2 \leq C_1 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{P_{\mathfrak{N}_s}(\xi') + P_{q\mathfrak{N}_0}(\xi')\xi_n^{2(s_0-s)}} d\xi_n \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\mathfrak{N}}(\xi) |F[u](\xi', \xi_n)|^2 d\xi_n.$$

Так как

$$q\mathfrak{N}_0 = \frac{qs_0}{s_0 - (1-q)s} \mathfrak{N}_s,$$

то в силу леммы 2.1 с некоторой константой  $C_2 > 0$  имеем

$$|F_{x'}[D_{x_n}^s u](\xi', a)|^2 \leq C_1 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{P_{\mathfrak{N}_s}(\xi') + C_2 P_{\mathfrak{N}_s}(\xi') \frac{qs_0}{s_0 - (1-q)s} \xi_n^{2(s_0-s)}} d\xi_n \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\mathfrak{N}}(\xi) |F[u](\xi', \xi_n)|^2 d\xi_n.$$

Рассмотрим первый интеграл. Так как числа  $s_0$  и  $s$  – целые и  $s < s_0$ , то  $2(s_0 - s) > 1$ , и этот интеграл сходится. Производя в нем замену переменной  $\tau = P_{\mathfrak{N}_s}(\xi') \frac{1-q}{2(s_0 - (1-q)s)} \xi_n$  и учитывая эквивалентность выражений  $P_{\mathfrak{N}_s}(\xi')$  и  $P_{\mathfrak{N}_s}(\xi')^{m_s}$ , с некоторой постоянной  $C > 0$ , получим

$$|F_{x'}[D_{x_n}^s u](\xi', a)|^2 \leq \frac{C}{P_{\mathfrak{N}_s}(\xi')} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\mathfrak{N}}(\xi) |F[u](\xi', \xi_n)|^2 d\xi_n. \quad (3.4)$$

Из (3.4) и (3.2) немедленно следует (3.1).

2) Случай  $s_0 \leq s < l$ . Доказательство проводится аналогичным образом с той разницей, что в представлении (3.3) нужно умножить и разделить на выражение  $(P_{\mathfrak{N}_s}(\xi') + \xi_n^{2(l-s)})^{\frac{1}{2}}$ .

**Теорема 3.2.** Пусть  $f \in W_2^{\mathfrak{N}}(R^n)$  произвольная функция, и  $s: 0 \leq s < l$  – целое число. Тогда почти для всех  $a \in R$   $D_{x_n}^s f|_{x_n=a} \in$

$W_2^{q_s}(R^{n-1})$ , причем с некоторой постоянной  $C > 0$ , не зависящей от функции  $f$  и числа  $a$ , выполняется оценка

$$\|D_{x_n}^s f|_{x_n=a}\|_{W_2^{q_s}(R^{n-1})} \leq C \|f\|_{W_2^q(R^n)}.$$

**Теорема 3.3.** Пусть  $f \in W_2^q(R^n)$ ,  $s: 0 \leq s < l$  целое число,  $a \in R$ ,  $\mathcal{E}(a)$ : множество тех  $\varepsilon \in R$ , для которых  $D_{x_n}^s f|_{x_n=a+\varepsilon} \in W_2^{q_s}(R^{n-1})$ . Тогда существует функция  $\varphi_s \in W_2^{q_s}(R^{n-1})$  такая, что выполняются следующие соотношения

$$\lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow 0 \\ \varepsilon \in \mathcal{E}(a)}} \|D_{x_n}^s f|_{x_n=a+\varepsilon} - \varphi_s\|_{W_2^{q_s}(R^{n-1})} = 0,$$

$$\|\varphi_s\|_{W_2^{q_s}(R^{n-1})} \leq C \|f\|_{W_2^q(R^n)},$$

где  $C > 0$  константа, не зависящая от функции  $f$  и числа  $a$ . Причем если  $D_{x_n}^s f|_{x_n=a} \in W_2^{q_s}(R^{n-1})$ , то  $\varphi_s$  и  $D_{x_n}^s f|_{x_n=a}$  совпадают.

Доказательство теорем 3.2, 3.3 проводится аналогичным образом, как это сделано в работе [11], с используя теорему 3.1.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Соболев С.Л.* Некоторые применения функционального анализа в математической физике. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, (1950); изд. 2-е, перераб. и доп. Новосибирск (1962), изд. 3-е, перераб. и доп. М.: «Наука», 1988.
2. *Демиденко Г.В.* Пространства Соболева и обобщенные решения / Учебное пособие. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015.
3. *Слободецкий Л.Н.* Обобщенные пространства С.Л. Соболева и их приложение к краевым задачам для дифференциальных уравнений в частных производных. Л.: Ленинградский Государственный педагогический институт имени А.И. Герцена, Учетные записки: Физико-математический факультет. Т. 197, 1958.
4. *Ghazaryan H.* The Newton polyhedron, spaces of differentiable functions and general theory of differential equations // *Armenian Journal of Mathematics*. V. 9 (2017), No. 2. PP. 102–145.

5. *Карпетян Г.А.* Интегральное представление и теоремы вложения для  $n$ -мерных мультианизотропных пространств с одной вершиной анизотропности // «Сиб. мат. журнал». Т. 58, 2017, 3. СС. 573–590.
6. *Karapetyan G.* Integral representations of functions and embedding theorems for multianisotropic spaces on the plane with one anisotropy vertex // Journal of Contemporary Mathematical Analysis. V. 51, 2016, No 6. PP. 269–281.
7. *Karapetyan G., Arakelyan M.* Estimation of multianisotropic kernels and their application to the embedding theorems // Transactions of A. Razmadze Mathematical Institute. V. 171, 2017, No 1. PP. 48–56.
8. *Karapetyan G., Petrosyan H.* Embedding theorems for multianisotropic spaces with two vertices of anisotropy // Proceedings of the YSU, Physical and Mathematical Sciences. V. 51, 2017, No 1. PP. 29–37.
9. *Karapetyan G.* An Integral Representation and Embedding Theorems in the Plane for Multianisotropic Spaces // Journal of Contemporary Mathematical Analysis (Armenian Academy of Sciences). V. 52, 2017, No. 6. PP. 267–275.
10. *Karapetyan G., Arakelyan M.* Embedding Theorems for General Multianisotropic Spaces. *Mathematical Notes*. V. 104, 2018, No. 3. PP. 422–438.
11. *Хачатурян М.А., Акопян А.Р.* О следах функций из мультианизотропных пространств Соболева. Вестник РАУ, серия: Физико-математические и естественные науки, № 1, 2021, СС. 56–77.

## ON THE DESCRIPTION OF TRACES OF FUNCTIONS FROM ONE CLASS OF MULTI-ANISOTROPIC SOBOLEV SPACES

*M. Khachatryan, D. Gevorgyan*

*Russian-Armenian (Slavonic) University*

### ABSTRACT

In this paper, we obtain direct embedding theorems of different dimensions (trace theorems) for functions from the multi-anisotropic Sobolev space  $W_2^{\mathfrak{R}}(R^n)$  in the case of one class of completely regular polyhedron  $\mathfrak{R}$ .

**Keywords:** completely regular polyhedron, multianisotropic Sobolev space, trace of a function.

DOI 10.48200/1829-0450\_pmn\_2023\_2\_15  
UDC 004.42

Поступила: 05.12.2023г.  
Сдана на рецензию: 06.12.2023г.  
Подписана к печати: 15.12.2023г.

## DESIGN OF IMPLEMENTATION OF A LOCK-FREE MIN-MAX QUEUE

*R. Khachatryan, R. Veziryan*

*National Polytechnic University of Armenia  
“Quest Global Armenia” Inc.  
“IIAP of NAS RA”*

*raf.khachatryan4@gmail.com, rafaelveziryan@gmail.com*

### ABSTRACT

Modern software development often relies on lock-free data structures to efficiently implement multi-threaded or distributed algorithms. Among these structures, lock-free priority queues are significant. Traditional lock-free priority queues offer logarithmic time complexity in operations with minimum or maximum elements, but they do not support the flexibility to work with both of them in  $O(\log n)$  time. The Min-Max Heap addresses this limitation. It is a priority queue data structure based on a heap that supports Insert, DeleteMin, DeleteMax operations in  $O(\log n)$  time complexity and FindMin and FindMax in  $O(1)$  time complexity. This is done by adding the concept of minimum and maximum levels and keeping invariants for nodes in those levels. However, designing a lock-free priority queue based on the Min-Max Heap data structure is challenging and non-efficient. It is related to the fact that the work of some pointers during both insert and delete operations is too much. For this reason, there are some kind of data structures which design is convenient for lock-free priority queues. One of them is skiplist, it is a probabilistic and concurrent adaptive data structure that supports its operations on average in  $O(\log n)$  time and can provide concurrent modifications in different parts of its structure.

This paper introduces a design of implementation of a lock-free min-max queue by modifying a skiplist-based lock-free priority queue implementation to concurrently support operations with both minimum and maximum elements in logarithmic time.

**Keywords:** Lock-Free Data Structures, Parallel Programming, Priority Queue, Min-Heap, Skiplist.

## **Introduction**

Lock-free data structures are very important in today's algorithm design, when we are working in environments with multiple tasks happening at the same time. These structures can work faster, but they also have challenges. To make sure they work correctly, we need a well-thought-out design. The main data structures in lock-free programming are priority queues. They are useful in many kinds of problems, such as task scheduling, finding the minimum spanning tree, event-driven simulations, etc. These queues can work either with the minimum or the maximum element in logarithmic time, but not with both with the same complexity. Atkinson, Sack, Santoro, and Strothotte came up with a solution for this in a non-concurrent environment. They introduced the Min-Max Heap [1], a binary heap, that keeps the invariants for his tree levels supporting the insert and delete operations for both minimum and maximum elements in logarithmic time complexity. Moving this solution to a lock-free environment isn't easy. There are different implementations of lock-free priority queues, based on skiplist[4], multidimensional list [2], and Mounds [3]. We've adapted our solution based on the skiplist design. Using skiplist as a concurrent data structure is first proposed by Pugh [5]. The skiplist is a probabilistic data structure, based on a forward-linked list, which is additionally using levels in each node. Using levels, it stores the pointers in different parts of the list. By choosing level heights randomly it performs in average logarithmic time for search, insert, and delete operations. One of the main reasons for using skiplist is that skiplist provides concurrent modifications of individual parts of the data structure. Using skiplist as a base of concurrent priority queue



first is proposed by Lotan and Shavit [6]. Lotan and Shavit designed deletion in their priority queue, by distinguishing physical deletion and logical deletion, which enables physical deletion of separate nodes to be in parallel. The first implementation of a lock-free priority queue based on skiplist is presented by Sundell and Tsigas [7]. We decided to use the design of lockfree priority queue Introduced by Linden and Jonsson [8], which is reducing the count of global updates to shared memory in one Delete operation. Our main contribution is the Lock-Free Min-Max Queue. It's based on the design from [8], but we've added a way to perform delete operations with minimum and maximum elements keeping the logarithmic time complexity. We also used solutions from [8] to tackle common problems like the ABA problem and memory reclamation. The Lock Free Min-Max Queue can be useful in implementations of the operating system's scheduler algorithms to manage threads prioritization more effectively.

## **Materials and methods**

In this section, the main algorithm implementation with details is presented. The specified data structure is based on the data structure from article [8], which is a skiplist-based lock-free priority queue with optimized memory usage. We have extended the last discussed data structure to operate with both the minimum and the maximum elements in average logarithmic time by modifying the lock-free priority queue and adding a zero-level previous pointer for each node. As in article [8], a technique was used here too, to mark a node as deleted in [2] the last bit of the previous node's next pointer. This will help to effectively change the next pointer and deleted flag with CAS operation. We will rely on the assumption that each key is unique.

A node in the skiplist contains a value, key, array of next pointers, delete flag  $d$  (meaning that the next node is marked for deletion if it's true, false otherwise), flag for inserting state, height of node, and a node pointer to the previous node. The flag  $d$  is written in level 0's next pointer, and can be used in CAS operation to change the zero's pointer and flag bit with one

operation. The inserting flag indicates if a node is in an inserting state. Like in article [8], here too, notation  $\langle x.\text{next}[0], x.d \rangle$  in the pseudocode is used to indicate that these two data are written in one word, and both can be changed using one modifying instruction.

Fig. 1. Lock-Free Min-Max Queue: Nodes 1 and 14 were marked for deletion.

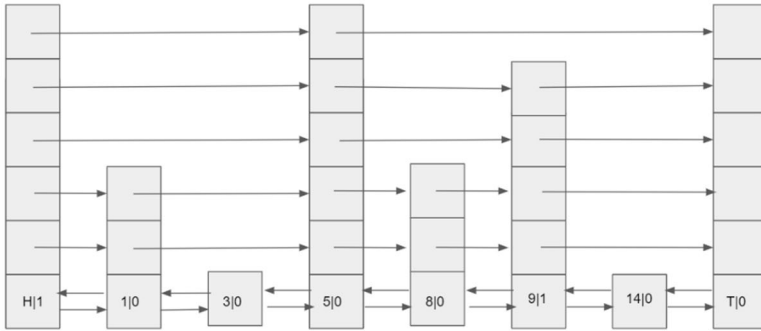


Fig. 2. Left: node struct definition. Right: skiplist struct definition.

```

1 Struct node {
2     value_t value;
3     key_t   key;
4     integer height;
5     bool    d;
6     bool    inserting;
7     node_t *next [];
8     node_t *prev;
9 };

```

```

1 struct skiplist {
2     node_t *head;
3     node_t *tail;
4     integer nlevels;
5 };

```

*DeleteMin operation.* The DeleteMin operation is unchanged as in article [8]. It traverses the skiplist's zero level and tries to set the deleted flag in the first non-deleted node, with an atomic FAO operation. If it succeeds, then the node will be set as deleted; if not, it will continue its work. After logical deletion, if the number of steps in traversal reaches the

defined threshold value, then the head's next pointers will be set to the last deleted node in preparation for physical deletion.

*The Restructure Operation.* The Restructure operation is the same as detailed in article [8], and it stays unchanged like the DeleteMin operation. The Restructure operation traverses 3 all levels of the head node higher than 0 level and updates the next pointers at each level to point to the last deleted node, using atomic CAS operation.

*Delete Max operation.*

Fig. 3. DeleteMax function.

---

```

1: function DELETEMAX(skiplist.t q)
2:   x ← q.tail
3:   offset ← 0
4:   newtail ← NULL
5:   obstail ← x.prev
6:   do
7:     prv ← x.prev
8:     if prv = q.head then
9:       return EMPTY
10:    end if
11:    sub_prv ← prv.prev
12:    if sub_prv.inserting and newtail = NULL then
13:      newtail ← x
14:    end if
15:    ⟨prv, d⟩ ← FAO(&(sub_prv.next[0], sub_prv.d), 1)
16:    offset ← offset + 1
17:    x ← prv
18:  while d
19:  v ← x.value
20:  if offset < BOUNDOFFSET then
21:    return value
22:  end if
23:  if newtail = NULL then
24:    newtail ← x
25:  end if
26:  if CAS(&q.tail.prev.prev.next[0], obstail, newtail) then
27:    newtail.next[0] ← q.tail
28:    RestructureMax(q)
29:    cur ← obstail
30:    while cur ≠ newtail do
31:      prev ← cur.prev
32:      MARKRECYCLE(cur)
33:      cur ← nxt
34:    end while
35:  end if
36:  return v
37: end function

```

---

The DeleteMax operation is shown in Fig 2. In the first loop, it traverses 4 the skiplist's zero level with previous pointers and tries to set the delete flag to the first non-deleted node. In line 8, the operation checks if the predecessor of the current node points to the head; if so, it returns EMPTY. Otherwise, it tries to set the deleted flag with an atomic FAO (Fetch-and-Or) operation. If the node was already marked as deleted, the traversal continues until a non-deleted node is found. After setting the deleted flag, the operation checks if the number of steps during the first traversal does not reach the defined threshold value; if not, it returns the value of the deleted maximum node. Otherwise, it begins setting the new tail, attempting to atomically change the tail's previous pointer to the new tail (at line 26). If successful, it means that DeleteMax has deleted the suffix of the skiplist's zero level. If not, other DeleteMax operations have commenced performing physical deletion. Upon the completion of the RestructureMax operation, the DeleteMax operation marks the nodes between obstail and newtail for recycling.

*RestructureMax operation.*

Fig. 4. RestructureMax function.

