

ISSN 2658-3593 (Print)  
ISSN 2713-1564 (Online)



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Н  
Б ТЕХНОЛОГИИ**  
**И** Нано / Био / Инновационные технологии

**2021**  
**Том 15. № 1**

---

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION  
OF THE RUSSIAN FEDERATION

**N  
B TECHNOLOGIES**  
**I** Nano / Bio / Innovation Technologies

**2021**  
**Volume 15. No. 1**



## **NBI TECHNOLOGIES**

**2021. Vol. 15. No. 1**

*Academic Periodical*

First published in 2006

*4 issues a year*

Founder:

Federal State Autonomous  
Educational Institution  
of Higher Education  
“Volgograd State University”

The journal is registered in the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Registration Number **ПН № ФС77-73361** of July 24, 2018)

The journal is included into the **Russian Science Citation Index**

The journal is also included into the following Russian and international databases: **CrossRef** (USA), **DOAJ** (Sweden), **ProQuest** (USA), **Google Scholar** (USA), **JournalSeek** (USA), **OCLC WorldCat**® (USA), **SHERPA/ROMEO** (Spain), **ULRICHSWEB™ Global Serials Directory** (USA), **VINITI Database RAS** (Russia), “**CyberLeninka**” **Scientific Electronic Library** (Russia), “**Socionet**” **Information Resources** (Russia), **IPRbooks E-Library System** (Russia), **E-Library System “University Online Library”** (Russia)

Editorial Staff:

Prof., Dr. *I.V. Zaporotzkova* – Chief Editor (Volgograd)  
Assoc. Prof., Cand. *Yu.S. Bakhracheva* – Executive Secretary and Copy Editor (Volgograd)

Editorial Board:

Prof. *Alberto D'Amore* (Aversa, Italy); Prof. *Alfonso Jimenez* (Alicante, Spain); Prof., Dr. *V.A. Babkin* (Mikhaylovka); Prof., PhD *Bob A. Howell* (Mount Pleasant, USA); Prof., Dr. *D.P. Frolov* (Volgograd); Prof. *Jan Pielichowski* (Krakow, Poland); Prof., Dr. *K. Friedrich* (Kaiserslautern, Germany); Prof., Dr. *S.V. Krasnov* (Tolyatti); Prof., Dr. *I.Yu. Kvyatkovskaya* (Astrakhan); Prof., PhD *LinShu Liu* (Wyndmoor, USA); Prof. *Slavcho Kirillov Rakovsky* (Sofia, Bulgaria); Prof. *Victor Manuel de Matos Lobo* (Coimbra, Portugal); Prof., Dr. *G.E. Zaikov* (Moscow)

Editor of English texts *Yu.V. Chemeteva*

Making up: *Yu.A. Uskova*

Technical editing: *N.M. Vishnyakova, E.S. Reshetnikova*

Passed for printing: Apr. 9, 2021.

Date of publication: May. 28, 2021.

Format 60×84/8. Offset paper. Typeface Times.

Conventional printed sheets 4.3. Published pages 4.6.

Number of copies 500 (1<sup>st</sup> duplicate 1–47).

Order 88. «C» 9.

Open price

Address of the Printing House:  
Bogdanova St, 32, 400062 Volgograd.

Postal Address:

Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd.  
Publishing House of Volgograd State University.  
E-mail: [izvolgu@volsu.ru](mailto:izvolgu@volsu.ru)

Address of the Editorial Office and the Publisher:

Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd.

Volgograd State University.

Tel.: (8442) 46-03-68, 46-55-99. Fax: (8442) 46-18-48

E-mail: [vestnik10@volsu.ru](mailto:vestnik10@volsu.ru)

Journal website: <https://ti.jvolsu.com>

English version of the website:

<https://ti.jvolsu.com/index.php/en/>

## **НБИ ТЕХНОЛОГИИ**

**2021. Т. 15. № 1**

*Научно-теоретический журнал*

Основан в 2006 году

*Выходит 4 раза в год*

### Учредитель:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный университет»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер **ПИ № ФС77-73361** от 24 июля 2018 г.)

Журнал включен в базу **Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)**

Журнал также включен в следующие российские и международные базы данных: **CrossRef** (США), **DOAJ** (Швеция), **ProQuest** (США), **Google Scholar** (США), **JournalSeek** (США), **OCLC WorldCat®** (США), **SHERPA/ROMEO** (Испания), **ULRICHSWEB™ Global Serials Directory** (США), **ВИНИТИ** (Россия), **Научная электронная библиотека «КиберЛенинка»** (Россия), **Соционет** (Россия), **Электронно-библиотечная система IPRbooks** (Россия), **Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн»** (Россия)

### Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, проф. *И.В. Запорожкова* – главный редактор (г. Волгоград)  
канд. техн. наук, доц. *Ю.С. Бахрачева* – ответственный и технический секретарь (г. Волгоград)

### Редакционный совет:

проф. *Алберто Д'Аморэ* (г. Аверса, Италия); проф. *Альфонсо Хименес* (г. Аликанте, Испания); д-р хим. наук, проф. *В.А. Бабкин* (г. Михайловка); проф., PhD *Боб А. Ховелл* (г. Маунт-Плезант, США); д-р экон. наук, проф. *Д.П. Фролов* (г. Волгоград); проф. *Ян Пиеличовский* (г. Краков, Польша); д-р, проф. *К. Фридрих* (г. Кайзерслаутерн, Германия); д-р техн. наук, проф. *С.В. Краснов* (г. Тольятти); д-р техн. наук, проф. *И.Ю. Квятковская* (г. Астрахань); проф., PhD *Лин Шу Лиу* (г. Уиндмур, США); проф. *Славчо Кириллов Раковский* (г. София, Болгария); проф. *Виктор Мануэль де Матос Лобо* (г. Коимбра, Португалия); д-р хим. наук, проф. *Г.Е. Заиков* (г. Москва)

Редактор английских текстов *Ю.В. Чеметева*  
Верстка *Ю.А. Усковой*  
Техническое редактирование *Н.М. Вишняковой,*  
*Е.С. Решетниковой*

Подписано в печать 09.04 2021 г.  
Дата выхода в свет: 28.05 2021 г.  
Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 4,6.  
Тираж 500 экз. (1-й завод 1–47 экз.).  
Заказ 88. «С» 9.