---

```

1: function RESTRUCTUREMAX(skiplist.t q)
2:   cur ← q.tail.prev
3:   prv ← cur.prev
4:   h ← cur.height
5:   resh ← h
6:   i ← h - 1
7:   while i > 0 do
8:     n ← cur.next[i]
9:     if CAS(&cur.next[i], n, q.tail) then
10:      i ← i - 1
11:    end if
12:  end while
13:  while resh < q.nlevels do
14:    ph ← prv.height
15:    if ph > h then
16:      resh ← ph
17:      while ph > h do
18:        expected_value ← prv.next[ph - 1]
19:        if CAS(&prv.next[ph - 1], expected_value, q.tail) then
20:          ph ← ph - 1
21:        end if
22:      end while
23:      prv ← prv.prev
24:    end if
25:  end while
26: end function

```

---

The `RestructureMax` operation is shown in Fig 3. It first updates the next pointers of the last deleted node, pointing to `q.tail` (lines 7– 12). In line 9, the operation atomically changes the pointer for each level. If it succeeds, then the level changes; otherwise, the loop iterates one more time. In the second part of the operation, the loop in lines 13-25 updates the next pointers of those nodes which are higher than the last deleted node and were pointing to deleted nodes. After this loop, all predecessors of the last deleted node will point to `q.tail`. We first record the height of the last deleted node, and during each iteration, we compare the stored height with the height of the previous node. If the height of the previous node is greater, we update the next pointers of the previous node whose height is greater than the stored height and change the stored height value to the height of the previous node. This is done since, after that iteration, there is no reason to modify the next pointers of nodes whose level is lower than the stored height. If the CAS operation on line 19 succeeds, the iteration moves to the previous node; otherwise, the loop will iterate one more time.

### *InsertKey operation.*

*Fig. 5. Insert Key procedure*

---

```

1: procedure INSERTKEY(skiplist.t q, key.t k, value.t v)
2:   if IsGreaterThanMax(q, k) then
3:     InsertMax(q, k, v)
4:   else
5:     Insert(q, k, v)
6:   end if
7: end procedure

```

---

The `InsertKey` operation is designed to handle two different situations in the algorithm. It checks if the element being added is the maximum or not. This is done because we have changed the behavior of the skiplist, adding a delete mechanism from the end too. Since the `Insert` logic relies on traversing the skiplist and skipping the smaller elements and those that are deleted, it results in scenarios where nodes with maximum keys have been deleted and we traverse over them. For addressing this specific condition,

the InsertMax operation was introduced. Let's first discuss the Insert operation and after the InsertMax logic.

*Insert operation.* The Insert operation is adapted from the Insert operation presented in article [8], with modifications to the insertion component at the list's zero level. Specifically, an additional CAS operation is integrated to set the previous pointer of the inserting node's successor node. The Insert operation finds the position where the new node will be added, using the LocatePreds function, and then tries to add it using atomic CAS operations. After that, it begins a second loop in which it sets predecessors to point to the newly added node, and the current node to point to its successors with a CAS operation.

Fig. 6. Insert procedure.

---

```

1: function INSERT(skiplist_t q, key_t k, value_t v)
2:   height ← Random(1, q.nlevels), new ← AllocNode(height)
3:   new.key ← k, new.value ← v, new.d ← 0, new.height ← height
4:   new.inserting ← 1, f ← 0
5:   do
6:     (preds, succs, del) ← LocatePreds(q, k)
7:     new.next[0] ← succs[0]
8:     new.prev ← preds[0]
9:     if not f and CAS(&succs[0].prev, preds[0], new) then
10:      f ← 1
11:    end if
12:    while not (f and CAS(&(preds[0].next[0], preds[0].d), (<succs[0], 0), (<new, 0)))
13:      i ← 1
14:      while i < height do
15:        new.next[i] ← succs[i]
16:        if new.d or succs[i].d or succs[i] = del then
17:          break
18:        end if
19:        if CAS(&preds[i].next[i], succs[i], new) then
20:          i ← i + 1
21:        else
22:          (preds, succs, del) ← LocatePreds(q, k)
23:          if succs[0] ≠ new then
24:            break
25:          end if
26:        end if
27:      end while
28:      new.inserting ← 0
29:    end function

```

---

*LocatePreds operation.* The LocatePreds operation is unchanged as in article [8]. It traverses the skiplist to find the predecessors and successors of the inserting node. The operation begins traversing from the highest level and continues forward until it finds a node with a greater, non-deleted key.

*IsGreaterThenMax operation.*

Fig. 7. *Is GreaterThenMax function.*

---

```

1: function ISGREATERTHENMAX(skiplist_t q, key_t k)
2:   cur ← q.tail.prev
3:   if cur = q.tail then
4:     return 0
5:   end if
6:   pred ← cur.prev
7:   do
8:     < cur, d > ← < pred.next[0], pred.d >
9:     if pred = q.head then
10:      return 0
11:    end if
12:    while d
13:    if cur.key < k then
14:      return 1
15:    end if
16:    return 0
17: end function

```

---

The IsGreaterThenMax operation checks whether the given key is greater than the key values present in the list, excluding those that have been deleted. It uses two pointers, pred and cur, to go through the list from left to right. During traversal, the operation checks if a node has been deleted by looking at the flags of its lowest-level next pointer. After this check, it compares the value of the given key with the maximum key value of the non-deleted nodes in the list. If the given key is larger, the function returns 1, otherwise it returns 0.

*InsertMax Operation.*Fig. 8. *InsertMax* function.

---

```

1: function INSERTMAX( $q, k, v$ )
2:    $height \leftarrow \text{Random}(1, q.nlevels)$ ,  $new \leftarrow \text{AllocNode}(height)$ 
3:    $new.key \leftarrow k$ ,  $new.value \leftarrow v$ ,  $new.d \leftarrow 0$ ,  $new.height \leftarrow height$ 
4:    $new.inserting \leftarrow 1$ ,  $f \leftarrow 0$ 
5:   do
6:      $(preds, succs, del) \leftarrow \text{LocateSuccs}(q, k)$ 
7:      $\langle new.next[0], new.d \rangle \leftarrow \langle succs[0], 1 \rangle$ 
8:      $new.prev \leftarrow preds[0]$ 
9:     if not  $f$  and  $\text{CAS}(\&succs[0].prev, preds[0], new)$  then
10:       $f \leftarrow 1$ 
11:    end if
12:    while not ( $f$  and  $\text{CAS}(\&\langle preds[0].next[0], preds[0].d \rangle, \langle succs[0], 0 \rangle, \langle new, 0 \rangle)$ )
13:       $i \leftarrow 1$ 
14:      while  $i < height$  do
15:         $new.next[i] \leftarrow succs[i]$ 
16:        if  $new.d$  or  $preds[i].d$  or  $preds[i] = del$  then
17:          break
18:        end if
19:        if  $\text{CAS}(\&preds[i].next[i], succs[i], new)$  then
20:           $i \leftarrow i + 1$ 
21:        else
22:           $(preds, succs, del) \leftarrow \text{LocateSuccs}(q, k)$ 
23:          if  $succs[0] \neq new$  then
24:            break
25:          end if
26:        end if
27:      end while
28:       $new.inserting \leftarrow 0$ 
29:    end function

```

---

The *InsertMax* operation is similar to the *Insert* operation but was created for cases with deleted maximums. The *LocatePreds* function can work correctly with lists having logically deleted suffixes, but not with those having logically deleted prefixes. It can cause issues when we insert a node whose key is bigger than the other non-deleted nodes. If so, *LocatePreds* may traverse the list and skip logically deleted nodes from the end. For that reason, the *LocateSuccs* function was created to handle that case. The *InsertMax* operation starts by initializing the new node (lines 2–4), setting the inserting flag to 1, and beginning to find the position for the new inserting node. It sets the next and previous pointers for the inserting node; the change with the successor’s previous pointer and predecessor’s



next pointer will be done with atomic CAS operation. After setting zero-level pointers, a second loop starts and does a similar job for high-level pointers (lines 12–17). It sets the predecessor node's next pointers to the new node and the new node's pointers to successor nodes. After this operation, the inserted flag is changed to 0.

### *LocateSuccs Operation.*

Fig. 9. *LocateSuccs* function.

---

```

1: function LOCATESUCCS(skiplist.t q, key.t k, value.t v)
2:    $i \leftarrow q.nlevels$ 
3:    $pred \leftarrow q.head$ 
4:    $del \leftarrow \text{NULL}$ 
5:   while  $i \geq 0$  do
6:      $\langle cur, d \rangle \leftarrow \langle pred.next[i], pred.d \rangle$ 
7:     while  $cur.d$  or  $(d$  and  $i = 0)$  do
8:       if  $d$  and  $i = 0$  then
9:          $del \leftarrow cur$ 
10:      end if
11:       $pred \leftarrow cur$ 
12:       $\langle cur, d \rangle \leftarrow \langle pred.next[i], pred.d \rangle$ 
13:       $i \leftarrow i - 1$ 
14:    end while
15:  end while
16:   $i \leftarrow q.nlevels$ 
17:  while  $i \geq 0$  do
18:     $\langle cur, d \rangle \leftarrow \langle preds[i].next[i], preds[i].d \rangle$ 
19:    while  $cur.key > k$  and not  $cur.d$  do
20:       $pred \leftarrow cur$ 
21:       $\langle cur, d \rangle \leftarrow \langle pred.next[i], pred.d \rangle$ 
22:    end while
23:     $preds[i] \leftarrow pred$ 
24:     $succs[i] \leftarrow cur$ 
25:     $i \leftarrow i - 1$ 
26:  end while
27: end function

```

---

The *LocateSuccs* operation is similar to the *LocatePreds* operation, but with a different logic. It also returns the  $(preds, succs, del)$  tuple. The main distinction between these two operations lies in their approach. The

LocateSuccs function first traverses under the deleted nodes, storing them in the preds array. After this travers, it proceeds forward in an attempt to find the insertion point. During this process, it fills both the preds and succs arrays and the del pointer. The second loop of the function traverses the list until the key of the element being inserted is greater than the key of the current node, and the current node is not deleted. After completion of this traversal, the function returns the resulting tuple.

## **Conclusion**

In this paper, we have introduced a new lock-free priority queue that derives its interface from the min-max heap and supports all its operations in a concurrent environment, maintaining lock-free data structure guarantees. In this research, we have discussed lock-free data structures and designed our lock-free priority queue to support operations with both minimum and maximum elements efficiently. This is the first step in the field of lock-free Min-Max Queues and represents the design of the implementation for this data structure introduced in our paper. Based on this article, our future research will focus on implementing and optimizing this data structure.

## **Results and Discussion**

We have successfully designed Lock-Free Min-Max Queue, which in comparison to other Lock-Free Priority Queues is supporting Delete operation with both maximum and minimum elements. In this comparison, we will focus on how each queue handles scenarios where the main priority is defined by the minimum element, allowing a uniform base for comparison. For the purposes of a comparison, we will assume that the main priority for both the Linden and Jonsson's Queue and our Min-Max Queue is the minimum.

Table 1. Breakdown of operations complexities.

<b>Algorithm</b>	<b>Insert</b>	<b>DeleteMin</b>	<b>DeleteMax</b>
Lock-Free Min-Max Queue	$O(\log n)$	$O(\log n)$	$O(\log n)$
Jonatan L., Bengt J.'s Queue	$O(\log n)$	$O(\log n)$	Not Supported

## REFERENCES

1. *Atkinson M.D., Sack J.-R., Santoro N. and Strothotte T.* Min-max heaps and generalized priority queues. *Communications of the ACM*, 29 (10): 996–1000, Oct. 1986.
2. *Goponenko A., Carroll S.* A C++ Implementation of a Lock-Free Priority Queue Based on Multi-Dimensional Linked List, 2019.
3. *Liu S., Yujie M.* Mounds: Array-Based Concurrent Priority Queues, 2012.
4. *Pugh W.* Skip lists: a probabilistic alternative to balanced trees. *Commun. ACM* 33 (6), 668–676, 1990.
5. *Pugh W.* Concurrent maintenance of skip lists. Tech. Rep. CS-TR-2222, Dept. of Computer Science, University of Maryland, College Park, 2009.
6. *Lotan I., Shavit N.* Skiplist-based concurrent priority queues. In: *IPDPS*. PP. 263–268. IEEE, 2000.
7. *Sundell H., Tsigas P.* Fast and lock-free concurrent priority queues for multi-thread systems. *J. Parallel Distrib. Comput.* 65 (5), 609–627, May 2005.
8. *Linden, Jonsson.* A Skiplist-Based Concurrent Priority Queue with Minimal Memory Contention, 2013.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕБЛОКИРУЮЩЕЙ MIN-MAX ОЧЕРЕДИ**

*Р.Н. Хачатрян, Р.М. Везирян*

*Национальный Политехнический университет Армении*

*«Квест Глобал Армения» Инк.*

*«ИПИА НАН РА»*

**АННОТАЦИЯ**

Современная разработка программного обеспечения часто опирается на неблокирующие структуры данных для эффективной реализации многопоточных или распределенных алгоритмов. Среди этих структур важное значение имеют очереди без блокировок. Традиционные неблокирующие очереди с приоритетами обеспечивают операции с логарифмической временной сложностью на минимальных или максимальных элементах. Min-Max Куча решает эту проблему в однопоточных алгоритмах, но ее применение в многопоточном контексте остается сложной задачей. В этой статье представлены дизайн и реализация неблокирующей очереди «Min-Max», которая одновременно поддерживает операции с минимальными и максимальными элементами в логарифмическое время.

**Ключевые слова:** неблокирующие структуры данных, параллельное программирование, очередь с приоритетом, Мин-Макс куча, скиплист.

## ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI 10.48200/1829-0450\_pmn\_2023\_2\_29  
УДК: 621.396

Поступила: 21.11.2023г.  
Сдана на рецензию: 01.02.2023г.  
Подписана к печати: 25.12.2023г.

### УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРЯМОГО И РЕВЕРСИВНОГО ХОДА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЗОНДА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ АНТЕНН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

*С.Р. Тадевосян<sup>1</sup>, В.Г. Аветисян<sup>1,2</sup>, С.М. Аветисян<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Российско-Армянский (Славянский) университет*

*<sup>2</sup>Ереванский Научно-Исследовательский Институт Средств Связи*

*tad.sus.94@gmail.com , avahan@mail.ru, avetserg@gmail.com*

#### АННОТАЦИЯ

Метод антенных измерений в ближнем поле миллиметрового диапазона волн требует сложную как аппаратную, так и программную части. Система антенных измерений методом ближнего поля состоит из следующих подсистем. Это – подсистема механического сканирования зондом в ближней зоне тестируемой антенны, радиоизмерительная подсистема, подсистема автоматического управления измерениями и, наконец, вычислительная подсистема с соответствующей математической обработкой данных о ближней зоне антенны. Устройства регулирования прямого и реверсного хода зонда входят в подсистему механического сканирования зонда, которая тесно взаимодействует с подсистемой автоматического

управления измерениями. Важность точности хода зонда, его остановки и движения, заключается в точности проведения измерений, что в случае волн миллиметрового диапазона довольно сложная задача.

**Ключевые слова:** ближнее поле, испытываемая антенна, прямой ход, зонд, измерения.

Метод антенных измерений по ближнему полю характеризуется как метод, при котором проводятся измерения амплитуды и фазы электромагнитного поля в конкретных точках плоскости измерения. Поле в дальней зоне ИА определяется единственным образом по ее комплексному полю в ближней зоне на охватывающей ИА поверхности. Антенные измерения могут проводиться на трех поверхностях: плоской, сферической и цилиндрической [1].

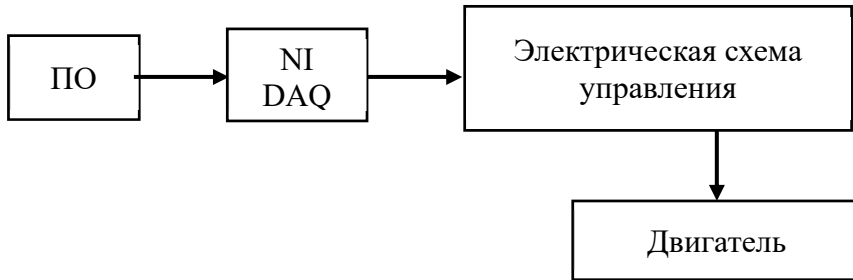
Дальнее поле ИА является интегральной характеристикой ближнего поля. Поэтому при ошибочных измерениях ближнего поля в отдельных точках, точность восстановления дальнего поля не претерпевает больших изменений, что является существенным фактором при определении характеристик антенн [2], [3], [4].

*Целью* данной работы является разработка устройств регулирования хода зонда.

Устройства регулирования хода зонда – это совокупность устройств, позволяющих менять направление хода зонда, а также запускать и останавливать его. Управление ходом зонда осуществляется программным обеспечением. Запуск движения зонда и его останов выполняется при помощи импульсов управления, поступающих от устройства NI DAQ, которое подключено к ПК, на котором же работает данное ПО, выдающее команды останова или движения. Останов зонда происходит при достижении заданной зоны сканирования, соответствующей ИА [5,6].

Блок-схема подсистемы управления представлена на Рис. 1.

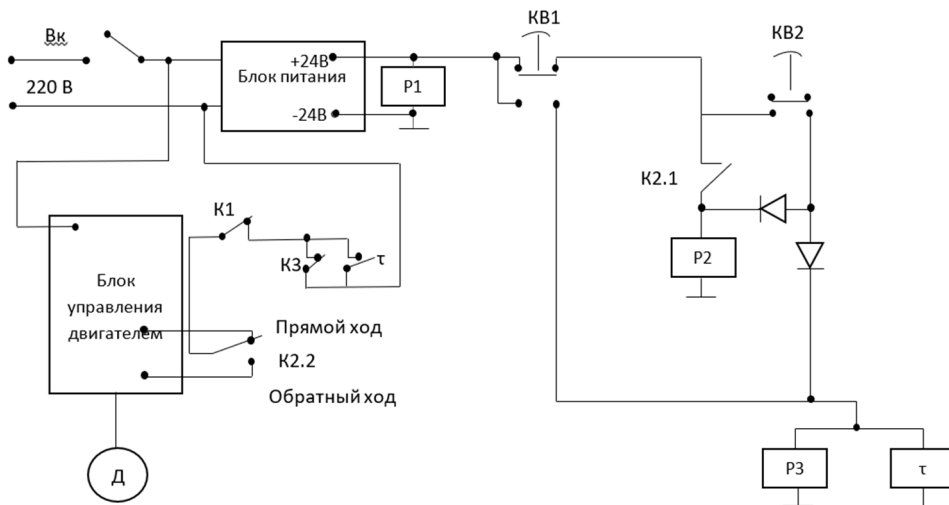
Рисунок 1. Блок-схема подсистемы.



Ниже рассматривается схема управления движением зонда без ПО.

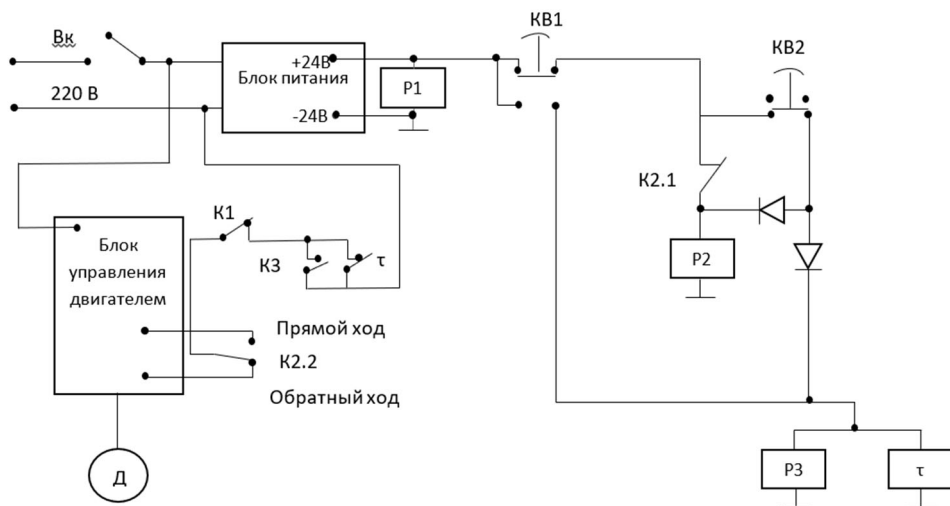
Электрическая схема управления ходом зонда – подсистема, состоящая из следующих устройств: концевые выключатели прямого и обратного хода, реле и ключи, а также двигатель и блок управления им. На Рис. 2 представлена схема работы устройств при начальном состоянии – прямой ход. В этом случае реле P2 обесточено, соответственно контакт K2.2 переключен на прямой ход. Так же обесточены реле P3 и таймер, контакт K3 замкнут. Происходит движение зонда в прямом направлении.

Рисунок 2. Начальное состояние схемы управления.



После достижения зондом концевого выключателя КВ2 он срабатывает, и схема приходит в следующее состояние, изображенное на Рис. 3. После срабатывания концевого выключателя движение зонда прекращается, контакт К2.1 замыкается, тем самым включая реле Р2, что в свою очередь приводит к переключению контакта К2.2 на обратный ход. В свою очередь, также срабатывает реле Р3 и таймер, для того чтобы после определенного промежутка времени установленном заранее, двигатель снова заработал, и зонд начал свое движение в обратном направлении.

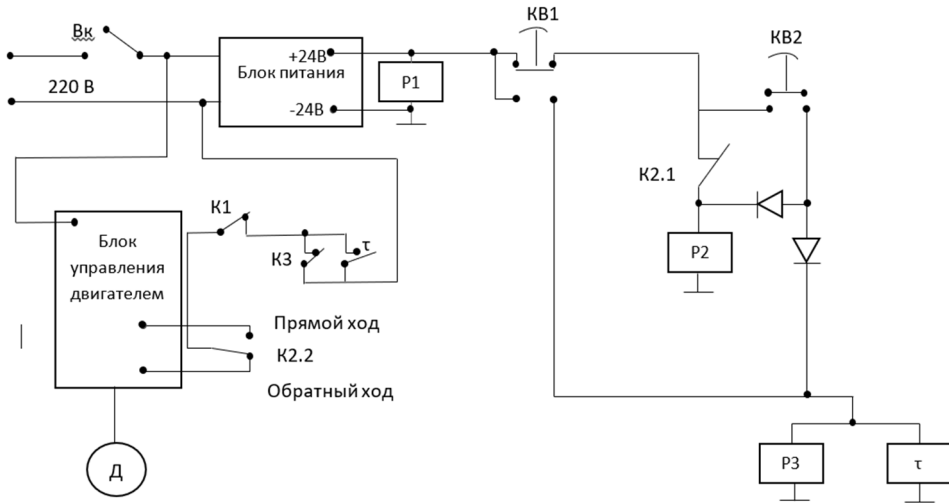
Рисунок 3. Состояние схемы управления при первом срабатывании КВ2.



В момент начала движения в обратном направлении концевой выключатель КВ2 снова срабатывает. В этом состоянии двигатель работает на обратном ходе, а в момент замыкания контакта КВ2, К2.1 замкнут и реле Р2 не срабатывает по причине блокировки цепи диодом. При этом контакт К2.2 переключен на обратный ход, К3 замкнут, таймер выключен.

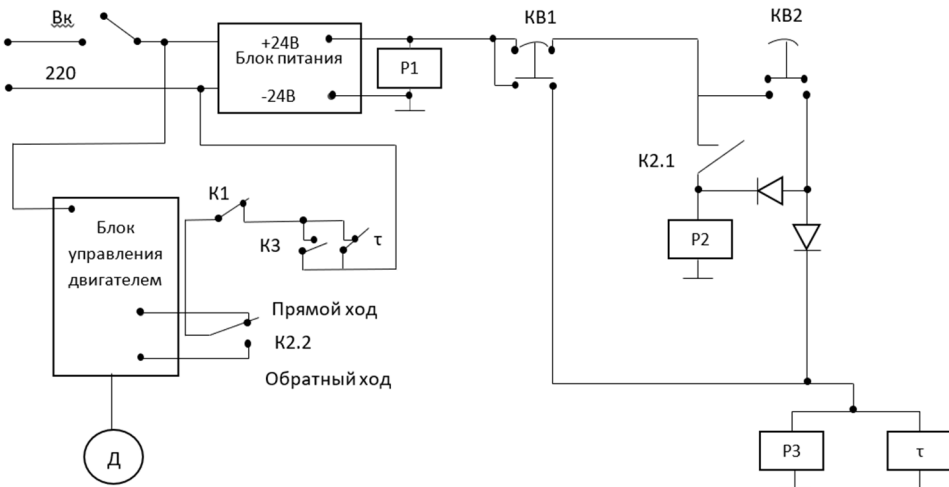


Рисунок 4. Состояние схемы управления после второго срабатывании КВ2.



При движении зонда в обратном направлении и достижении концевого выключателя КВ1 происходит его срабатывание.

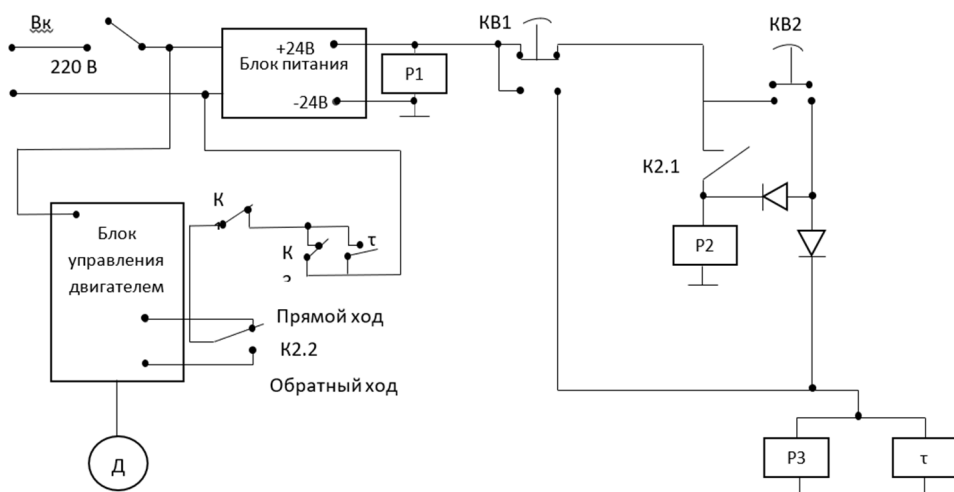
Рисунок 5. Состояние схемы управления при срабатывании КВ1.



При срабатывании концевого выключателя КВ1, происходит остановка обратного хода зонда (двигатель остановлен), включается таймер для расчета времени прямого хода. Реле Р2 выключено, контакт К2.1 разомкнут, К2.2 переключен на прямой ход, срабатывает реле Р3, а контакт К3, в свою очередь, разомкнут.

После того как срабатывает таймер, двигатель начинает свою работу в прямом направлении.

*Рисунок 6. Состояние схемы управления при втором срабатывании КВ1.*



Данный процесс повторяется до тех пор, пока не будет завершен процесс измерения.

Реализуемая и протестированная подсистема представлена на рисунках ниже (Рис. 7, 8, 9).

## **Заключение**

В данной работе были рассмотрены метод антенных измерений по ближнему полю и устройства регулирования хода зонда, использующихся в данном методе антенных измерений. Устройства регулирования хода зонда, как было указано ранее, это совокупность

устройств, позволяющих менять направление хода зонда, а также запускать и останавливать его. Электрическая схема управлением зондом, чей поэтапный принцип работы представлен в работе, была разработана и реализована. Данная схема, позволяет выполнять запуск и останов двигателя привода, в зависимости от различных условий, обрабатываемых ПО.

Рисунок 7. Подсистема управления ходом зонда.



Рисунок 8. Концевой выключатель.

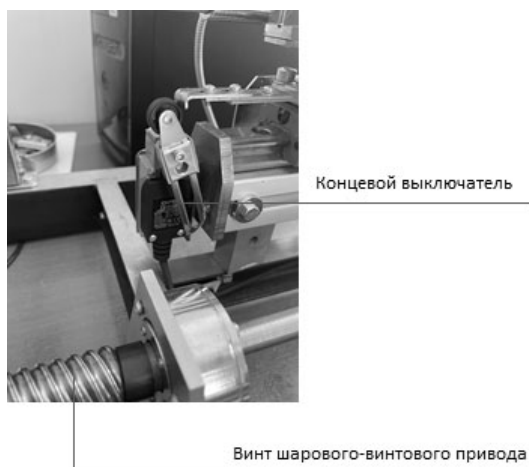
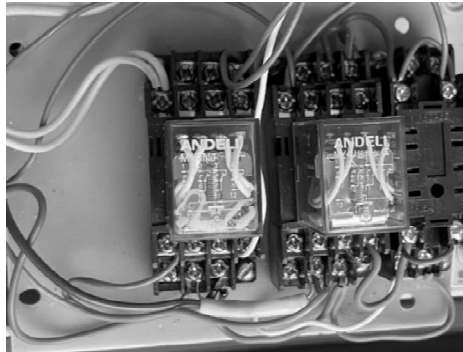


Рисунок 9. Реле подсистемы.



#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Yaghjian A.* An overview of near-field antenna measurements, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 34, January 1986. PP. 30–45.
2. *Heruni P.* Автоматические измерения характеристик антенн в зоне раскрыва // Труды ВНИИРИ, Ер., 1983.
3. *Joy E.* Near-field testing of radar antennas, Microwave J., January 1990. PP. 119–130.
4. *Avetisyan V.* Near-field testing system for antennas operating in short millimeter waveband, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol.58, № 6, June 2010. PP. 2149–2153.
5. *Tadevosyan S.* Modification of photosensor for the antenna near-field measurements in the millimeter waveband', IEEE International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and OptoElectronics (IRPhE 2022).
6. *Xingxun L., Chengzhu H., Yongjie Ch.* Antenna Planar Near-Field Measurement System Using Robotics, IEEE Xplore, 2021 13th Global Symposium on Millimeter-Waves & Terahertz (GSMM).

**DIRECT AND REVERSE MOVING CONTROL DEVICES  
OF THE MEASURING PROBE DURING AUTOMATIC NEAR-FIELD  
MEASUREMENTS OF MILLIMETER-WAVE ANTENNAS**

*S. Tadevosyan<sup>1</sup>, V. Avetisyan<sup>1,2</sup>, S. Avetisyan<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Russian-Armenian (Slavonic) University*

*<sup>2</sup>Yerevan Scientific Research Institute of Communications*

**ABSTRACT**

The method of antenna measurements in the near field of the millimeter wave range is a complex system, a combination of hardware and software parts. The antenna measurement system using the near-field method consists of the following subsystems. This is a subsystem for mechanical scanning with a probe in the near zone of the antenna under test, a radio measuring subsystem, an automatic measurement control subsystem and, finally, a computing subsystem with the corresponding mathematical processing of data about the near zone of the antenna. Devices for regulating the forward and reverse stroke of the probe are included in the mechanical scanning subsystem of the probe, which closely interacts with the automatic measurement control subsystem. The importance of the accuracy of the probe's movement, its stopping and movement lies in the accuracy of the measurements, which in the case of the millimeter range is a rather difficult task.

**Keywords:** near field, antenna under test, direct moving, probe, measurements.

DOI 10.48200/1829-0450\_pmn\_2023\_2\_38  
УДК 620.22

Поступила: 06.10.2023г.  
Сдана на рецензию: 12.10.2023г.  
Подписана к печати: 13.10.2023г.

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА ВОЗДУХЕ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА YAG:Ce,Li

*А.А. Новиков*

*Институт физических исследований НАН РА, Аштарак, Армения  
Российско-Армянский (Славянский) университет, Ереван, Армения*

*artur.novikov80723@gmail.com*

### АННОТАЦИЯ

Получены кристаллы YAG:Ce и YAG:Ce,Li методом вертикальной направленной кристаллизации. Трижды были измерены спектры поглощения образцов: сразу после получения и после каждого отжига. У образца с литием после двух отжигов поглощение в УФ области между 190 нм и 310 нм выросло сильнее, что свидетельствует о более высокой концентрации  $Ce^{4+}$  в данном кристалле по сравнению с YAG:Ce. Также у образца с литием немного улучшилось пропускание в видимой области за счет эффективного устранения кислородных вакансий и связанных с ними центров окраски.

**Ключевые слова:** иттрий-алюминиевый гранат, отжиг, сцинтиллятор, неизовалентные примеси.

### Введение

Иттрий-алюминиевый гранат ( $Y_3Al_5O_{12}$  или YAG) был впервые получен в 1951 году [1] и нашел множество применений: в качестве матрицы лазера, [2] люминофора [3], и сцинтиллятора [4]. YAG – это

стабильное соединение, монокристаллы которого могут быть выращены всеми классическими методами. Это химически и механически стойкий материал (твердость по шкале Мооса 8.5) и обладает высокой теплопроводностью ( $13 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ). Структура кубическая (пространственная группа  $\text{O}^{\text{h}}_{10}\text{-Ia3d}$ ), в которой  $\text{Y}^{3+}$  окружен 8 ионами кислорода, а  $\text{Al}^{3+}$  окружен 6 и 4 ионами кислорода. YAG, легированный ионами Се, перспективный сцинтиллятор с теоретическим световыходом в 60000 ф/МэВ [5], однако на практике удалось получить монокристаллы со световыходом в 25000 ф/МэВ [6]. Это объясняется негативным влиянием дефектов: несовершенства решетки, замещения (вхождение ионов  $\text{Y}^{3+}$  на позиции  $\text{Al}^{3+}$ ), кислородные вакансии, которые задерживают электроны и дырки или даже вызывают безызлучательную рекомбинацию [7, 8].

Одним из основных направлений последних лет для улучшения характеристик сцинтилляторов, легированные церием, было введение неизовалентных примесей, которые приводят к окислению ионов церия с трехвалентного в четырехвалентное состояние [9]. Однако у этого подхода есть недостаток – образование достаточно большого количества кислородных вакансий, которые уменьшают радиационную стойкость [10]. А при высоких концентрациях примеси уменьшается и световыход [9].

Другим направлением – отжиг при высокой температуре на воздухе, приводящий к восполнению кислородных вакансий и переводящий церий в четырехвалентное состояние [11]. Однако и у этого метода есть недостаток – меньшая часть ионов церия переводится в четырехвалентное состояние, по сравнению с введением неизовалентных примесей.