Свободная цена

Адрес редакции и издателя:  
400062 г. Волгоград, просп. Университетский, 100.  
Волгоградский государственный университет.  
Тел.: (8442) 46-03-68, 46-55-99. Факс: (8442) 46-18-48  
E-mail: [vestnik10@volsu.ru](mailto:vestnik10@volsu.ru)  
Сайт журнала: <https://ti.jvolsu.com>  
Англояз. сайт журнала:  
<https://ti.jvolsu.com/index.php/en/>

Адрес типографии:  
400062 г. Волгоград, ул. Богданова, 32.  
Почтовый адрес:  
400062 г. Волгоград, просп. Университетский, 100.  
Издательство  
Волгоградского государственного университета.  
E-mail: [izvolgu@volsu.ru](mailto:izvolgu@volsu.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

*Запороцкова И.В.* Обращение главного редактора .... 5

### **ИННОВАЦИИ В ИНФОРМАТИКЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ И УПРАВЛЕНИИ**

*Бахрacheва Ю.С., Головачева Н.А.* Оценка эффективности применения комплексных инженерно-технических средств защиты объектов особой важности ..... 6

*Ермакова Н.Н., Водолазкина М.С., Гомазкова Л.К., Пасюк А.О., Арепьева Е.Е.* Влияние клиентских приложений на передачу мобильного трафика в сетях связи ..... 11

### **ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ**

*Борознина Е.В., Смирнов К.О., Акатьев В.В., Кудинова М.С.* Миграция протона по поверхности борных слоев ..... 19

*Кислова Т.В.* Исследование долговечности наномаркировки, нанесенной на стальные изделия с помощью сканирующего зондового микроскопа, под действием эксплуатационных факторов ..... 29

### **ИННОВАЦИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ И ХИМИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

*Васильев А.В., Агеев Е.С.* Исследование гидродинамики смазки в зазорах механизма газораспределения двигателя внутреннего сгорания ..... 34

### **ИННОВАЦИИ В БИОТЕХНОЛОГИЯХ**

*Сучков С.Г., Сучков Д.С., Сучкова С.М.* Определение параметров кровеносных сосудов по пульсовой волне ..... 40

## CONTENTS

*Zaporotskova I.V.* Editor's Foreword ..... 5

### **INNOVATIONS IN INFORMATICS, COMPUTING AND MANAGEMENT**

*Bakhracheva Yu.S., Golovacheva N.A.* Evaluation of the Effectiveness of the Use of Complex Engineering and Technical Means of Protection of Objects of Special Importance ..... 6

*Ermakova N.N., Vodolazkina M.S., Gomazkova L.K., Pasyuk A.O., Arepyeva E.E.* Impact of Client Applications on the Transmission of Mobile Traffic in Communication Networks ..... 11

### **INNOVATIONS IN METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE**

*Boroznina E.V., Smirnov K.O., Akatiev V.V., Kudinova M.S.* Proton Migration on the Boron Sheets Surface ..... 19

*Kislova T.V.* Investigation of the Durability of Nanomarkings Applied to Steel Products Using a Scanning Probe Microscope Under the Influence of Operational Factors ..... 29

### **INNOVATIONS IN ENERGY, METALLURGICAL AND CHEMICAL ENGINEERING**

*Vasilyev A.V., Ageev E.S.* Investigation of the Fluid Dynamics of Lubrication in the Gaps of the Gas Distribution Mechanism of the Internal Combustion Engine ..... 34

### **INNOVATIONS IN BIOTECHNOLOGY**

*Suchkov S.G., Suchkov D.S., Suchkova S.M.* Determination of Blood Vessel Parameters by Pulse Wave ..... 40

## ***Обращение главного редактора***

Дорогие друзья, авторы и читатели нашего журнала!

В настоящее время как никогда приоритетное внимание должно быть уделено активизации инновационной деятельности по воплощению результатов научно-технических разработок в производство, развитию инновационных предприятий, созданию новых технологических процессов и перестройке на современной научно-технической основе всех отраслей промышленности и сферы обслуживания.

Сегодня перед нашим журналом стоят амбициозные задачи, направленные на развитие современного знания и международного научного сотрудничества с использованием последних достижений в области нано-, био- и информационных технологий. Наш журнал открыт для интеллектуальных дискуссий и обмена мнениями по широкому кругу научных вопросов.

Выражаю коллективу редакции, редакционной коллегии, авторам первого номера в 2021 году искреннюю признательность за проявленный интерес и активное участие в развитии журнала. Приглашаю к еще более активному сотрудничеству всех коллег из регионов России, стран ближнего и дальнего зарубежья.

Желаю всем авторам и читателям журнала творческих успехов в научных исследованиях и новых свершений!

***И.В. Запороцкова,***  
*доктор физико-математических наук, профессор,*  
*директор института приоритетных технологий ВолГУ*



# ИННОВАЦИИ В ИНФОРМАТИКЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

---

---

DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2021.1.1>

УДК 004.9

ББК 32.971.35-53

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ОСОБОЙ ВАЖНОСТИ

**Юлия Сагидулловна Бахрачева**

Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности,  
Волгоградский государственный университет  
[bakhracheva@volsu.ru](mailto:bakhracheva@volsu.ru)  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Наталья Алексеевна Головачева**

Старший преподаватель кафедры информационной безопасности,  
Волгоградский государственный университет  
[infsec@volsu.ru](mailto:infsec@volsu.ru)  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье разработана формализованная модель оценки эффективности применения комплексных инженерно-технических средств защиты объектов особой важности. Созданы алгоритмы программного комплекса по оценке эффективности применения комплексных инженерно-технических средств защиты объектов особой важности. Проведены экспериментальные исследования для оценки эффективности применения комплексных инженерно-технических средств защиты объектов особой важности.

**Ключевые слова:** защита информации, объект особой важности, радиопоглощающие материалы, пассивные инженерно-технические средства защиты, активные инженерно-технические средства защиты, эффективность экранирования.

В современных условиях проблемы обеспечения безопасности (охраны) объектов (зданий, сооружений, комплексов) становятся актуальными и требуют новых подходов для их решения. Особого внимания требуют такие объекты как: объекты военного назначения, промышленные комплексы, транспортные комплексы, торгово-развлекательные комплексы, банки, объекты культурного и социального значения (спортивные, развлекательные и другие). Угрозы террористических актов на таких объектах могут привести к катастрофическим последствиям [3].

Для предотвращения угроз на объектах особой важности не мало важную роль играют пассивные инженерно-технические средства защиты информации [5; 7].

Целью работы является разработка программного комплекса по оценке эффективности применения комплексных инженерно-технических средств защиты объектов особой важности.

Формализованная модель оценки эффективности применения комплексных инженерно-технических средств защиты объектов особой важности выглядит следующим образом [1; 2; 4; 6]:

Существует вектор  $K = (K_1, K_2, K_3, K_4, K_5)$  – вектор критериев.

$K_1$  – эффективность экранирования принимает следующие значения:

$$K_1 = \begin{cases} 0, \text{низкая} \\ 0.5, \text{средняя} \\ 1, \text{высокая} \end{cases}$$

$K_2$  – радиопоглощение принимает следующие значения:

$$K_2 = \begin{cases} 0, \text{низкое} \\ 1, \text{высокое} \end{cases}$$

$K_3$  – диапазон рабочих температур принимает следующие значения:

$$K_3 = \begin{cases} 0, \text{узкий} \\ 0.5, \text{средний} \\ 1, \text{широкий} \end{cases}$$

$K_4$  – эксплуатация принимает следующие значения:

$$K_4 = \begin{cases} 0, \text{низкая} \\ 0.5, \text{средняя} \\ 1, \text{высокая} \end{cases}$$

Для оценки качества оценки пассивных инженерно-технических средств защиты информации вводится скалярная величина равная Эвклидову расстоянию между наилучшим вектором ( $K^*(1,1,1,1)$ ) и вектором критериев для  $i$ -го оцениваемого средства:  $K^i = (K_1^i, K_2^i, K_3^i, K_4^i)$

Эвклидово расстояние для  $i$ -го оцениваемого средства рассчитывается по формуле:

$$P^i = \sqrt{\sum_{j=1}^4 (k_j^* - k_j^i)^2} \quad (2)$$

Средство, для которого расстояние до наилучшего вектора окажется наименьшим, можно считать наиболее эффективным пассивным инженерно-техническим средством защиты информации.