В работе [12] говорится, что литий в малых концентрациях не входит в узлы решетки YAG, а оказывается в междоузлиях, уменьшая количество кислородных вакансий. При отжиге кристаллов одинакового состава в течение равного количества времени и при одинаковой температуре в них проникает равное количество ионов кислорода. Так как в

кристалле с литием количество кислородных вакансий сведено к минимуму, теоретически, в этом образце большее количество ионов церия перейдет в четырехвалентное состояние, чем в образце без лития.

### **Экспериментальная часть**

Кристаллы YAG:Ce и YAG:Ce,Li были выращены методом вертикальной направленной кристаллизации в нейтрально-восстановительной атмосфере (Ar/H<sub>2</sub>) из молибденовых тиглей со скоростью 1.3 мм/ч на затравках, ориентированных по <100>. В качестве исходных компонентов использовались высокочистый оксид Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.99%) и кристаллический сапфир Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.95%), взятые в стехиометрических количествах. Из полученных кристаллов были вырезаны и отполированы пластины толщиной 1 мм. Концентрация церия в образцах была 0.4 ат.%, концентрация лития составляла 35 ppm (0.1 ат.%).

Многоступенчатый отжиг кристаллов осуществлялся на воздухе в лабораторной печи фирмы Nabertherm GmbH (модель LT 15/14/B510) при температурах 1200 и 1300°C. Продолжительность каждого из отжигов составляла 12 часов. Спектры пропускания кристаллов измерялись в области 190–1100 нм на спектрофотометре Specord 200+ при комнатной температуре.

### **Результаты и обсуждение**

Спектры поглощения выращенных образцов показывают, что в YAG:Ce,Li выше прозрачность в УФ области из-за меньшего количества кислородных вакансий.

После первого отжига при 1200°C у обоих образцов наблюдается увеличение интенсивности поглощения в области 190–320 нм, которое еще более увеличивается после второго отжига, однако у образца с литием оно больше, чем у YAG:Ce (Рис.1 и 2).



Рисунок 1. Спектры поглощения YAG:Ce до и до и после отжига.

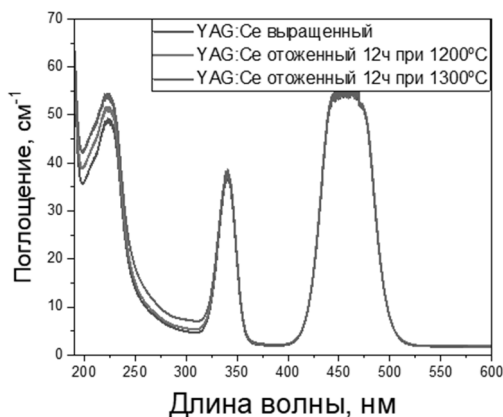
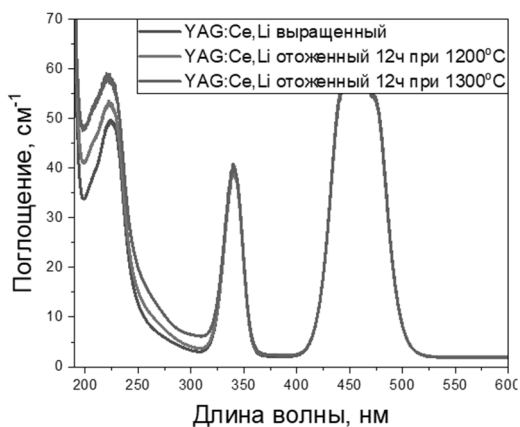


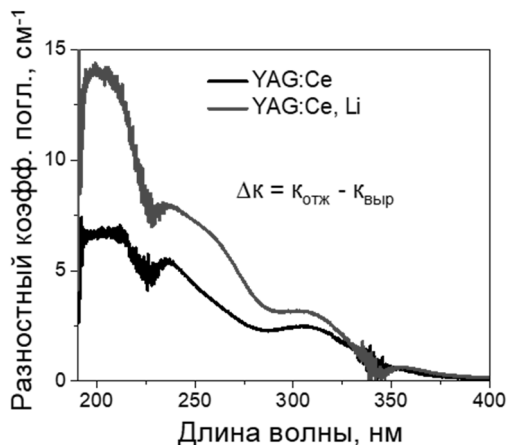
Рисунок 2. Спектры поглощения YAG:Ce,Li после отжига.



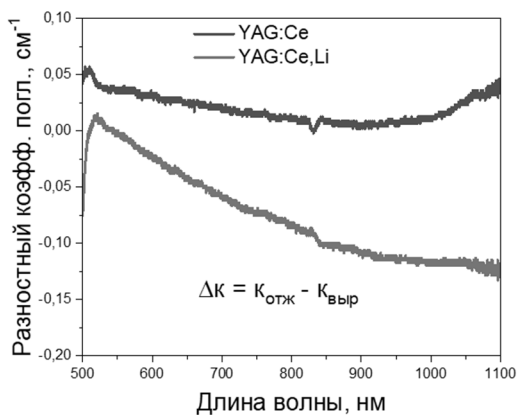
Разностные спектры, полученные путем вычитания коэффициентов поглощения выращенных образцов из коэффициентов поглощения образцов после второго отжига, показывают (Рис.3), что у YAG:Ce,Li поглощение в УФ области выросло примерно в 2 раза сильнее, чем у YAG:Ce.

В работе [13] проводили отжиг кристаллов различных составов. Температура отжига составляла 1300°C, продолжительность – 12 часов. Световыход YAG:Ce возрос примерно на 1/3 (с 22000 ф/МэВ до 30000 ф/МэВ), а вот время высвечивания несущественно снизилось.

*Рисунок 3. Разностные спектры поглощения кристаллов YAG:Ce и YAG:Ce,Li в УФ области.*



*Рисунок 4. Разностные спектры поглощения кристаллов YAG:Ce и YAG:Ce,Li в видимой области.*



У образца с литием после второго отжига немного возросло пропускание в промежутке между 520 и 1100 нм в области излучения

ионов церия (Рис.4). Это может быть связано с более эффективным устранением кислородных вакансий и связанных с ними центров окраски. Аналогичная картина наблюдалась в статье [14]. Это привело к небольшому росту световых выходов именно из-за увеличения пропускания в видимой области, т.к. рентгеновская спектроскопия не обнаружила в кристаллах  $\text{Ce}^{4+}$ . Также увеличение пропускания привело к увеличению радиационной стойкости кристаллов [10].

Таким образом, более высокая эффективность перевода  $\text{Ce}^{3+}$  в  $\text{Ce}^{4+}$  в процессе отжига на воздухе в образце  $\text{YAG:Ce, Li}$  напрямую связана с меньшей концентрацией кислородных вакансий. Данный метод эффективен для комплексного улучшения характеристик сцинтилляторов. Но насколько этот метод ускоряет временные характеристики по сравнению с легированием двухвалентными примесями (Ca, Mg) и может ли он в этом конкурировать, можно будет судить после измерения времени затухания сцинтилляции.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Государственного Комитета по Науке Министерства Образования и Науки Республики Армения (проект 21AG-1C030).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Yoder H., Keith M.* // Am. Mineral. 1951, V. 36. PP. 519–533.
2. *Каминский А., Аминов Л., Ермолаев В.* Физика и спектроскопия лазерных кристаллов. М.: Изд-во «Наука», 1986. С. 272.
3. *Sun B., Zhang L., Zhou T., Shao C., Zhang L., Ma Y., Yao Q., Jiang Z., Selim F., Chen H.* J. Mater. Chem. C, 2019, V. 7. PP. 4057–4065
4. *Dujardin C., Auffray E., Bourret E., Dorenbos P., Lecoq P., Nikl M., Vasil'ev A., Yoshikawa A., Zhu R.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 2018, V. 65. PP. 1977–1997.
5. *Rodnyi P., Dorenbos P. and Eijk van C. W. E.* // Phys. Stat. Solidi (b), 1995, V. 187. PP. 15–29.
6. *Mares J., Beitlerova A., Nikl M., Solovieva N., D'ambrosio C., Blazek K., Maly P., Nejezchleb K. and Notaristefani de F.* // Radiat. Meas., 2004, V. 38. PP. 353–357.
7. *Cherepy N., Kuntz J., Tillotson T., Speaks D., Payne S., Chai B., Porter-Chapman Y. and Derenzo S.* Nucl. Instrum. Methods A, 2007, V. 579. PP. 38–41.

8. *Y. Zorenko, V. Gorbenko, V. Savchyn, T. Zorenko, T. Martin, P.-A. Douissard, M. Nikl, and Mares J. Radiat. Meas., 2013, V. 56. PP. 415–419.*
9. *Dickens P., Haven D., Friedrich S., Lynn K. // J. of Crys. Gro., 2019, V. 507. PP. 16–22.*
10. *Tyagi M., Meng F., Koschan M., Singh A., Melcher C. and Gadkari S. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2015, V. 62, No. 1. PP. 336–339.*
11. *Blahuta S., Bessiere A., Viana B., Dorenbos P. and Ouspenski V. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2013, V. 60. PP. 3134–3141.*
12. *Derdzyan M., Hovhannesyanyan K., Novikov A., Auffray E., Petrosyan A. and Dujardin C. Phys. Status Solidi B, 2019, V. 256, 1800724.*
13. *Nikl M., Babin V., Mares J., Kamada K., Kurosawa S., Yoshikawa A., Tous J., Houzvicka J., Blazek K. J. Lumin., 2015. V. 169. PP. 539–543.*
14. *Tyagi M., Meng F., Koschan M., Donald S., Rothfuss H. and Melcher C. J. Phys. D: Appl. Phys., 2013, V. 46, № 47, 475302.*

## **INFLUENCE OF HIGH-TEMPERATURE ANNEALING IN AIR ON THE OPTICAL PROPERTIES OF YAG: Ce, Li**

*A. Novikov*

*Institute for Physical Research NAS RA, Ashtarak, Armenia  
Russian-Armenian (Slavonic) University, Yerevan, Armenia*

### **ABSTRACT**

YAG:Ce and YAG:Ce,Li crystals were obtained by the vertical directional crystallization. The absorption spectra of the samples were measured three times: immediately after growth and after each annealing. In a sample with lithium, after two annealing, the absorption in the UV region between 190 nm and 310 nm increased more strongly, which indicates a higher concentration of Ce<sup>4+</sup> in this crystal, as compared to YAG:Ce. Also, the sample with lithium shows a slightly improved transmission in the visible region due to the effective elimination of oxygen vacancies and associated color centers.

**Keywords:** yttrium-aluminium garnet, annealing, scintillator, non-isovalent impurities.

DOI 10.48200/1829-0450\_pmn\_2023\_2\_45  
УДК 621.548

Поступила: 06.09.2023г.  
Сдана на рецензию: 13.09.2023г.  
Подписана к печати: 22.11.2023г.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВОЛЬТАИЧЕСКИХ И ТРАДИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОСТАЦИЙ**

*Л.А. Арутюнян*

*Национальный политехнический университет Армении*

*lianain@outlook.com*

### **АННОТАЦИЯ**

Принципиальное отличие солнечных вольтаических электростанций от традиционных электростанций заключается в том, что генерация переменного напряжения в традиционных электростанциях выполняется синхронным генератором, а в солнечных вольтаических электростанциях полупроводниковым коммутационным инвертором. Вследствие этого солнечные вольтаические электростанции уступает традиционным электростанциям по основным техническим требованиям энергосистемы: перегрузочной способности, устойчивости, синусоидальности формы напряжения, регулируемости напряжения и реактивного тока. Указанные недостатки могут быть ограничены в значительной степени при использовании накопительных буферных аккумуляторов, включенных между солнечными панелями и инвертором.

**Ключевые слова:** солнечная вольтаическая электростанция, математическая модель солнечной вольтаической электростанции, форма выходного напряжения, нагрузочные характеристики генерации, регулирование реактивной мощности солнечной вольтаической электростанции.

Солнечные электростанции в настоящее время находят широкое распространение в мире, в том числе в Армении [1, 2, 3]. Актуальность развития солнечной энергетики в Армении вызвана отсутствием неиспользованных гидроэнергоресурсов, отсутствием собственных углеводородных энергоносителей и экологическими проблемами. Сооружается СЭС мощностью 55 МВт. Заявлено о сооружении в Армении СЭС с единичной установленной мощностью до нескольких сотен МВт.

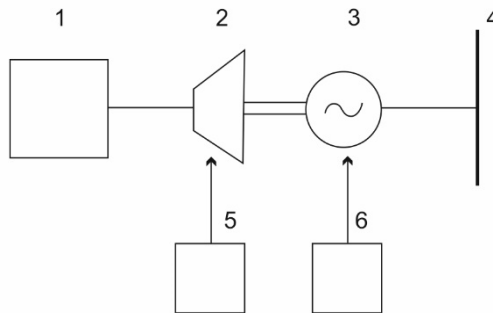
Солнечные электростанции в Армении сооружаются по схеме voltaических солнечных электростанций непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую [4]. Voltaические солнечные электростанции принципиально отличаются от традиционных электростанций – гидравлических или тепловых по виду энергоресурса, способу генерации и качеству электроэнергии.

Солнечные панели преобразуют энергию солнечного излучения в электрическую энергию постоянного тока. Величина напряжения на выходе панелей зависит от интенсивности солнечного облучения панелей и в зависимости от природных условий изменяется от нуля до номинальной. Это нерегулярное напряжение постоянного тока с выхода панелей посредством инвертора преобразуется в переменное напряжение квазисинусоидальной формы (посредством инвертора, возможно в сочетании с фильтром) с напряжением и частотой сети. Выход инвертора соединён с электрической сетью. Генерированная солнечными панелями электрическая мощность передаётся в электрическую сеть. Параметры электрической энергии, генерированной солнечными панелями, и параметры электроэнергии в сети – род тока, напряжение (величина и отклонение напряжения), форма кривой напряжения, частота, характеристики регулирования – принципиально не совместимы. Обеспечение совместимости указанных параметров СЭС возлагаются на инвертор и его дополнительные устройства.

Структурная схема электроагрегата традиционной электростанции – гидравлической или тепловой, работающей параллельно с сетью [5], приведена на Рис.1.

Энергоносителем гидроэлектростанции является поступающая в гидротурбину вода с определенным напором и расходом. В качестве блока подготовки энергоносителя подразумеваются бассейны суточного или сезонного регулирования воды, напорный трубопровод, направляющий аппарат турбины и прочие устройства, обеспечивающие поступление в гидротурбину воды с определенным напором и расходом и, соответственно, выработку электроэнергии заданной мощности.

Рисунок 1. Структурная схема электроагрегата традиционной электростанции: 1 – блок подготовки энергоносителя, 2 – турбина (гидравлическая или паровая), 3 – синхронный генератор, 4 – сеть, 5 – регулятор активной мощности, 6 – регулятор реактивной мощности



Энергоносителем тепловой электростанции является поступающий в паровую турбину пар с определенной температурой и давлением. В качестве блока подготовки энергоносителя подразумеваются устройства хранения и подготовки топлива, тепловой котел и прочие устройства, обеспечивающие выработку и подачу в паровую турбину пара с определенной температурой и давлением и, соответственно, выработку электроэнергии заданной мощности.

Турбина (гидравлическая или паровая) преобразует мощность воды или пара в мощность вращения вала электроагрегата «турбина-генератор».

Синхронный генератор преобразует мощность вращения вала электроагрегата в электроэнергию заданной мощности, которая передается в сеть.

Регулятор активной мощности обеспечивает заданную величину активной мощности, генерируемой генератором, посредством регулирования:

- расхода воды, поступающей в гидротурбину при данном напоре (в случае гидроэлектростанции), или
- количества пара, поступающего в паровую турбину при данных температуре и давлении (в случае тепловой электростанции); одновременно формируется сигнал для изменения производительности теплового котла. (В случае атомной электростанции выработка пара и регулирования его параметров выполняется в атомном реакторе).

Регулятор реактивной мощности обеспечивает заданную величину реактивной мощности, генерируемой генератором, посредством регулирования величины тока возбуждения синхронного генератора.

К генерирующим электроагрегатам, работающим параллельно с сетью, предъявляются определенные технические требования, в том числе стандартизованные по качеству электроэнергии [6], основные из которых следующие. Рассмотрим и сопоставим технические характеристики солнечных и традиционных электростанций и их возможности обеспечения указанных требований.

## **1. Устойчивость в перегрузочных и переходных режимах**

Данное требование должно реализовываться таким образом, что при допустимых отклонениях напряжения в переходных и перегрузочных режимах сети (а возможно также при отклонениях выше допустимых в аварийных режимах) электроагрегат должен оставаться в состоянии синхронной параллельной работы с сетью, генерировать в сеть заданную мощность, а также при необходимости (в течение ограни-



ченного времени) обеспечивать перегрузку и генерацию в сеть дополнительной мощности с целью поддержания или повышения устойчивости системы.

Синхронные генераторы традиционных электростанций надежно обеспечивают указанное требование. Более того, имеется возможность повышения запаса устойчивости (угла нагрузки  $\theta$  и резерва мощности) посредством перевозбуждения генератора [7].