Эффективность применения активных инженерно-технических средств защиты информации определяется отношением:

$$\mathcal{E}_a = C/Ш, \quad (3)$$

где  $C$  – сигнал,  $Ш$  – шум.

Сумма эффективностей применения активных и пассивных средств защиты информации будет определять наиболее применимый комплекс инженерно-технических средств защиты.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_a + \mathcal{E}_п, \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}_a$  – эффективность применения активных средств защиты;

где  $\mathcal{E}_п$  – эффективность применения пассивных средств защиты.

Обобщенный алгоритм программного комплекса оценки эффективности применения комплексных инженерно-технических средств защиты объектов особой важности может быть представлен в виде блок-схемы (см. рис. 1).

В составе блок-схемы алгоритма выделяются следующие функциональные блоки:

- 1) начало алгоритма;
- 2) ввод данных, а именно уровень сигнала;

3) модуль оценки пассивных инженерно-технических средств защиты объектов особой важности, который включает в себя расчет их эффективности применения;

4) модуль оценки активных инженерно-технических средств защиты объектов особой важности, который включает в себя расчет их эффективности применения;

5) расчет комплексной оценки, включает себя вычисление комплексной оценки применения инженерно технических средств защиты объектов особой важности;

6) конец алгоритма.

Было проведено 7 экспериментов оценки эффективности применения комплексных технических средств защиты объектов особой важности:

1. Пеностекло с углеродным наполнителем и Генератор шума ГШ-К-1000М.

2. Феррито-диэлектрический поглотитель электромагнитных волн и SEL-SP-21 «Баррикада».

3. Тканый радиопоглощающий материал и генератор шума «Тетра фаст».

4. Магнитный экран из лент аморфного металлического сплава и Bawler01.

5. Радиопоглощающие покрытие Феррилен-2 и bawler02 С.

6. Радиопоглощающие покрытие Феррилар-5 и Radioveil.

7. Защитная краска Тиколак-ЭМИ и SEL-SP-21B1 Баррикада.

Результат обобщенной оценки эффективности комплексных инженерно-технических средств защиты объектов особой важности показан на рисунке 2.

Наиболее эффективным для применения комплексным техническим средством защиты объектов особой важности является: Тканый радиопоглощающий материал и генератор шума «Тетра Фаст», преимуществом которого являются: широкий диапазон рабочих частот, высокая надежность, а также приемлемый диапазон рабочих температур защитного экрана.

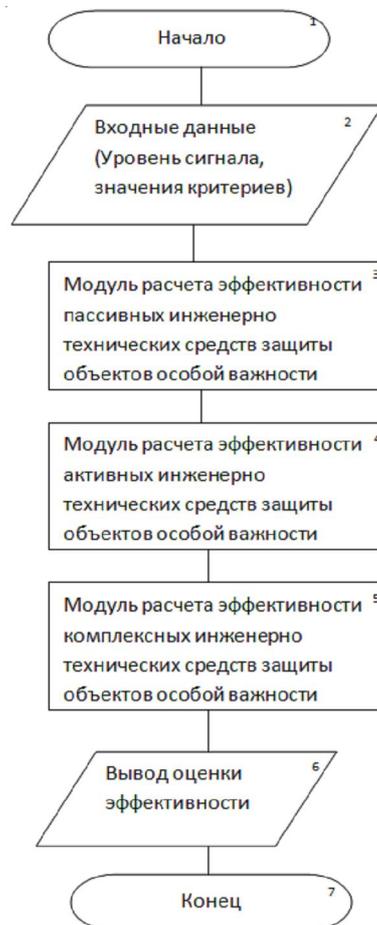


Рис. 1. Обобщенный алгоритм программного комплекса оценки эффективности применения комплексных инженерно технических средств защиты объектов особой важности

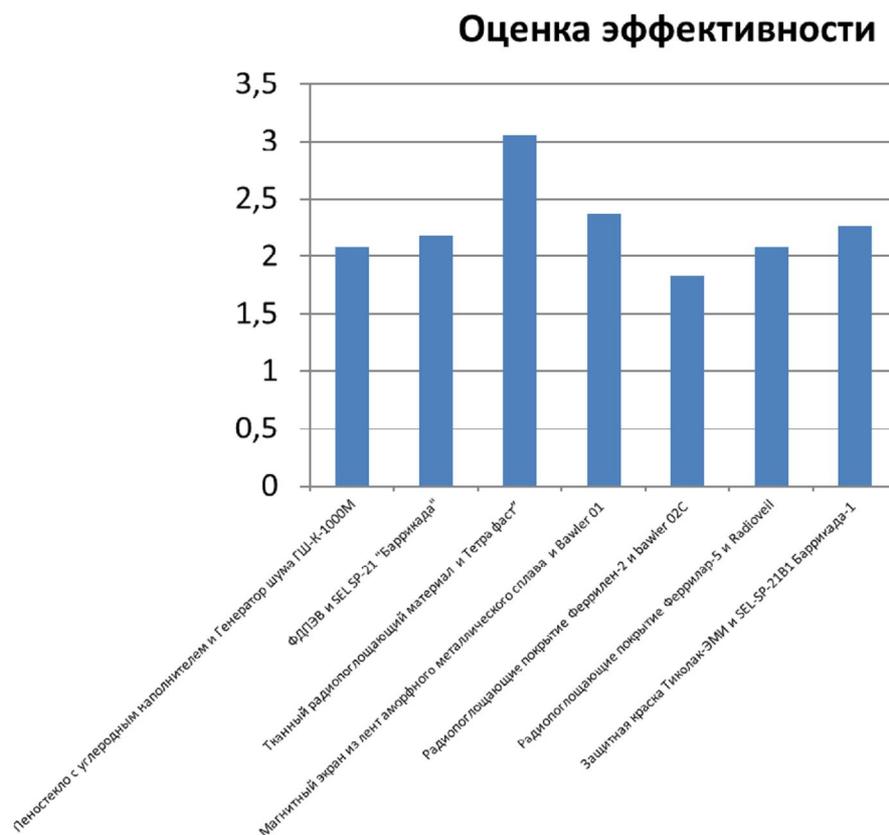


Рис. 2. Анализ результатов исследования

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоненко, М. Б. Влияние переменного электрического поля на проводимость однослойных углеродных нанотрубок полупроводникового типа / М. Б. Белоненко, С. Ю. Глазов, Н. Е. Мещерякова // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, вып. 9. – С. 1248–1253.