Инверторы вольтаических солнечных электростанций обеспечивают номинальную мощность при номинальных параметрах солнечного излучения, напряжения сети и нагрузки, на которые рассчитан инвертор. При отклонении этих параметров от номинального значения в перегрузочных и переходных режимах мощность генерации уменьшается, возможен срыв инвертирования инвертора и отключение электростанции от сети. Это приводит к дефициту генерируемой мощности, дополнительной перегрузке и снижению напряжения и устойчивости энергосистемы – вплоть до аварийного состояния. Таким образом, вольтаические солнечные электростанции не допускают перегрузок и менее устойчивы в переходных и перегрузочных режимах в сети.

Этот недостаток солнечных электростанций может быть преодолен при использовании накопительных буферных аккумуляторов, включенных между солнечными панелями и инвертором. Буферные аккумуляторы обычно используются лишь в маломощных автономных солнечных электростанциях. Однако, учитывая успехи, достигнутые в настоящее время в создании литий-ионных аккумуляторов, они могут использоваться в качестве буферных аккумуляторов также в мощных солнечных электростанциях, работающих параллельно с сетью. Такие аккумуляторы используются в электромобилях, и их массо-габаритные и стоимостные показатели в настоящее время приемлемы также для солнечных электростанций большой мощности. Однако, это требует дополнительных исследований и дополнительных материальных затрат.

## **2. Синусоидальность формы выходного напряжения**

При отклонении формы генерированного напряжения от синусоидальной формы увеличиваются потери энергии, увеличиваются вибрации электродвигателей, возникают высокочастотные помехи в электронных устройствах. Требование синусоидальной формы генерированного напряжения установлено Стандартом на качество электроэнергии [6] и строго регламентируется.

Синхронные генераторы традиционных электростанций генерируют строго синусоидальное напряжение. Это обеспечивается самой конструкцией синхронных генераторов – конструкцией полюсов ротора, схемой и конструкцией якорной обмотки, что обеспечивает синусоидальность формы поля возбуждения и, соответственно, синусоидальность формы напряжения генератора.

В вольтаических солнечных электростанциях выходное переменное напряжение формируется полупроводниковым инвертором посредством коммутационного преобразования напряжения постоянного тока солнечных панелей на входе инвертора в переменное напряжение на его выходе. При этом форма выходного напряжения имеет ступенчато прямоугольную форму и в значительной степени отклоняется от синусоидальной. Посредством дополнительных устройств (например, фильтров [8], модуляторов или многоуровневых инверторов) форма выходного напряжения может быть приближена к синусоидальной, но это приближение не абсолютное и требует дополнительных материальных затрат.

Структурно-принципиальная схема вольтаической солнечной электростанции приведена на Рис. 2.

На Рис. 3 показано преобразование прямоугольного напряжения инвертора в напряжение так называемого «модифицированного синуса» посредством широтно-импульсной модуляции импульсов. При большом количестве тактов модуляции за полупериод напряжения (порядка сотен или тысяч тактов) и последующей высокочастотной

фильтрации форма выходного напряжения может значительно приблизиться к синусоидальной.

Рисунок 2. Структурно-принципиальная схема voltaической солнечной электростанции: СП – солнечные панели,  $R_{\text{П}}$  – сопротивление солнечных панелей, ЗУ – зарядное устройство аккумулятора, А – аккумулятор,  $R_{\text{А}}$  – сопротивление аккумулятора,  $L_1, RL_1, C_1, RC_1$  – реактивные и активные сопротивления последовательного звена фильтра  $L_2, RL_2, C_2, RC_2$  – реактивные и активные сопротивления параллельного звена фильтра, Т – трансформатор,  $E_{\text{Р}}$  – эквивалентный генератор сети,  $R_{\text{Р}}$  – сопротивление эквивалентного генератора сети,  $R_{\text{Т}}$  – эквивалентное сопротивление нагрузки сети.

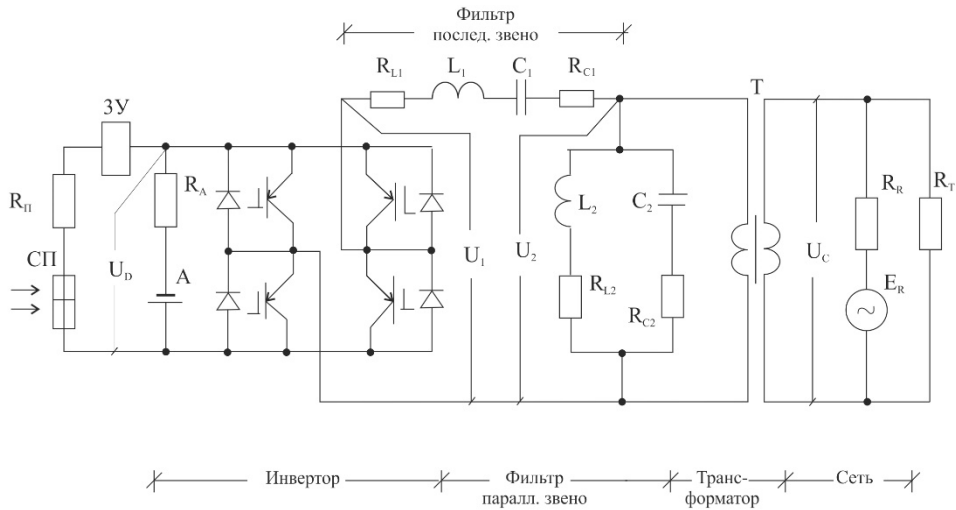
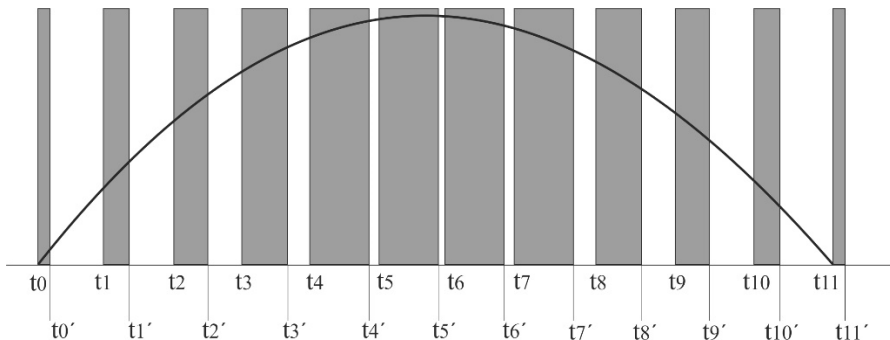


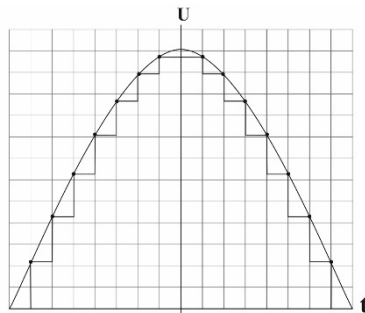
Рисунок 3. Диаграмма получения модифицированного синуса напряжения инвертора посредством многократной широтно-импульсной модуляции.



На Рис.4 показано формирование синусоидальной формы напряжения на выходе многоуровневого инвертора посредством амплитудно-импульсной модуляции.

Выходное напряжение, приближенное по форме к синусоидальной посредством фильтров или модуляторов практически всегда, в той или иной степени, содержит высокочастотные гармоники напряжения. Степень приближения формы напряжения к синусоидальной зависит от схемы и материалозатратности указанных устройств.

Рисунок 4. Форма выходного напряжения на выходе многоуровневого инвертора с амплитудно-импульсным формированием синусоиды.



### 3. Регулирование напряжения

Напряжение на выходе электростанций энергосистемы стабильно; отклонение напряжения от номинального составляет величину порядка 1–2%.

Глубина регулирования напряжения электростанции определяется кратностью изменения разрегулирующего параметра при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной. Источники электроэнергии — синхронный генератор или солнечные панели должны обладать определенным ресурсом для компенсации влияния разрегулирующего параметра напряжения. В синхронных генераторах — это

мощность возбуждения генератора, в солнечных электростанциях – это мощность генерирования солнечных панелей. Разрегулирующим параметром в синхронных генераторах является ток нагрузки, который изменяется в пределах порядка 20% от номинального тока, а также небольшие изменения фазы тока нагрузки. В солнечных электростанциях разрегулирующим параметром является само напряжение солнечных панелей, которое изменяется в пределах от нуля до номинального напряжения, т.е. во всем интервале изменения солнечного излучения. Такая большая глубина регулирования в солнечных электростанциях (100%) создаёт сложности для создания регуляторов напряжения. Регулирование напряжения вольтаических солнечных электростанций возможно посредством многоуровневых инверторов и импульсной модуляции.

Эффективным фактором уменьшения глубины регулирования и упрощения инвертора и регулятора напряжения является использование буферных аккумуляторов (см, выше п.1). В этом случае глубина регулирования определяется пределами изменения напряжения на аккумуляторе. Пределы напряжения на выходе аккумулятора от полностью разряженного до полностью заряженного состояния составляют при номинальном напряжении единичного аккумулятора 12 В: от 9 В до 14 В, т.е. от – 25 % до + 17 % от номинала. Интервал отклонения напряжения, соответственно: 42%, независимо от интенсивности солнечного излучения.

#### **4. Регулирование реактивной мощности**

Синхронные генераторы традиционных электростанций обеспечивают независимое регулирование реактивной мощности в широких пределах посредством регулирования тока возбуждения [7].

В вольтаических солнечных электростанциях составляющая реактивного тока в генерированном токе определяется рядом следующими параметрами: интенсивностью солнечного излучения, величиной тока, генерированного солнечными панелями, величиной напряжения

сети, величиной и характером нагрузки, величиной и характером сопротивления контура «инвертор-сеть». При заданном активном токе величина реактивного тока, передаваемого солнечной электростанцией в сеть, практически нерегулируема и может регулироваться лишь в ограниченных пределах.

## **5. Гарантированная генерация мощности**

В солнечной электростанции величина первичного энергоресурса – солнечного излучения – нерегулярна, т.е. изменяется по величине и по времени в зависимости от природных условий. Соответственно, нерегулярна и нерегулируема величина генерируемой электроэнергии. В то время как традиционные электростанции обеспечены достаточным количеством первичного энергоресурса: гидроэлектростанции имеют накопительные бассейны суточного и сезонного регулирования, тепловые электростанции имеют достаточные запасы топлива – и по этой причине, в отличие от солнечных электростанций, могут генерировать электроэнергию в заданном количестве в любое время суток и в любой сезон. Гарантированность генерации мощности может быть значительно повышена при использовании буферных аккумуляторов (см. выше).

Учитывая вышеизложенное (п.п. 1–5), можно заключить следующее.

## **Заключение**

1. Принципиальное отличие солнечных voltaических электростанций от традиционных электростанций заключается в том, что генерация переменного напряжения в традиционных электростанциях выполняется электромагнитным преобразованием механической энергии в электрическую посредством синхронного генератора, а в солнечных voltaических электростанциях посредством коммутационного переключения постоянного тока полупроводникового инвертора.

2. Полупроводниковый инвертор солнечных voltaических электростанций уступает синхронному генератору традиционных электростанций по основным характеристикам технических требований энергосистемы, а именно: перегрузочной способности, устойчивости, синусоидальности формы напряжения, регулируемости напряжения и реактивного тока, указанных выше.

3. Указанные недостатки могут быть ограничены в значительной степени при использовании накопительных буферных аккумуляторов, включённых между солнечными панелями и инвертором.

4. В условиях ограниченности традиционных энергоресурсов и повышения их цен солнечные voltaические электростанции находят всё более широкое распространение, невзирая на их изложенные недостатки. При этом солнечные voltaические электростанции требуют дополнительных исследований и технических решений в названном направлении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. <https://renew.ru/installed-capacity-of-global-solar-energy-reached-500-gw/>
2. Установленная мощность мировой солнечной энергетики
3. <http://www.minenergy.am/ru/page/416> Министерство энергетических инфраструктур и природных ресурсов Республики Армения. Солнечная энергетика
4. [http://advisory.am/news\\_ru.html](http://advisory.am/news_ru.html) Перспектива сооружения солнечных электростанций в Армении
5. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная\\_электростанция](https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная_электростанция)
6. *Խարազյան Ռ. Ս. Վերականգնվող էներգիայի աղբյուրներ և տեխնոլոգիաներ*, Եր., 2012:
7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения
8. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины, ч. 2: М.: «Высш. Школа», 1979. 304с.
9. Давидян Ж.Д., Тамразян М.Г., Арутюнян Л.А. Резонансный фильтр выходного напряжения инверторов солнечных электростанций. «Вестник НПУА, Электротехника, Энергетика», 2022, № 2.

## COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF SOLAR VOLTAIC AND TRADITIONAL POWER PLANTS

*L. Harutyunyan*

*National Polytechnic University of Armenia*

### ABSTRACT

The fundamental difference between solar voltaic power plants and traditional power plants is that the generation of alternating voltage in traditional power plants is carried out by a synchronous generator, and in solar voltaic power plants by a semiconductor switching inverter. As a result, solar voltaic power plants are inferior to traditional power plants in terms of the basic technical requirements of the power system: overload capacity, stability, sinusoidal voltage waveform, voltage adjustability and reactive current. These disadvantages can be limited to a large extent when using storage buffer batteries connected between the solar panels and the inverter.

**Keywords:** solar voltaic power plant, mathematical model of a solar voltaic power plant, output voltage form, load characteristics of generation, regulation of reactive power of a solar voltaic power plant.



DOI 10.48200/1829-0450\_pmn\_2023\_2\_57  
УДК 621.315

Поступила: 18.12.2023г.  
Сдана на рецензию: 21.12.2023г.  
Подписана к печати: 26.12.2023г.

## ЭКСИТОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНИЧЕСКОЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКЕ GaAs

*Д.Г. Геворгян<sup>2</sup>, С.П. Гаваладжян<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Российско–Армянский (Славянский) университет*  
<sup>2</sup>*Римский университет Ла Сапиенца (Рим, Италия)*

*sargis.gavalajyan@rau.am*

### АННОТАЦИЯ

Методом конечных элементов в приближении эффективной массы численно исследованы экситонные состояния в конической квантовой точке GaAs, а именно: зависимость энергии экситона от геометрических параметров конической квантовой точки. На основании полученных результатов рассчитана эффективная ширина запрещенной зоны системы, оценено и показано, что время жизни экситона в конической квантовой точке составляет наносекунды.

**Ключевые слова:** коническая квантовая точка, экситон, радиационное время жизни, эффективная ширина запрещенной жизни.

### Введение

Развитию квантовых технологий способствовало создание новых технологических методов, позволяющих выращивать полупроводниковые квантовые точки (КТ) различной конфигурации, такие как КТ ядро-оболочка, асимметричные КТ, наноголоволастики, квантовые кольца, конические квантовые точки (ККТ) и т.п. [1–4].

ККТ, которые имеют нетривиальную геометрию, являются одной из интересных форм КТ [5–8]. Аналитическое описание ККТ является чрезвычайно сложной задачей. С другой стороны, наличие двух геометрических параметров в этих системах позволяет более гибко манипулировать энергетическими уровнями носителей заряда. В исследуемой системе такими параметрами являются радиус и высота конуса. Очевидно, что изменяя эти параметры, можно манипулировать уровнями энергии и волновыми функциями электронов и дырок.

Например, в работе [6] авторами было исследовано магнетопоглощение в конической квантовой точке с сильно вытянутым характером в рамках геометрического адиабатического приближения. В работе были получены зависимости края поглощения от геометрических параметров конической квантовой точки. Выявлены правила отбора для переходов между уровнями с разными квантовыми числами. Также было отмечена возможность использования таких структур для элементной базы светодиодов на квантовых точках.

Отметим, что системы с нетривиальной симметрией невозможно изучать аналитическими методами. В таких случаях можно применить численные методы для изучения электронных свойств квантовых наноструктур. Многочисленные методы исследования электронных и экситонных состояний квантовых наноструктур – такие, как метод диагонализации, метод конечных элементов, вариационный метод и т.д., использовались для изучения характеристик экситонов в таких системах [9]. Например, в работах [9–11] исследованы свойства полупроводниковых наноструктур в рамках вариационного метода. В работах [12–17] применяется метод конечных элементов для изучения энергетического спектра данных наноструктур. В частности, в работе [15] детально рассмотрено применение метода конечных элементов для решения задачи нахождения электронных состояний в квантовых точках с различными геометрическими размерами и формами. В указанной работе проведен детальный анализ сходимости полученных результатов для различных характеристических параметров алгоритма.

В полупроводниковых КТ актуальными остаются также исследования экситонных состояний, так как эти свойства определяют возможности применения данных наноструктур в оптоэлектронных приборах. В научной литературе можно найти огромное количество работ, посвященных исследованию данной тематики [18–23].