2. Elbakyan, L. S. The Polymers Filled Eith Carbon Nanotubes as New Materials in Stomatology / L. S. Elbakyan, I. V. Zaporotzkova, N. Polikarpova // European Polymer Congress. Book of Abstracts Pisa. – Pisa : [s. l.], 2013. – P. 30–31.

3. Improved Electrical Conductivity of Very Long Multi-Walled Carbon Nanotube Bundle/Poly (Methyl Methacrylate) Composites / J. S. Kim [et al.] // Carbon. – 2011. – Vol. 49. – P. 2127–2133.

4. Khokhlov, V. M. Wear Laws at Elastic Interaction / V. M. Khokhlov // Russia Engineering Research. – 1996. – Vol. 16. – P. 11–12.

5. Semaan, Ch. Influence of Wrapping on Some Properties of MWCNT-PMMA and MWCNT-PE Composites / Ch. Seeman, A. Soum // Polymer Bulletin. – 2013. – Vol. 70. – P. 1919–1936.

6. Semenova, L. M. Laws of Formation of Diffusion Layers and Solution of the Diffusion

Problem in Temperature-Cycle Carbonitriding of Steel / L. M. Semenova, Yu. S. Bakhracheva, S. V. Semenov // Metal Science and Heat Treatment. – 2013. – Vol. 55. – P. 34–37.

7. Zaporotzkova, I. V. About Adsorption of the Polyethylene Monomer Unit on the Single-Walled Corbon Nanotubes Surface / I. V. Zaporotzkova // European Polymer Congress. Book of Abstracts Pisa. – Pisa : [s. l.], 2013. – P. 3–6.

### REFERENCES

1. Belonenko M.B., Glazov S.Yu., Meshcheryakova N.E. Vlijanie peremennogo jelektricheskogo polja na provodimost' odnoslojnyh uglerodnyh nanotrubok poluprovodnikovogo tipa [Influence of an Alternating Electric Field on the Conductivity of Single-Wall Semiconductor Carbon Nanotubes]. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2010, vol. 44, pp. 1248-1253.

2. Elbakyan L.S., Zaporotzkova I.V., Polikarpova N. The Polymers Filled Eith Carbon Nanotubes as New Materials in Stomatology. *European Polymer Congress. Book of Abstracts Pisa*. Pisa, 2013, pp. 30-31.

3. Kim J.S. et al. Improved Electrical Conductivity of Very Long Multi-Walled Carbon Nanotube Bundle/Poly (Methyl Methacrylate) Composites. *Carbon*, 2011, vol. 49, pp. 2127-2133.

4. Khokhlov V.M. Wear Laws at Elastic Interaction. *Russia Engineering Research*, 1996, vol. 16, pp. 11-12.

5. Semaan Ch., Soum A. Influence of Wrapping on Some Properties of MWCNT-PMMA and MWCNT-PE Composites. *Polymer Bulletin*, 2013, vol. 70, pp. 1919-1936.

6. Semenova L.M., Bakhracheva Yu.S., Semenov S.V. Laws of Formation of Diffusion Layers and Solution of the Diffusion Problem in Temperature-Cycle Carbonitriding of Steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 55, pp. 34-37.

7. Zaporotskova I.V. About Adsorption of the Polyethylene Monomer Unit on the Single-Walled Carbon Nanotubes Surface. *European Polymer Congress. Book of Abstracts Pisa*. Pisa, 2013, pp. 3-6.

## **EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF COMPLEX ENGINEERING AND TECHNICAL MEANS OF PROTECTION OF OBJECTS OF SPECIAL IMPORTANCE**

**Yulia S. Bakhracheva**

Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Department of Information Security,  
Volgograd State University  
bakhracheva@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Natalia A. Golovacheva**

Senior Lecturer, Department of Information Security,  
Volgograd State University  
infsec@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The paper develops a formalized model for evaluating the effectiveness of the use of complex engineering and technical means of protecting objects of special importance. Algorithms of the software package for evaluating the effectiveness of the use of complex engineering and technical means of protection of objects of special importance have been developed. Experimental studies were conducted to assess the effectiveness of the use of complex engineering and technical means of protecting objects of special importance.

**Key words:** information protection, object of special importance, radio-absorbing materials, passive engineering and technical means of protection, active engineering and technical means of protection, shielding efficiency.



DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2021.1.2>

УДК 621.395

ББК 32.884.161

## **ВЛИЯНИЕ КЛИЕНТСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА ПЕРЕДАЧУ МОБИЛЬНОГО ТРАФИКА В СЕТЯХ СВЯЗИ**

**Надежда Николаевна Ермакова**

Ассистент кафедры телекоммуникационных систем,  
Волгоградский государственный университет  
ermakova.nadezhda@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Маргарита Сергеевна Водолазкина**

Ведущий инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий,  
Камышинский технологический институт – филиал  
Волгоградского государственного технического университета  
erp@kti.ru  
ул. Ленина, 6а, 403874 г. Камышин, Российская Федерация

**Людмила Константиновна Гомазкова**

Ассистент кафедры телекоммуникационных систем,  
Волгоградский государственный университет  
gomazkova.lk@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Алексей Олегович Пасюк**

Старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем,  
Волгоградский государственный университет  
rasyuk.aleksey@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Елена Евгеньевна Арепьева**

Кандидат экономических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем,  
Волгоградский государственный университет  
agereva.elena@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Вопрос эффективности передачи трафика через беспроводные сети связи в настоящее время вызывает немалый интерес с исследовательской точки зрения. Связано это с быстрым ростом ресурсов сети интернет, конвергенцией технологий передачи разнородного трафика, повышением мобильности абонентов сетей связи,

а также ростом числа различных клиентских приложений, использующих мобильную передачу данных. В данной работе исследовалось влияние роста клиентских приложений на передачу мобильного трафика.

**Ключевые слова:** мобильный трафик, клиентские приложения, сети связи, беспроводные сети, конфигурация сетей.

На сегодняшний день наблюдается бурное развитие сервисных услуг в сотовых сетях связи. Одним из наиболее развивающихся рынков в России является рынок мобильных приложений. Каждый день миллионы людей устанавливают (пользуются) на своих смартфонах мобильные приложения – это целая культура, развивающаяся в очень быстром темпе. По мнению компании J'son&Partners Consulting рынок приложений увеличится в течение четырех ближайших лет в восемь раз [1].

Исследование влияния роста клиентских приложений на передачу мобильного трафика является актуальной задачей. Понимание структуры трафика поможет разработчикам при проектировании сетевых технологий будущего, настройки параметров и выбора оптимальной конфигурации сетей [2–4].

В данной работе рассмотрены главные особенности передачи трафика в сетях подвижной связи для канального и транспортного уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем (модель OSI), учитывая специфические особенности стека TCP/IP.

Канальные ошибки и задержка существенным образом действуют на параметры передачи данных в системах подвижной связи. Задержка при доставке кадра канального уровня может быть разделена на такие составляющие как:

1. Время, за которое кадр находится в очереди передающего буфера перед тем, как он будет передан.

2. Время, в течение которого кадр находится в ожидании момента первоначального доступа к каналу с множественным доступом. Некоторую задержку перед передачей первого или очередного кадра в данном случае вносят ряд протоколов (например, механизм RTS/CTS в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11).

3. Задержки повторной передачи в системах со случайным множественным доступом происходит в беспроводных ЛВС за счет ме-

ханизмов MAC-уровня, которые могут значительно увеличивать задержку повторной передачи кадров, чтобы стабилизировать работу сети. Многие MAC-протоколы увеличивают задержку при росте числа неудачных передач.

4. Задержка передачи кадра, которая равна частному от деления размера кадра на скорость передачи.

5. Задержка распространения сигнала в физическом канале. Значение данного вида задержки сетей подвижной связи не отличается от такой же задержки для проводных каналов связи.

6. Время, за которое обрабатывается отдельный кадр, то есть производится помехоустойчивое кодирование, перемежение, диспетчеризация потоков с разным качеством обслуживания (Quality of Service – QoS), шифрование и другое.

7. Задержка, которая обусловлена процессом сборки пакета на приемной стороне.

Для систем подвижной связи характерно замирание сигнала, за счет его многолучевого распространения. Данный недостаток сетей сотовой связи является причиной возникновения высокого уровня канальных ошибок.

Такие атмосферные явления как гроза, дождь, и др. также вызывают ошибки при передаче сигнала в мобильных сетях связи. Прогнозирование параметров потока ошибок в связи с постоянным их изменением и перемещением абонентов становится мало выполнимым.

Канальный уровень, для того чтобы передать TCP-трафик, инкапсулирует свои кадры в IP-дейтаграммы, тем самым пытаясь исключить влияние нижних уровней (канального и физического) на более высокие уровни. К сожалению, возможностей канального уровня не всегда достаточно для эффективной передачи трафика, поэтому приходится использовать дополнительную защиту от ошибок, так как большинство пользовательских приложений чувствительно к данному виду ошибок.

При построении стека протоколов TCP/IP было предусмотрено осуществление управления потоком данных и исправление ошибок высокоуровневым транспортным протоколом. Данные меры сильно ухудшают параметры передачи пользовательского трафика при большом количестве канальных ошибок. У беспроводных сетей есть более эффективные функции борьбы с канальными ошибками. В сетях подвижной связи используется непрозрачный (nontransparent) режим передачи, предусматривающий специальные процедуры борьбы с канальными ошибками. Хотя данный режим – не единственный эффективный способ борьбы с канальными ошибками и потерями кадров, поскольку для разных приложений требуется разная степень безошибочности передачи данных. Помимо всего вышесказанного, транспортный протокол, благодаря своим методам защиты от ошибок, может производить повторную передачу задержанных или утерянных пакетов вместе с передачей этих пакетов канальным уровнем. Такая ситуация приводит к уменьшению пропускной способности за счет ее нерационального использования.

К основным случаям и причинам потери кадров канального уровня в процессе их передачи по радиопередающим линиям относятся:

– появление канальных ошибок. Они могут возникать из-за того, что некоторые сис-

темных параметров мобильной связи ухудшаются, к примеру энергетика радиопередачи;

– действия случайных, структурированных и периодических помех;

– случаи разрыва физической линии связи. Такой случай характерен для систем сотовой подвижной сетей в момент, когда мобильный терминал переходит из одной соты в другую.

В работе для анализа полученных данных использовалось программное средство Wireshark. Для исследования влияния роста клиентских приложений на передачу трафика мобильной сети на телефоне было установлено несколько клиентских приложений, активно использующих мобильную передачу данных. Trace-файлы записывались в анализаторе Shark, установленном на мобильном терминале.

С помощью сетевого анализатора Wireshark производился анализ полученных в trace-файле пакетов по протоколам TCP и UDP – количество и длина пакетов, интенсивность их поступления, задержка, а также джиттер задержки пакетов. Помимо статистических характеристик для полученных данных рассчитывался показатель Херста для определения степени самоподобия исследуемого трафика.

Практически все захваченные пакеты являются пакетами протокола TCP (99,99 %). Это не удивительно, так как протокол TCP гаранти-

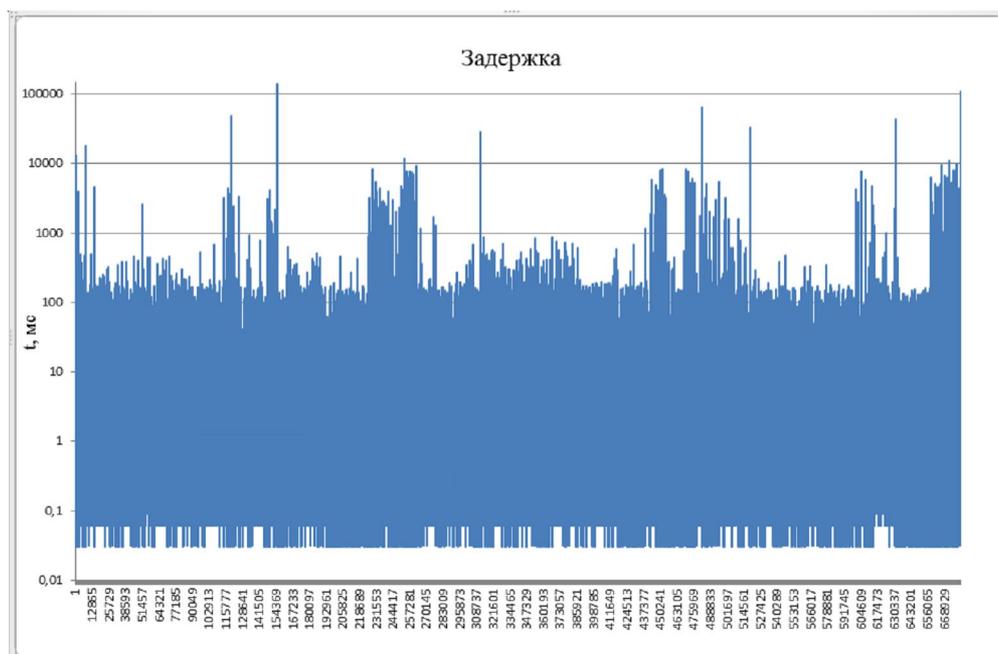


Рис. 1. Задержка пакетов одного trace-файла

рует целостность передаваемых данных и подтверждение отправителя о результатах передачи, в отличие от протокола UDP. Поэтому в работе рассматривались только пакеты TCP.

Для одного trace-файла рассчитаны задержка и джиттер. На рисунке 1 изображен график изменения задержки пакетов одной трассировки.

Среднее значение задержки составляет 11 мс, а максимальное значение задержки равно 138,8 с.