Целью настоящей работы является определение энергии экситона в ККТ. Эти наноструктуры интересны возможностью гибкого управления энергетическими спектрами, а значит, и оптическими свойствами, путем изменения двух геометрических параметров, а именно, высотой конуса и радиусом основания. Статья организована следующим образом: в начале рассматривается задача электронно-дырочной пары, затем определяется энергия экситона численным методом, а именно: методом конечных элементов, и вычисляется время жизни экситона. В конце приведено обсуждение результатов.

## 1. Экситонные состояния в ККТ

Рассмотрим экситонные состояния в ККТ и решим задачу для случая, когда высота  $H$  и радиус  $R$  конуса являются сравнительными величинами. Это означает, что задача не может быть решена аналитически, и для решения задачи необходимо применять либо приближенные методы, либо численные. Гамильтониан экситонной системы в декартовых координатах можно записать следующим образом:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \Delta_e - \frac{\hbar^2}{2m_h^*} \Delta_h + U_{\text{conf}}(r_e) + U_{\text{conf}}(r_h) + V_{eh}(r_e, r_h), \quad (1)$$

где  $m_e^*$  и  $m_h^*$  – эффективные массы электрона и дырки, соответственно,  $V_{eh}(r_e, r_h)$  потенциал взаимодействия между электроном и дыркой,  $U_{\text{conf}}(r_e)$  и  $U_{\text{conf}}(r_h)$ , соответственно, ограничивающие потенциалы электрона и дырки. Так как мы будем рассматривать случай ККТ с непроницаемыми стенками, внутри ККТ потенциальная энергия будет равна нулю, а вне ККТ – бесконечности.

Как известно, задача нахождения экситонных состояний в КТ можно разделить на три типа, в зависимости от соотношений энергий, обусловленных кулоновским взаимодействием между электроном и дыркой, а также энергией размерного квантования. Выделяются следующие три режима квантования: режим сильного размерного квантования, когда  $E_{SQ} \gg E_C$ , режим слабого размерного квантования, когда  $E_{SQ} \ll E_C$ , и наконец, режим промежуточного размерного квантования, когда  $E_{SQ} \sim E_C$ . Мы будем рассматривать режим сильного размерного квантования, когда  $a_h, a_e \ll R, H$ , где  $a_h$  и  $a_e$ , соответственно, боровские радиусы дырки и электрона.

В случае режима сильного размерного квантования, когда можно пренебречь членом кулоновского взаимодействия между электроном и дыркой в гамильтониане системы; волновую функцию экситона можно представить в виде  $\Psi(r_e, r_h) = \psi_e(r_e)\psi_h(r_h)$ . От текущей формы волновой функции мы можем перейти к новой форме, введя координаты центра масс и относительного движения частиц. Исходя из того, что частица в основном локализована в центре КТ, мы предполагаем, что центр масс экситона расположен в центре КТ. Таким образом, в задаче будет учитываться сдвиг экситонной линии при изменении геометрических параметров ККТ, происходящий за счет размерного квантования движения экситона в целом. Волновую функцию экситона можно представить в виде:

$$\Psi(r_e, r_h) = \varphi(r)\Psi_{l,m,n}(R), \quad (2)$$

где  $r = r_e - r_h$ ,  $R = \frac{m_e r_e + m_h r_h}{m_e + m_h}$ , где  $\varphi(r)$  – волновая функция относительного движения, соответствующая основному или не очень высокому возбужденному состоянию.  $\Psi_{l,m,n}$  выражается формулой  $\Psi_{n,l,m}(R, \theta, \varphi) = C Y_{l,m}(\theta, \varphi) \chi(R)$  и описывает движение центра тяжести с учетом граничных условий на поверхности конуса. Решение экситонной проблемы численными методами, а именно, МКЭ (метод конечных элементов), приведено в следующем параграфе.

В качестве следующего шага мы оценим радиационное время жизни экситонных состояний в КТ, используя формулу, полученную в [24] для прямозонного полупроводника.

$$\tau_{exc} = \frac{2\pi\epsilon_0 m_0 c^3 \hbar^2}{\sqrt{\epsilon} e^2 E_{exc}^2 f}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость,  $E_{exc}$  – энергия экситона,  $f$  – сила осциллятора, определяемая по формуле:

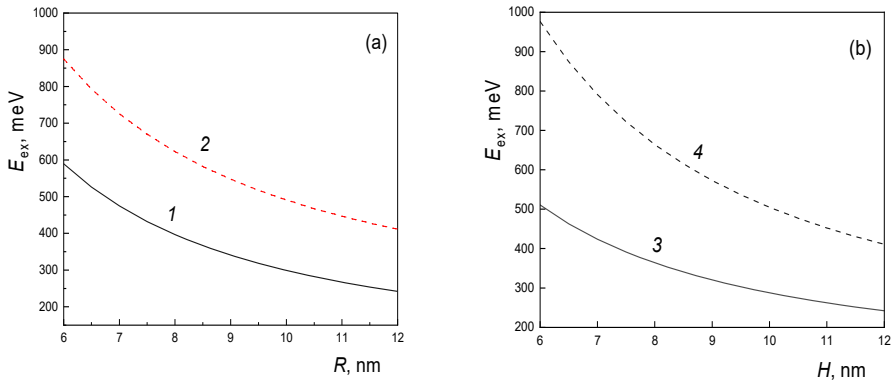
$$f = \frac{E_p}{E_{exc}} \left| \int \Psi_{exc}(\mathbf{r}_e, \mathbf{r}_h) d\mathbf{r}_e d\mathbf{r}_h \right|^2 \quad (4)$$

где  $E_p$  это энергия Кейна, и для GaAs равняется  $E_p = 22.71$  эВ [25].

## 2. Обсуждение результатов

Перейдем к обсуждению полученных результатов. Отметим, что численные расчеты выполнены для ККТ из GaAs. Материальные параметры для GaAs при комнатной температуре следующие  $E_p = 1.5192$  эВ,  $\epsilon = 12.91$ ,  $m_0 = 9 \times 10^{-31}$  кг,  $m_e = 0.0665m_0$ ,  $m_h = 0.45m_0$ , где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны [25].

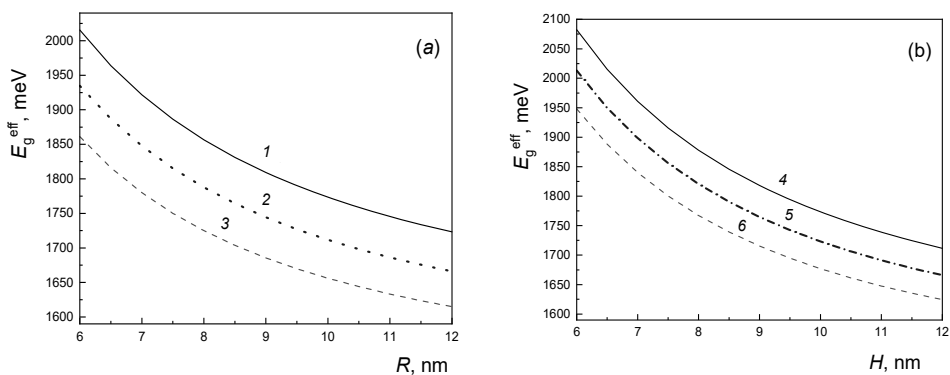
Рисунок 1. Зависимость энергии экситона от (a) радиуса основания ККТ, при  $H=12$  нм: кривая (1)  $n = 0, q=1$ , кривая (2)  $n = 1, q = 1$ , (b) высоты ККТ при  $R = 12$  нм: кривая (3)  $n = 0, q = 1$ , кривая (4)  $n = 1, q = 1$ .



На Рис. 1 а представлена зависимость энергии экситона от радиуса основания КТ для первых двух уровней спектра, который, как уже было отмечено выше, рассчитаны с помощью МКЭ. Как видно, с увеличением радиуса основания ККТ энергия экситона уменьшается, что является следствием ослабления эффекта размерного квантования. Аналогичная зависимость показана для зависимости энергетического спектра от высоты ККТ на Рис. 1 б, при фиксированных значениях радиуса основания ККТ.

Имея зависимости энергетических уровней экситона от геометрических параметров ККТ, можно также рассчитать зависимость эффективной ширины запрещенной зоны от тех же параметров. Такие зависимости показаны на Рис. 2 а и б. Как видим, с увеличением геометрических параметров ККТ эффективная энергия запрещенной зоны уменьшается. Естественно, что в этом случае край поглощения ККТ будет уменьшаться. При этом следует отметить, что в предельном случае, когда геометрические параметры ККТ принимают большие значения, эффективная ширина запрещенной зоны ККТ стремится к эффективной ширине запрещенной зоны объемного полупроводника.

Рисунок 2. Зависимость эффективной ширины запрещенной зоны от (а) радиуса основания ККТ, когда  $H=10$  нм кривая (1),  $H=12$  нм кривая (2),  $H=15$  нм кривая (3); (б) от высоты ККТ, когда  $R=10$  нм кривая (4),  $R=12$  нм кривая (5),  $R=15$  нм кривая (6).



Отметим, что при оценке радиационного времени жизни мы пренебрегли взаимодействием экситона с фононами. Расчетные радиационные времена жизни для различных размеров КТ представлены в Табл.1. Характерные времена находятся в диапазоне наносекунд. Как видно из таблицы, с увеличением размеров ККТ увеличивается радиационное время жизни. Увеличение радиационного времени жизни можно объяснить следующим образом: с увеличением размеров ККТ энергия экситона и интеграл перекрытия в формуле силы осциллятора уменьшаются, так как эффект размерного квантования ослабевает.

*Таблица 1.  
Зависимость радиационной времени жизни экситона  
для различных размеров КТ.*

$R$ , нм	6	8	11	13	15	17
$H$ , нм	13	13	13	13	13	13
$\tau_{\text{exc}}$ , нс	0.58	0.82	1.16	1.36	1.59	1.8

### 3. Заключение

В заключение отметим, что в данной работе теоретически исследованы экситонные состояния конической квантовой точки, в рамках метода конечных элементов – при режиме сильного размерного квантования. Были получены зависимости энергии экситона от радиуса основания и высоты конической КТ, что позволило также выявить зависимость эффективной ширины запрещенной зоны для ККТ из GaAs. Расчет радиационного времени жизни с пренебрежением фононных эффектов, показал, что характерные времена жизни находятся в диапазоне наносекунд.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Hayrapetyan D., Amirkhanyan S., Kazaryan E., Sarkisyan H. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 84, 367, 2016.

2. *Lim B., Camargo P.H., Xia Y.* Langmuir, 24,10437, 2008.
3. *Lorke A., Luyken J. Garcia J., Petroff P.* Jpn. J. Appl. Phys. 40, 1857, 2001.
4. *Medvid A., Onufrijevs P., Mychko A.* Nanoscale Research Letters, 6, 582, 2011.
5. *Hayrapetyan D., Chalyan A., Kazaryan E., Sarkisyan H.* J. Nanomaterials, 16, 406, 2015.
6. *Hayrapetyan D., Kazaryan E., Sarkisyan H.* Opt. Comm., 371, 138, 2016.
7. *Khachatryan K., Mkrtchyan M., Hayrapetyan D., Kazaryan E., Sarkisyan H.* Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 134, 114887, 2021.
8. *Baghdasaryan D., Hayrapetyan D., Sarkisyan H.A., Kazaryan E., Medvids A.* J. Contemp. Phys. 52, 129, 2017.
9. *Nenashev A., Dvurechenskii A.* J. Appl. Phys. 127, 154301, 2020.
10. *Bose C., Sarkar C.* Phys. stat. sol. (b), 218, 461, 2000.
11. *Hayrapetyan D., Bleyan Y., Baghdasaryan D.* Phys. E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 105, 47, 2019.
12. *Kandemir B.* Phys. Rev. B, 72, 165350, 2005.
13. *Mantashian G., Hayrapetyan D.* J. Phys.: Condens. Matter, 34, 245302, 2022.
14. *Matagne P., Destine J., Cantraine G., Leburton J.* CMES-Computer Modeling in Engineering and Sciences, 1, 1, 2000.
15. *Mantashian G., Mantashyan P., Hayrapetyan D.* Computation, 11(1), 5, 2023.
16. *Wang-Min Z., Chong-Yu W., Yong-Hai C., Zhan-Guo W.* Chinese Phys. 15, 1315, 2006.
17. *Sargsian T., Mantashyan P., Hayrapetyan D.* Nano-Structures and Nano-Objects, 33, 100936, 2023.
18. *Satori H., Sali A.* Phys. E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 48, 171, 2013.
19. *Krenner H., Stufler S., Sabathil M.* New J. Phys. 7, 184, 2005.
20. *Baghdasaryan D., Hakobyan E., Hayrapetyan D., Iorsh I., Shelykh I., Shahnazaryan V.* Phys. Rev. Materials 6, 034003, 2022.
21. *Kambhampati P.* J. Phys. Chem. C 115, 45, 22089, 2011.
22. *Beard M.* J. Phys. Chem. Lett. 2, 11, 1282, 2011.
23. *Garoufalidis C., Zeng Z., Bester G., Galanakis I., Hayrapetyan D., Paspalakis E., Baskoutas S.* J. Phys. Chem. C, 126, 5, 2833, 2022.
24. *Fonoberov V., Balandin A.* Appl. Phys. Lett., 85, 5971, 2004.
25. *Rosencher E., Vinter B.* Optoelectronics, Cambridge University Press, 2002.



**EXCITON STATES IN GAAS CONICAL QUANTUM DOT***D. Gevorgyan, S. Gavalajyan**Russian-Armenian (Slavonic) University  
Sapienza University of Rome (Rome, Italy)*

In the current article, the effective mass approximation conjoined with the Finite element method was used to study the excitonic states in a conical GaAs QD. In particular, the dependence of the exciton energy on the geometrical parameters of a conical quantum dot has been studied. Based on the obtained results, the effective band gap of the system was calculated. The lifetime of an exciton in a conical quantum dot has been estimated and shown to be in the range of nanoseconds.

**Keywords:** conical quantum dot, exciton, radiative lifetime, effective bandgap.

## ХИМИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI 10.48200/1829-0450\_pmn\_2023\_2\_66  
УДК 2788

Поступила: 07.12.2023г.  
Сдана на рецензию: 07.12.2023г.  
Подписана к печати: 14.12.2023г.

### ВОЗДЕЙСТВИЕ БИОГЕННЫХ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА (AgNPs) НА НЕКОТОРЫЕ БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЕЧЕНИ БЕЛЫХ БЕСПОРОДНЫХ КРЫС WISTAR

*Дж. Г. Тумоян, Ш.А. Казарян, А.А.Оганесян*

*Российско-Армянский (Славянский) университет,*

*julia.tumoyan@rau.am, shushanik.kazaryan@rau.am,  
ashkhen.hovhannisyan@rau.am*

#### АННОТАЦИЯ

В данной статье представлены результаты исследования профиля воздействия биогенных наночастиц серебра, стабилизированных в 50% экстракте *O. araratum*, на биохимические показатели функционирования печени белых беспородных крыс Wistar. Оценка воздействия проводилась определением активности ферментов, таких как аланинаминотрансфераза (АЛТ), аспаргатаминотрансфераза (АСТ), лактатдегидрогеназы (ЛДГ) и щелочной фосфатазы (ЩФ), а также содержания общего белка (ОБ) и альбумина.

Результаты исследования выявили, что биогенные НЧ серебра приводят к незначительному повышению активности aminotransфераз, в частности АЛТ, повышение которого

несет не патологический характер исходя из справочных норм биохимических показателей экспериментальных животных. Повышается также активность ЛДГ и ЩФ, что тоже несет не патологический характер. Особых изменений в содержании общего белка и альбумина не наблюдается и значения находятся в пределах нормальных величин. В связи с этим можно предположить, что биогенные НЧ Ag не влияют на синтетическую функцию печени.

**Ключевые слова:** биогенные AgNPs, *Ocimum araratum*, активность ферментов, общий белок, альбумин.

## Введение

Печень является одним из крупнейших органов организма и основным центром метаболической и выделительной деятельности. Печень отвечает за детоксикацию и выведение широкого спектра эндогенных и экзогенных веществ, и любое повреждение или нарушение ее функционирования может иметь серьезные последствия. Определенные химические вещества, лекарственные средства, продукты питания и различные патогены (бактериальные, грибковые или вирусные) могут вызывать различные заболевания печени, такие как гепатит, цирроз, рак печени и т.д. Большинство гепатотоксичных веществ повреждают клетки печени, вызывая перекисное окисление липидов и другие окислительные повреждения [1].

В настоящее время терапевтические и диагностические подходы, основанные на нанотехнологиях, проявляют весомые перспективы в уменьшении повреждений печени, вызванных различными агентами. Использование наночастиц (НЧ) – таких, как наночастицы серебра (AgNP), стало одной из быстро развивающихся областей исследований, с точки зрения безопасной доставки различных лекарственных средств в органы-мишени с минимальными побочными эффектами. Благодаря своим физическим и химическим характеристикам, НЧ об-

ладают присущими им фармакологическими эффектами, и их накопление может оказать существенное влияние на структуру и функцию печени [2].