На рисунке 2 изображен график изменения джиттера задержки.

Среднее значение джиттера составляет 12 мс, а максимальное значение – 138,8 с.

Для определения значения показателя Херста в работе использовался алгоритм

R/S-анализа временных рядов. Исследуемый временной ряд получен с помощью программы Wireshark. Среднее значение составило 11 мс.

Определим величину  $\Delta_k$  отклонения от среднего значения. Результаты полученных расчетов представлены на рисунке 3 в столбце E1:E10.

Вычислили величину R – максимальный размах исследуемого ряда, которое составило 138,8 с. и определили среднеквадратичное отклонение, которое составило 0,28.

Результатом расчетов значение Херста  $H = 0,46$ .

Для полученного в результате исследования временного ряда построили гистограмму относительных частот и аппроксимируем ее теоретическим распределением.

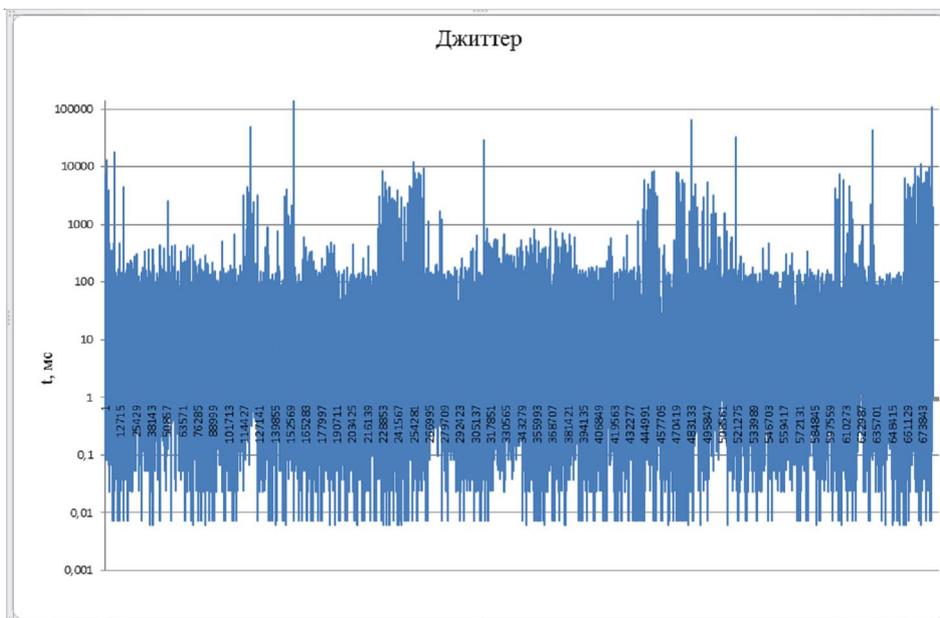


Рис. 2. Джиттер задержки пакетов одного trace-файла

Файл Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид										
H79 fx										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zi	Zcp.	Zmax	Zmin	$\Delta_k$					
2	0	0,011071	2,842529	0	0,000123					
3	0,00058				0,00011					
4	0,17694				0,027513					
5	0,000306				0,000116					
6	0,000091				0,000121					
7	0,0094				2,79E-06					
8	2,842529				8,017154					
9	1,98468				3,895132					
10	0,000153				0,000119					

Рис. 3. Отклонение от среднего значения (экранная копия)

Гистограмма распределения (красные линии) представлена на рисунке 4. График теоретического распределения изображен синей линией.

График эмпирической функции распределения представлен на рисунке 5.

Как видно из графиков, полученное в результате исследования распределение отно-

сится к показательному (экспоненциальному) распределению.

Сравнивая полученные результаты с предыдущими исследованиями, можно увидеть, что показатель Херста и в первом и во втором случаях находился в пределах от 0 до 0,5. При  $0 < H < 0,5$  временной ряд является устойчивым. Он более изменчив,