Также было показано, что использование НЧ в медицинских целях снижает резистентность микроорганизмов, устраняя основной барьер для традиционного лечения. Проводятся многочисленные исследования с целью нахождения методов лечения, основанные на нанотехнологиях, которые являются более точными и имеют меньше негативных эффектов, чем традиционные методы лечения. НЧ проявляют способность действовать как антиоксидант, подавляя выработку АФК, вызванную веществами, которые, в свою очередь, приводят к окислительному стрессу. Так же известно, что из-за своих прооксидантных свойств AgNPs повышают уровень АФК, что приводит к апоптозу злокачественных клеток [3]. Благодаря своим особенностям и многочисленным потенциальным применениям НЧ и наноструктурированные материалы играют значительную роль в нанобиомедицинских технологиях [4].

В последнее время широкое распространение в синтезе AgNPs получил метод «зеленого» (биогенного) синтеза с использованием различных растительных экстрактов, культур бактерий, водорослей, грибов. Такой метод отличается от остальных методов синтеза (химического, физического) малой токсичностью и высокой биосовместимостью [5]. Благодаря такому методу, возможно получение стабильных НЧ различной формы и размеров уникальными свойствами, что позволяет применять их в различных областях нанотехнологии и нанобиотехнологии [6].

Исследования демонстрируют, что наноматериалы способствуют эффективной доставке терапевтических препаратов к целевому участку безопасным способом. Исследования высвобождения лекарственного средства “in vitro” показали, что инкапсулированные наночастицы лекарственного средства демонстрируют длительное высвобождение лекарственного средства до 7 дней, тем самым увеличивая биодоступность соответствующего лекарственного средства в

организме [7]. Поэтому изучение совместного влияния растительных экстрактов с AgNPs является перспективным направлением.

Поскольку вопросы токсичности печени является глобальной проблемой, а традиционные методы лечения заболеваний печени не столь неэффективны, становится необходимым поиск альтернативных методов лечения заболеваний печени.

В связи с чем целью данной работы являлось изучение влияния биогенных AgNPs стабилизированных в 50% этанольном экстракте *O. araratum* на биохимические параметры функционирования печени белых беспородных крыс Wistar.

## Материалы и методы

Получение биогенных НЧ было осуществлено путем добавления соли Ag<sup>+</sup> к 50% этанольному экстракту *O. araratum*. Биогенные AgNPs, после синтеза были промыты и дополнительно стабилизированы в 50% этанольном экстракте *O. araratum*. Исследование размера и форм НЧ было осуществлено с помощью SEM спектроскопии (SEMLEO-1430 VP, Carl Zeiss, Германия), и nanosize analyser (BeNano 90 Zeta, China) [3].

Для определения качественного и количественного состава вторичных метаболитов, входящих в состав экстрактов, был осуществлен анализ посредством высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Waters Alliance 2695 (Milford, USA) со спектрофотометрическим и диодно-матричным детекторами и программным обеспечением обработки данных MassLynx. Разделение компонентов экстракта проводилось на колонке C-18 (250x4 mm с размером пор 4,5 нм) при скорости элюции 1 мл/мин. со следующей градиентной элюирующей системой: деионизированная подкисленная вода (0,1 мл/л 90% ортофосфорной кислотой), раствор А – ацетонитрил, раствор Б.С 0–5 мин. линейно довели соотношение растворов А:Б до 65%:35%, далее, с 5 по 30 мин., линейно изменяли соотношение

растворов А:Б до 40%:60%, с 30 по 45 мин. поддерживали данное соотношение растворов [8].

Для определения LD50 AgNPs были выбраны две разные концентрации в 4,5 и 6 мг/мл – в соответствии с литературными данными [9]. Так, уже после первой инъекции НЧ Ag в концентрации 6 мг/мл выжило всего 50% особей, после второй – 25%, до конца эксперимента в живых осталось 12,5% особей. В связи с вышесказанным, в дальнейших экспериментах была использована концентрация AgNPs 0,9 мг/кг массы.

Оценка воздействия биогенных НЧ, стабилизированных в 50% экстракте *O. araratum* на биохимические показатели, проводилось на самцах белых беспородных крыс Wistar. Все манипуляции проводились в соответствии с принципами лабораторного ухода за животными Комитета по этике Ереванского государственного медицинского университета (Ереван, Армения) и в соответствии с решением 22 сентября 2010 года Совета европейских сообществ [2010/63/EU].

(<http://www.utsouthwestern.edu/utsw/cda/dept238828/files/469088.html>).

В ходе исследования животные были случайно разделены на 4 экспериментальные группы по 6 особей в каждой с введением следующих компонентов:

- группа – интактный контроль;
- группа 1 – 5,43 мкг/мл раствор розмариновой кислоты;
- группа 2 – 50% этанольный экстракт *O. Araratum*;
- группа 3 – 0,9 мг/кг биогенные AgNPs, стабилизированные в 50% этанольном экстракте *O. Araratum*.

Воздействующие агенты и/б вводились животным на каждые вторые сутки на протяжении 14 дней. После завершения экспериментального периода животных выводили из опыта под легким эфирным наркозом, с последующим забором исследуемого материала (кровь).

Для определения профиля воздействия биогенных, стабилизированных AgNPs, был проведен анализ биохимических показателей в плазме крови, для чего был произведен забор крови из воротной вены

животных в вакутайнеры с антикоагулянтом  $\text{Na}_2\text{ЭДТА}$  (ООО «Астрамед», Россия). Плазму образцов получали центрифугированием крови в течение 15 мин. при 3000 g и 4°C.

Биохимический анализ определения активности АЛТ, АСТ, ЛДГ, ЩФ, а также ОБ и альбумина в плазме крови проводили с помощью стандартных наборов реактивов BioSystems (Испания) на спектрофотометре UV-Vis 18 (MRC, Израиль), согласно предлагающимся протоколам.

Статистический анализ материала проводили на основе комплексного применения стандартных статистических методов: вычисления средних значений, стандартных отклонений, стандартных средних ошибок. Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Достоверность различий и корреляционных связей считалась установленной при  $p$  (вероятность ошибки)  $< 0,05$ .

## Результаты и обсуждения

ВЭЖХ анализ исследуемого экстракта выявил в 50% этанольном экстракте *Ocimum araratum* РК в концентрации 5,43 мкг/мл [8].

В результате синтеза наночастиц AgNPs образовался коричневый осадок – для определения природы образовавшегося вещества, детектирования размеров и формы НЧ, Было определено, что AgNP имеют сферическую форму, а диаметр  $11 \pm 2$  нм [10].

Изменения активности ферментов АЛТ и АСТ в плазме крови являются полезным индикаторами повреждения тканей при многих патологиях. Для диагностики заболеваний печени особенно важное значение имеет определение активности аминотрансфераз. В связи с чем для оценки функционального состояния печени было проведено исследование по определению активности АЛТ и АСТ (Табл. 1).

Таблица 1.

*Активность ферментов АСТ, АЛТ, ЩФ и ЛДГ в плазме крови экспериментальных животных при продолжительности воздействия.*

Группы	АСТ (МЕ/л)	АЛТ (МЕ/л)	ЛДГ (Ед/л)	ЩФ (Ед/л)
Контроль	58±0,3	70±0,7	46±2,69	46±0,17
Розмарино- вая к-та	65,1±2,3	53,04±1,8	171,34±1,8	80,62±3,8
<i>O.araratum</i>	62,8±3,3	124,9±4,06	166,3±6,2	95,81±3,8
AgNPs	26,7±3,9	127,4±4,6	51,2±1,8	68,17±1,8

Результаты исследования выявили, что биогенные AgNPs приводят к незначительному повышению активности аминотрансфераз, а, в частности, АЛТ (127,4±4,6 МЕ/л), повышение которого наблюдается и в группе воздействия 50%-этанольным экстрактом *O. araratum* (124,9±4,06 МЕ/л). Однако данное повышение активности носит не патологический характер, т.к. значения находятся в пределах нормы биохимических показателей экспериментальных животных [11]. Примечательно, что повышение активности АСТ при действии всех образцов находится в пределах нормы для экспериментальных животных. Результаты исследования активности ферментов ЛДГ и ЩФ, представленные в Табл.1, также демонстрируют повышение активности данных показателей. Повышение активности ферментов ЛДГ и ЩФ так же находятся в пределах норм биохимических показателей экспериментальных животных.

Определение содержания общего белка, а также белковых фракций, является важным диагностическим параметром. В Табл. 2 приведены результаты общего содержания белка и альбумина. Анализ этих биохимических параметров в плазме крови интактных животных выявил, что содержание альбумина в норме составляет 29,33±1,3 г/л, а общего белка – 69±1,43 г/л., и под воздействием всех исследованных



агентов особых изменений в содержании общего белка и альбуминов не наблюдается, и значения находятся в пределах нормальных величин, в связи с чем можно предположить, что биогенные НЧ Ag не влияют на синтетическую функцию печени.

Таблица 2.

*Содержание общего белка и альбумина в плазме крови экспериментальных животных.*

Группы	Общий белок (г/л)	Альбумин (г/л)
Контроль	69±1,43	29,33±1,3
Розмариновая к-та	58,71±2,23	18,79±1,2
<i>O.araratum</i>	65,48±3,7	33,8±3,3
AgNPs	60,2±1,15	35,3±1,9

Альбумин в плазме крови выполняет три основные функции: он необходим для поддержания онкотического давления плазмы, участвует в неспецифическом транспорте как переносчик для многих неполярных соединений и является источником для эндогенных аминокислот.

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод, что биогенные AgNPs не влияют на синтетические функции печени, а повышение активности ферментов АЛТ, АСТ носит не патологический характер. AgNPs можно рассматривать как потенциально терапевтические агенты с присущими ими свойствами.

Предвидя проблемы и новизну данного направления, необходимо отметить, что биосовместимость и прочие эффекты биогенных AgNPs нуждаются в дальнейшей надлежащей системной оценке по отношению ко всем органам и системам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hashim M. et al. Implication of nanoparticles to combat chronic liver and kidney diseases: progress and perspectives // "Biomolecules", 2022. Т. 12, № 10. С. 1337.

2. *El-Gizawy M. et al.* Curcumin nanoparticles ameliorate hepatotoxicity and nephrotoxicity induced by cisplatin in rats // “Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology”, 2020. Т. 393. СС. 1941–1953.
3. *Kazaryan S. et al.* Oxidative stress and histopathological changes in several organs of mice injected with biogenic silver nanoparticles // “Artificial Cells, “Nanomedicine and Biotechnology”, 2022. Т. 50, № 1. СС. 331–342.
4. *Bayda S. et al.* The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical-physical applications to nanomedicine // “Molecules”, 2019. Т. 25, № 1. С. 112.
5. *Ahmed S. et al.* Evaluation of acute toxicity and anti-inflammatory effects of *Baccharoides schimperi* (DC.) in experimental animals // “African Journal of Traditional”, “Complementary and Alternative Medicines”, 2015. Т. 12, № 1. СС. 99–103.
6. *Астафьев А.А. и др.* Синтез наночастиц серебра с использованием экстрактов травянистых растений и воздействие наночастиц на бактерии // «Биотехнология», 2018. Т. 34, № 1. СС. 62–71.
7. *Gupta N. et al.* Advancement in nanotechnology-based approaches for the treatment and diagnosis of hypercholesterolemia // “Artificial Cells”, “Nanomedicine and “Biotechnology”. 2018. Т. 46, № 1. СС. 188–197.
8. *Казарян Ш.А., Петросян М.С., Оганесян А.А.* Зеленый синтез наночастиц серебра // VI Международная научная интернет-конференция Физико-химическая биология Ставрополь, 2018. СС. 68–70.
9. *Ferdous Z., Nemmar A.* Health impact of silver nanoparticles: a review of the biodistribution and toxicity following various routes of exposure // “International journal of molecular sciences”, 2020. Т. 21, № 7. СС. 23–75.
10. *Petrosyan M, Gevorgyan T, Kirakosyan G, Ghulikyan L, Ayvazyan N., Hovhannisyan A.*, Testing Green Silver Nano-particles for Genotoxicity, Antioxidant and Anticancer // IFMBE Proceedings. Springer, Cham. 2020, № 77. СС. 567–571.
11. *Абрашова Т.В., Соколова А.П., Селезнева А.И., Хуттунен О.Э., Макарова М.Н., Макаров В.Г.* Вариабельность биохимических и гематологических показателей у лабораторных крыс в зависимости от линии и возраста // «Международный вестник ветеринарии», 2010, № 2. СС. 55–60.
12. *Пшенкина Н.Н.* Сывороточный альбумин: структура и транспортная функция // «Биомедицинский журнал», 2011. Т. 12. СС. 1067–1091.

**IMPACT OF BIOGENIC SILVER NANOPARTICLES (AgNPs)  
ON SOME BIOCHEMICAL INDICATORS OF LIVER FUNCTIONING  
IN WISTAR WHITE OUTBREED RATS**

*J. Tumoyan, Sh. Kazaryan, A. Hovhannisyan*

*Russian-Armenian (Slavonic)University*

**ABSTRACT**

This paper presents the results of a study of the profile of the effect of biogenic silver nanoparticles stabilized in a 50% extract of *O. araratum* on biochemical indicators of the functioning of the liver of white outbred Wistar rats. Exposure assessment was carried out by determining the activity of enzymes such as alanine aminotransferase (ALT), aspartate aminotransferase (AST), lactate dehydrogenase (LDH) and alkaline phosphatase (ALP), as well as the content of total protein (TP) and albumin.

The results of the study revealed that biogenic silver NPs lead to a slight increase in the activity of aminotransferases, in particular ALT, the increase of which is not pathological based on the reference standards of biochemical parameters of experimental animals. The activity of LDH and alkaline phosphatase also increases, which is also not pathological. There are no significant changes in the content of total protein and albumin and the values are within normal limits. In this connection, it can be assumed that biogenic AgNPs do not affect the synthetic function of the liver.

**Keywords:** Biogenic AgNPs, *Ocimum araratum*, enzyme activity, total protein, albumin.

DOI 10.48200/1829-0450\_pmn\_2023\_2\_76  
УДК 541.127

Поступила: 05.12.2023г.  
Сдана на рецензию: 13.09.2023г.  
Подписана к печати: 11.12.2023г.

## ЛИСТЬЯ НЕКОТОРЫХ ДЕРЕВЬЕВ КАК АНТИОКСИДАНТЫ

*Л.Р. Варданян, С.А. Айрапетян*

*Горисский государственный университет*

*luizavardanyan211@gmail.com, syuhayrapetyan@gmail.com*

### АННОТАЦИЯ

В данной статье представлены результаты исследований антиоксидантных свойств листьев дуба черешчатого (*Quercus robur*), дуба грузинского (*Quercus iberica*), ивы белой (*Salix alba*) и дерезы обыкновенной (*Lycium barbarum*). Показано, что все изученные экстракты проявляют антиоксидантные свойства. Установлено, что из изученных экстрактов наибольшее количество антиоксидантов содержится в экстракте листьев дуба греческого ( $1,34 \cdot 10^{-4}$  моль/л в одном мг), а наибольшую антиоксидантную активность проявляет экстракт листьев ивы белой ( $1,01 \cdot 10^5$  моль/л·с).

**Ключевые слова:** листья деревьев, антиоксиданты, окисление, кумол, этилацетат.

### Введение

Окисление органических веществ молекулярным кислородом занимает важное место в химической промышленности с целью получения ценных кислородосодержащих продуктов. Вместе с этим, в ряде случаев окисление является нежелательным процессом, поскольку, протекая произвольно, приводит к накоплению в исходных веществах

продуктов окисления, что является причиной ухудшения эксплуатационных свойств и снижения гарантийных свойств их хранения. С целью предотвращения этого процесса на практике широко распространен метод ингибирования. Сущность этого метода заключается в том, что в исследуемые объекты вводятся специальные добавки – ингибиторы (антиоксиданты – АО), которые предотвращают процесс окисления. Выпускаемые в промышленности АО (фенолы, ароматические амины и т.д.) в большинстве своем являются токсичными продуктами [1]. По этой причине они не могут быть использованы для стабилизации пищевых продуктов и лекарственных препаратов. В этом отношении преимущество нетоксичных АО очевидно. Источниками нетоксичных антиоксидантов может служить растительное сырье. АО действие растений связано с наличием в них фармакологически активных веществ, которые при поступлении в организм животных и человека проявляют физиологически активные свойства и оказывают целебное действие. К числу основных действующих веществ относятся флавоноиды, полифенолы, фенолкарбоновые кислоты, эфирные масла, дубильные вещества и витамины [2]. Антиоксиданты растительного происхождения отличаются от синтетических аналогов широким спектром терапевтического действия, малой токсичностью, низкой стоимостью, и связанной с этим – возможностью длительного и безвредного для здоровья применения.

В данной статье представлены результаты исследований антиоксидантных свойств листьев дуба черешчатого (*Quercus robur*), грузинского (*Quercus iberica*), ивы белой (*Salix alba*) и дерезы обыкновенной (*Lucium barbarum*).