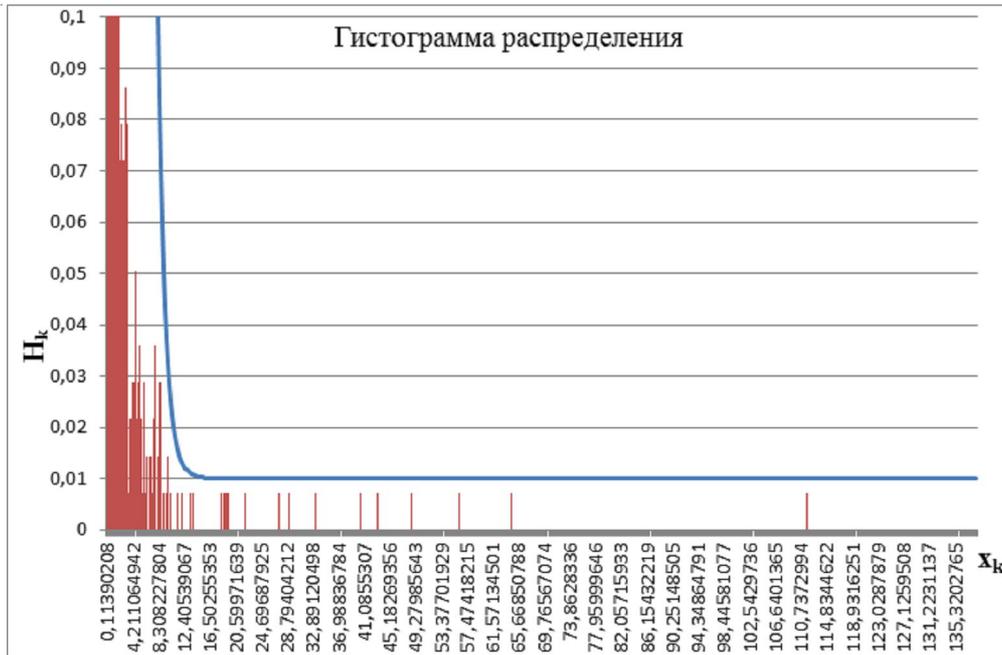


Рис. 4. Гистограмма относительных частот

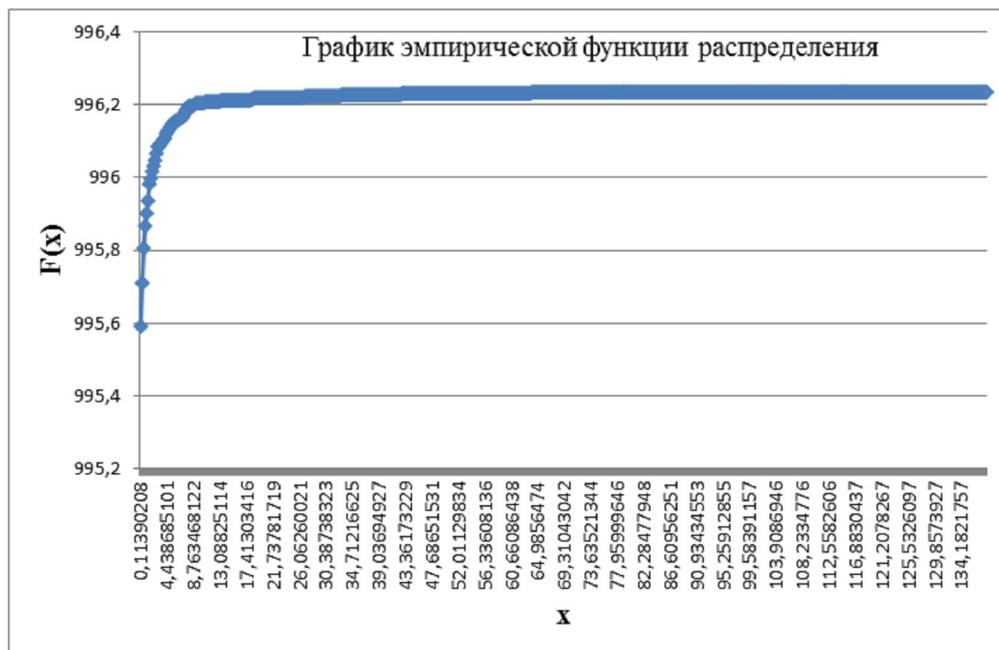


Рис. 5. График эмпирической функции распределения

чем случайный ряд, поскольку состоит из частых реверсов.

Задержка и джиттер в данном исследовании стали меньше, что составило 11 мс. Это говорит о том, что пакеты стали приходить чаще, так как из-за увеличения числа приложений активность пользователя мобильной сетью возросла.

Причины схожести полученных результатов исследования могут быть следующими:

1) программное обеспечение мобильного терминала работает таким образом, что при открытии нескольких приложений, те приложения, которые не используются в данный момент, перестают потреблять мобильный трафик;

2) увеличение количества клиентских приложений не влияет на передачу мобильного трафика.

Для того чтобы проверить первое утверждение использовали мобильный телефон в качестве модема, а открывали приложения и снимали трассировку – на компьютере, тем самым исключили влияние ПО мобильного терминала на работу клиентских приложений.

Задержка в данном случае будет выглядеть, как представлено на рисунке 6.

Среднее значение задержки составляет 7 мс, а максимальное значение задержки равно 4 с. Значение показателя  $H$  равно 0,37.

Полученные результаты говорят о том, что статистические характеристики трафика с увеличением клиентских приложений не изменяются.

Благодаря анализу мобильного трафика, учету самоподобных (фрактальных) свойств возможно воспроизвести трафик приложений с реально наблюдаемыми показателями QoS, что позволит оптимизировать входные параметры с целью обеспечения заданного QoS. В связи с этим исследования фрактальных свойств мобильного трафика являются актуальными.

Исследование показало, что трафик мобильного терминала является устойчивым. Он более изменчив, чем случайный ряд, поскольку состоит из частых реверсов, но не обладает долговременной памятью, так как показатель Херста колеблется в диапазоне от 0,3 до 0,5.

Распределение интервалов между поступлением TCP пакетов описывается экспонентой. А также распределение длин пакетов для TCP трафика показывает, что основная доля трафика переносится длинными пакетами (1300–2500 байт).

Неизменность статистических характеристик трафика при установлении нескольких клиентских приложений в сравнении с характеристиками, полученными в предыдущих

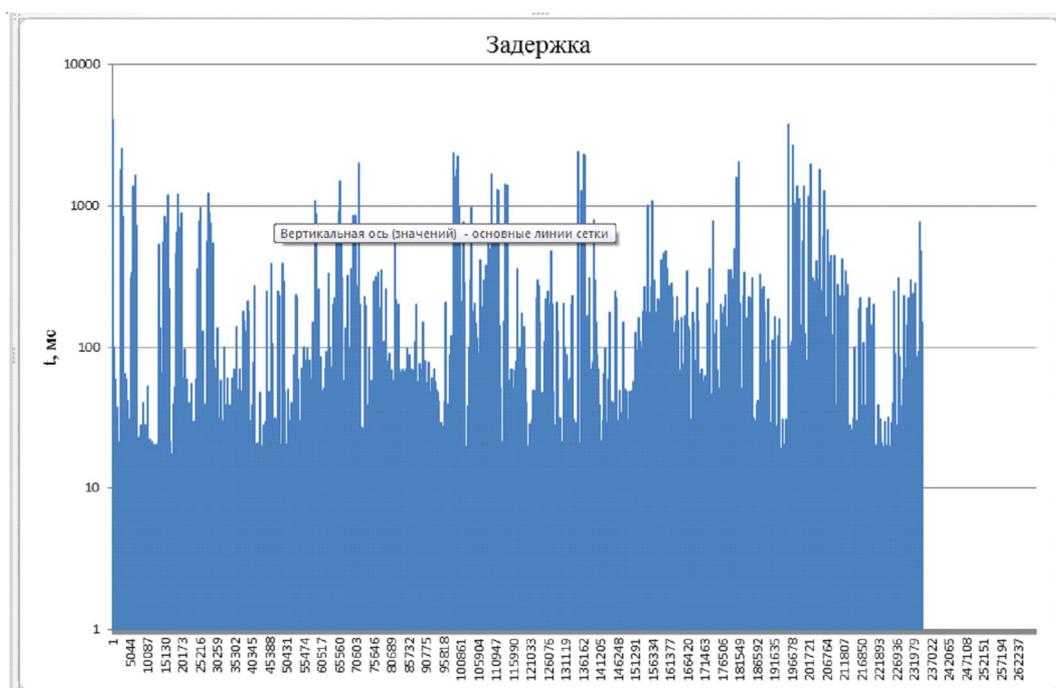


Рис. 6. Задержка пакетов

исследованиях (при небольшом количестве клиентских приложений), показывает на неизменность качества обслуживания. Следовательно, рост клиентских приложений не влияет на передачу мобильного трафика.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров, И. В. Анализ рынка мобильных приложений в России / И. В. Азаров, А. А. Струнина // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.
2. Диязитдинов, Р. Р. Системы связи с подвижными объектами : конспект лекций / Р. Р. Диязитдинов. – Самара : ПГУТИ, 2013. – 204 с.
3. Лагутенко, О. И. Проблемы передачи данных в сетях мобильной связи. Материалы сервера. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: [http://www.ccc.ru/magazine/depot/02\\_05/read.html?0302.htm](http://www.ccc.ru/magazine/depot/02_05/read.html?0302.htm) 7.07.2002г. – Загл. с экрана.
4. Поздняк, И. С. Исследование сетевого трафика на степень самоподобия : метод. указания к

лаборатор. работе / И. С. Поздняк, М. А. Буранова. – Самара : [б. и.], 2013. – 95 с.