### Экспериментальная часть

Антиоксидантную способность исследованных экстрактов мы изучали на примере модельной реакции иницированного окисления кумола. Выбор кумола объясняется тем, что он является легкоокисля-

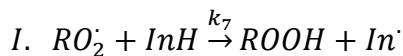
емым веществом, механизм окисления и кинетические параметры которого достаточно глубоко изучены и приведены в литературе. В качестве источника свободных радикалов использовали азо-ди-изобутиронитрил (АИБН), растворителем служил хлорбензол. Использованные реактивы – кумол, хлорбензол, АИБН и этилацетат очищали по методике, описанной в [3]. Экстракты использованных растений получали следующим образом: после сбора сырья их высушивали в сушильном шкафу при 40°C, сухое сырье измельчали в керамической ступке до порошкообразного состояния (<1 мм); на полученный порошок, при комнатной температуре, добавили перегнанный этилацетат (на 1г порошка 20 мл), давали отстоять сутки, далее отфильтровывали при помощи бумажного фильтра. Фильтрат испаривали до постоянного веса при комнатной температуре.

Опыты по окислению проводили на манометрической установке с автоматическим регулированием давления. Метод основан на непосредственной регистрации поглощенного кислорода в результате окисления кумола, и позволяет по обнаруженным периодам индукций ( $\tau$ ) определить суммарное содержание АО в исследованных экстрактах

$$\tau = \frac{f \cdot [InH]}{V_i} \quad (1)$$

где  $V_i$  – скорость инициирования,  $f$  – емкость АО – стехиометрический коэффициент ингибирования,  $[InH]$  – суммарная концентрация АО в исследуемом экстракте. Поскольку параметры  $f$  нами не измерялись, за суммарное содержание АО принимали произведение  $f \cdot [InH]$ .

Из классической литературы [4] известно, что АОА представляет из себя константу скорости реакции линейного обрыва цепи в радикальных реакциях на ингибиторах (InH), в процессах же окисления, константу скорости реакции продолжения цепи ( $k_7$ )



которая зависит от химического состава InH и не зависит от его количественного содержания.

АОА исследованных экстрактов определяли, спрямляя экспериментальные данные в координатах уравнения (2), [5]

$$[O_2] = -\frac{k_2}{k_7} [RH] \ln \left( 1 - \frac{t}{\tau} \right) \quad (2)$$

где  $[O_2]$  – количество поглощенного кислорода за время  $t < \tau$ ,  $[RH]$  – концентрация окисляющегося углеводорода – кумола. Во всех опытах концентрация кумола составляла 2,87 моль/л.

### Результаты и их обсуждение

Опыты показали, что при окислении кумола в присутствии всех использованных экстрактов кинетические кривые поглощения кислорода проходят с четко выраженными периодами индукций, что свидетельствует о наличии в экстрактах АО веществ. Для иллюстрации на Рис. 1 представлены типичные кинетические кривые окисления кумола в отсутствие (прямая 1) и в присутствии экстрактов листьев ивы белой (кривая 2), дерезы обыкновенной (3), дуба черешчатого (4) и дуба грузинского (5). Суммарное содержание АО ( $f \cdot [InH]$ ) определяли спрямляя экспериментальные данные (см. Рис. 2) в координатах уравнения (1). Результаты приведены в Табл., откуда следует, что из исследованных экстрактов в наибольшем количестве АО веществ содержится в экстракте из листьев дуба грузинского ( $1,34 \cdot 10^{-4}$  моль/л), а в наименьшем количестве в экстракте листьев ивы белой ( $0,35 \cdot 10^{-4}$  моль/л).

С целью определения АОА экспериментально измеренные концентрации поглощенного кислорода за время  $t < \tau$  спрямляли в координатах ур. 2. Например, как видно из Рис. 3., наблюдается четкая корреляция между количеством поглощенного кислорода и параметром  $\ln(1-t/\tau)$ . Тангенсы углов полученных прямых соответствуют отношению  $k_2/k_7$  и, учитывая, что для кумола  $k_2=4,677 \cdot 10^6 \exp(-9800/RT)$  л/моль·с [6], для исследованных экстрактов были определены численные значения  $k_7$ , характеризующие их АОА.

Рисунок 1. Кинетические кривые поглощения кислорода при окислении кумола в отсутствие (1) и в присутствии экстракта листьев ивы белой (2; 4.99 мг), дерезы обыкновенной (3; 2.79 мг), дуба черешчатого (4; 2.58 мг) и дуба грузинского (5; 2.25 мг). Скорость иницирования  $V_i = 1.25 \cdot 10^{-7}$  моль/л·с,  $T = 348$  К.

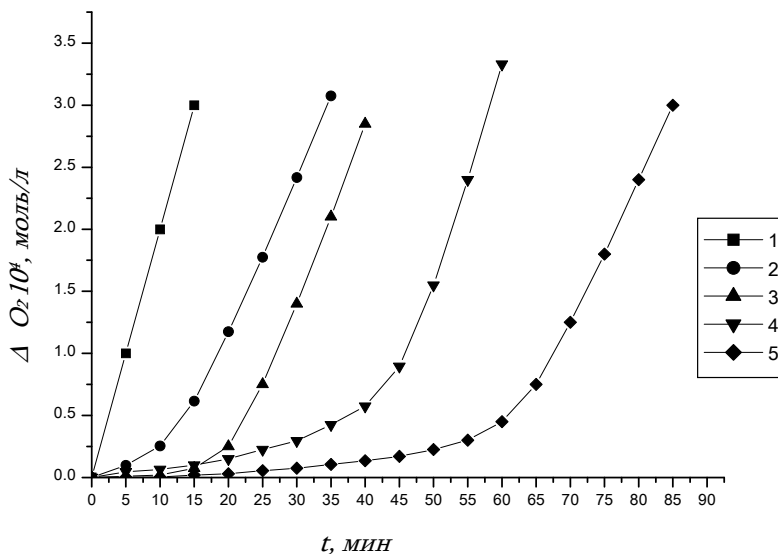
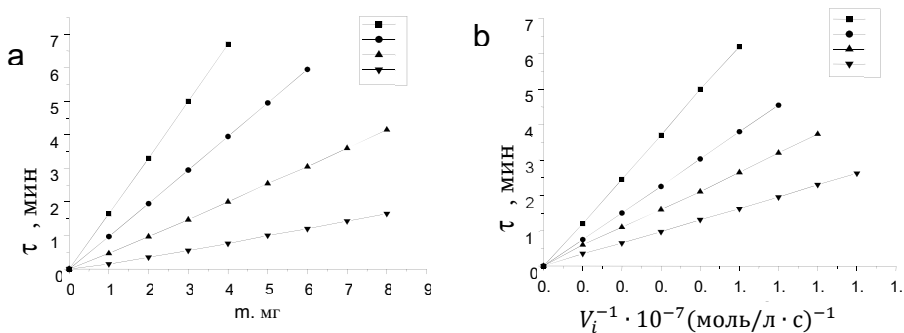


Рисунок 2. Зависимость периодов индукции поглощения кислорода при окислении кумола: а) от содержания экстракта листьев дуба грузинского (1), дуба черешчатого (2), дерезы обыкновенной (3), ивы белой (4) при  $V_i = 1.25 \cdot 10^{-7}$  моль/л·с; б) от скорости иницирования (1' – 2.73 мг; 2' – 2.98 мг; 3' – 3.13 мг; 4' – 4.75 мг).  $T = 348$  К.





С целью определения АОА экспериментально измеренные концентрации поглощенного кислорода за время  $t < \tau$  спрямляли в координатах ур.2. Например, как видно из Рис. 3., наблюдается четкая корреляция между количеством поглощенного кислорода и параметром  $\ln(1-t/\tau)$ . Тангенсы углов полученных прямых соответствуют отношению  $k_2/k_7$  и, учитывая, что для кумола  $k_2=4,677 \cdot 10^6 \exp(-9800/RT)$  л/моль·с [6], для исследованных экстрактов были определены численные значения  $k_7$ , характеризующие их АОА.

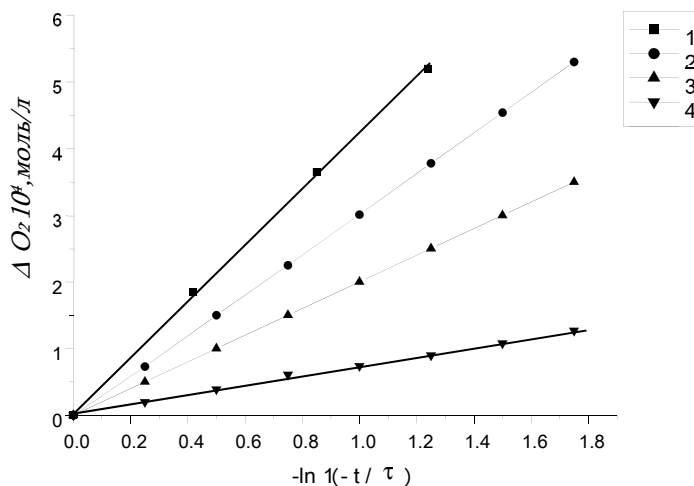
Результаты этих расчетов представлены в Таблице. Из Табл. видно, что при окислении кумола из исследованных экстрактов наибольшую АОА проявляет экстракт листьев ивы белой ( $1,01 \cdot 10^5$  л/моль·с). Полученные данные свидетельствуют, что указанные экстракты по АОА немного уступает синтетическим классическим антиоксидантам. Так, например, константа скорости реакции  $k_7$  с кумилпероксидными радикалами для  $\alpha$ -нафтола при 333К равна  $1,6 \cdot 10^5$  л/моль·с, для гидрохинона –  $1,2 \cdot 10^5$ , для ионола –  $2 \cdot 10^5$  и т.д. [6].

*Таблица.*

*Суммарное содержание антиоксидантов в этилацетатных экстрактах некоторых растений и их антиоксидантные активности.*

№	Растение	Сырье	$f[\ln H] \cdot 10^4$ моль/л	$k_7 \cdot 10^{-4}$ л/ моль·с 348К
1.	Дуб черешчатый Quercus robur	Листья	0,95	7,07
2.	Дуб грузинский Quercus iberica	Листья	1,34	5,58
3.	Дерева обыкновенная Lycium barbarum	Листья	0,66	6,76
4.	Ива белая Salix alba	Листья	0,35	10,10

Рисунок 3. Зависимость количества поглощенного кислорода при окислении кумола в периоде индукции реакции в присутствии экстракта из листьев дуба грузинского (1), дуба обыкновенной (2), дуба черешчатого (3) и ивы белой (4).  $T = 348 \text{ K}$ .



Сопоставляя приведенные в Табл. результаты по содержанию АО веществ ( $f \cdot [\text{InH}]$ ) и по АОА ( $k_7$ ) исследованных экстрактов, как и следовало ожидать, не обнаружилась связь между этими параметрами. Например, содержание АО в экстракте листьев ивы белой приблизительно в 3,8 раза меньше, чем в листьях дуба грузинского, но его АОА активность в два раза больше. Этот факт еще раз подтверждает, что АОА не зависит от концентрации ингибитора, т.е. от содержания АО в реакционной смеси. АОА, скорее всего, зависит от строения АО и  $RO_2$  радикалов, а также от среды реакционной смеси.

## Выводы

1. Проведенное исследование показало, что этилацетатные экстракты листьев исследованных деревьев содержат АО и проявляют высокую АОА.

2. Из исследованных экстрактов в наибольшем количестве АО веществ содержится в экстракте из листьев дуба грузинского ( $1,34 \cdot 10^{-4}$  моль/л), а в наименьшем количестве в экстракте листьев ивы белой ( $0,35 \cdot 10^{-4}$  моль/л).

3. Наибольшую АOA проявляет экстракт листьев ивы белой ( $1,01 \cdot 10^5$  л/моль·с), несмотря, что в нем меньше АО веществ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Tavadyan L., Tonikyan H., Minasyan S., Arutyunyan L., Greenaway F., Gray-Kaufman A., Sorenson J.* Anti-tert-Butylperoxyl Radical Reactivities of Copper (II), Manganese (II) and Iron (III) 3,5-Diisopropylsalicylate Chelates. // *Inorgl. Chim. Acta*, v.328. P.1, 2002.
2. *Samuelson A.* The traditional uses, chemical constituents and biological activities of *Plantago major* L. A review // *J Ethnopharmacol*, 2000, v. 71, № 1–2. PP. 1 – 21.
3. *Вардамян Л.Р.* Антиоксидантные свойства биоантиоксидантов лекарственных растений. Кинетика и механизм. Дисс. доктора хим. наук, Ер., 2017.
4. *Цепалов В.Ф., Харитонова А.А., Гладышев Г.П., Эмануэль Н.М.* Определение констант скорости и коэффициентов ингибирования фенолов-антиоксидантов с помощью модельной цепной реакции // *Кинетика и катализ*, 1977, т.18, №5 . СС. 1261–1267.
5. *Денисов Е.Т.* Механизм гомолитического распада молекул в жидкой фазе // «Итоги науки и техники. Серия: Кинетика и катализ». М.: ВИНТИ, т. 9, 1981, 158с.
6. *Денисов Е.Т.* Константы скоростей жидкофазных гомолитических реакций. М.: «Наука», 1971, 712с.

**LEAVES OF SOME TREES AS ANTIOXIDANTS***L. Vardanyan, S. Hayrapetyan**Goris State University***ABSTRACT**

Here is presented the results of studies of the antioxidant properties of leaves of English oak (*Quercus robur*), Georgian oak (*Quercus iberica*), White Willow (*Salix alba*) and Common Wolfberry (*Lycium barbarum*).

It was shown that all studied extracts exhibit antioxidant properties. It has been established that of the studied extracts, the largest number of antioxidants is contained in the Greek oak leaf extract ( $1.34 \cdot 10^{-4}$  mol/l in one mg), and the white willow leaf extract exhibits the highest antioxidant activity ( $1.01 \cdot 10^5$  mol/l·sec).

**Keywords:** tree leaves, antioxidants, oxidation, cumene, ethyl acetate.

---

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

- Аветисян В. Г.** д.т.н., профессор кафедры телекоммуникаций Российско-Армянского (Славянского) университета, заместитель директора по науке Ереванского научно-исследовательского института Средств Связи
- Аветисян С.М.** ведущий инженер Ереванского научно-исследовательского института Средств Связи
- Айрапетян С.А.** к.х.н., доцент кафедры биологии и химии Горисского государственного университета
- Арутюнян Л.А.** аспирант кафедры электроэнергетики Национального Политехнического университета Армении
- Варданын Л.Р.** д.х.н., доцент, заведующая кафедрой биологии и химии Горисского государственного университета
- Везирян Р.М.** студент второго курса магистратуры по специальности «Информатика и прикладная математика» Национального Политехнического университета Армении
- Гаваладжян С.П.** студент второго курса магистратуры Инженерно-физического института по направлению подготовки «Электроника и наноэлектроника» Российско-Армянского (Славянского) университета
- Геворгян Д.Г.** студент второго курса магистратуры Римского университета Ла Сапиенца (Италия) по специальности “Data Scientist”
- Казарян Ш.А.** к.б.н., старший преподаватель кафедры медицинской биохимии и биотехнологии Российско-Армянского (Славянского) университета
- Новиков А.А.** аспирант четвертого года обучения по специальности «Физика полупроводников» Российско-Армянского (Славянского) университета

- Оганесян А.А.** к.б.н., доцент, заведующая кафедрой медицинской биохимии и биотехнологии Российско-Армянского (Славянского) университета
- Тадевоян С.Р.** инженер-разработчик в “YEA Engineering”
- Тумоян Дж.Г.** аспирант второго года обучения по специальности «Биохимия» Российско-Армянского (Славянского) университета
- Хачатурян М.А.** аспирант третьего года обучения по специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ Российско-Армянского (Славянского) университета
- Хачатрян Р.Н.** студент второго курса магистратуры кафедры систем автоматизации Национального Политехнического университета Армении

*Главный редактор РНИ – М.Э. Авакян*  
*Корректор – А.С. Есаян*  
*Компьютерная верстка – А.Г. Антонян*

Адрес Редакции научных изданий  
Российско-Армянского университета:  
0051, г. Ереван, ул. Овсепя Эмина, 123  
тел./факс: (+374 12) 77-57-75 (внутр. 8130)  
e-mail [maria.avakian@rau.am](mailto:maria.avakian@rau.am)

Заказ № 1  
Подписано к печати 06.11.3023г.  
Формат 70x100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная № 1.  
Объем 5.5 усл. п.л. Тираж 100 экз.

*Editor-in-Chief of the RNI – M.E. Avakyan*  
*Proofreader – A.S. Yesayan*  
*Computer layout – A.G. Antonyan*

Address of the Editorial Board of Scientific Publications  
of the Russian-Armenian University:  
0051, Yerevan, st. Hovsep Emin, 123  
tel./fax: (+374 12) 77-57-75 (ext. 8130)  
e-mail: maria.avakian@rau.am

Order No. 1  
Signed for publication on November 06, 2023  
Format 70x100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Offset paper No. 1.  
Volume 5.5 conv. p.l. Circulation 100 copies