### REFERENCES

1. Azarov I.V., Strunina A.A. Analiz rynka mobil'nyh prilozhenij v Rossii [Analysis of the Mobile App Market in Russia]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 6.
2. Diyazitdinov R.R. *Sistemy svyazi s podvizhnymi ob"ektami. Konspekt lekcij* [Communication Systems with Mobile Objects. Lecture Notes]. Samara, PGUTI, 2013. 204 p.
3. Lagutenko O.I. *Problemy peredachi dannyh v setyah mobil'noj svyazi. Materialy servera* [Problems of Data Transmission in Mobile Communication Networks]. URL: [http://www.ccc.ru/magazine/depot/02\\_05/read.html?0302.htm](http://www.ccc.ru/magazine/depot/02_05/read.html?0302.htm) 7.07.2002g.
4. Pozdnyak I.S., Buranova M.A. *Issledovanie setevogo trafika na stepen' samopodobiya. Metodicheskie ukazaniya k laboratornoj rabote* [Study of Network Traffic on the Degree of Self-Similarity. Guidelines for Laboratory Work]. Samara, 2013. 95 p.

## IMPACT OF CLIENT APPLICATIONS ON THE TRANSMISSION OF MOBILE TRAFFIC IN COMMUNICATION NETWORKS

**Nadezhda N. Ermakova**

Assistant Lecturer, Department of Telecommunications Systems,  
Volgograd State University  
[ermakova.nadezhda@volsu.ru](mailto:ermakova.nadezhda@volsu.ru)  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Margarita S. Vodolazkina**

Leading Engineer, Department of Power Supply of Industrial Enterprises,  
Kamyshinsky Technological Institute, Branch of Volgograd State Technical University  
[epp@kti.ru](mailto:epp@kti.ru)  
Lenina St, 6A, 403874 Kamyshin, Russian Federation

**Lyudmila K. Gomazkova**

Assistant Lecturer, Department of Telecommunications Systems,  
Volgograd State University  
[gomazkova.lk@volsu.ru](mailto:gomazkova.lk@volsu.ru)  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Alexey O. Pasyuk**

Senior Lecturer, Department of Telecommunications Systems,  
Volgograd State University  
pasyuk.aleksey@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Elena E. Arepyeva**

Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Department of Telecommunications Systems,  
Volgograd State University  
arepeva.elena@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The efficiency of traffic transmission through wireless communication networks is currently of considerable interest from a research point of view. This is due to the rapid growth of Internet resources, the convergence of technologies for transmitting heterogeneous traffic, the increased mobility of subscribers of communication networks, as well as the growth in the number of different client applications using mobile data transmission. In this paper, we investigate the impact of the growth of client applications on the transmission of mobile traffic. The study shows that the mobile terminal traffic is stable. It is more variable than a random series, because it consists of frequent reversals, but does not have long-term memory, since the Hurst index ranges from 0.3 to 0.5. The distribution of intervals between the arrival of TCP packets is described by the exponent. The distribution of packet lengths for TCP traffic shows that the bulk of the traffic is carried in long packets (1300–2500 bytes). The immutability of the statistical characteristics of traffic when installing several client applications in comparison with the characteristics obtained in previous studies (with a small number of client applications) indicates the immutability of the quality of service. Therefore, the growth of client applications does not affect the transmission of mobile traffic.

**Key words:** mobile traffic, client applications, communication networks, wireless networks, network configuration.



## ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

---

---

DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2021.1.3>

УДК 544.72

ББК 24.58

### МИГРАЦИЯ ПРОТОНА ПО ПОВЕРХНОСТИ БОРНЫХ СЛОЕВ

**Евгения Викторовна Борознина**

Кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
sefm@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Константин Олегович Смирнов**

Старший преподаватель кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
sefm@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Владимир Витальевич Акатьев**

Старший преподаватель кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
sefm@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Марина Сергеевна Кудинова**

Студент кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
sefm@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе мы изучили миграцию протонов по поверхности борных листов двух типов и нашли наиболее энергетически благоприятный путь движения протонов.

Определены электронно-энергетические характеристики процесса миграции одиночного протона по поверхности борных слоев двух типов и установлено, что во всех рассмотренных случаях протон способен перемещаться вдоль поверхности практически безбарьерно.

**Ключевые слова:** борофен, протонная проводимость, двумерные материалы, квантово-механические расчеты, физико-химические свойства.

Двумерные материалы вызывают большой интерес ученых благодаря их уникальным характеристикам, особенно электрофизическим свойствам. Наиболее известным материалом данного класса является графен [2], за исследования которого в 2010 г. была присуждена Нобелевская премия выходцу из России Андрею Гейму и его коллеге Константину Новоселову.

Борофен проявляет металлические свойства, в то же время бор, как объемный материал, является полупроводником. Благодаря тому, что борофен обладает металлическими свойствами и существует в виде пленок толщиной в один атом, он может найти широкое применение в электронике и фотовольтаике.

По словам ученых, борофен сильно отличается от других двумерных материалов, исследованных ранее. Он не встречается в природе, и задача его синтеза весьма сложна. До этого ученым удавалось получить бор в наномасштабе только в виде крошечных частиц.

Одна из ключевых особенностей борофена – сильная анизотропия – зависимость механических и электрических свойств от направления. Это явление не характерно для двумерных материалов и никогда ранее не наблюдалось в двумерных металлах. Кроме того, борофен имеет наибольший предел прочности из всех известных двумерных материалов.

Совсем недавно, в 2015 г. ученым удалось синтезировать борофен, благодаря компьютерному моделированию группы ученых из Университета Стоуни-Брук при участии российского кристаллографа Артема Оганова, работающего также в МФТИ [6].

Поэтому исследование физико-химических свойств данного нового материала в настоящее время весьма актуально.

### Построение и расчет борных наноструктур

При исследовании зарядового состояния атома водорода, адсорбирующегося на поверх-

ности борного слоя, был установлен факт переноса электронной плотности от атома Н на атом борного слоя, что привело к появлению протона Н<sup>+</sup> на поверхности В-слоя [1]. Поэтому можно предположить, что борные слои могут обладать протонной проводимостью.

Для исследования возможности существования протонной проводимости на поверхности борных двумерных структур, нами были рассмотрены борные слои двух типов: борный слой типа А и Б (см. рис. 1).

По типу проводимости рассматриваемые слои – металлы. Энергия связи В–В, смоделированных нами кластеров, была рассчитана по известной формуле:

$$E_{B-B} = \frac{E_{BS} - E_B * N}{N}, \quad (1)$$

где  $E_{B-B}$  – энергия связи,  $E_{BS}$  – энергия кластера борного слоя,  $E_B$  – энергия атома бора,  $N$  – количество атомов в кластере. Значения энергий связи для борных слоев представлены в таблице 1.

Таблица 1

#### Значения энергии связи борных слоев

Энергия связи	Слой типа А	Слой типа Б
$E_{B-B}$ (эВ)	-6,38	-5,21

Основные расчеты проводились методом DFT [3; 4; 5; 7] с использованием потенциала PBE. Количество атомов бора в первом слое составляло 97, а во втором – 36. Известно, что существует два варианта (механизма) миграции одиночного протона Н<sup>+</sup> вдоль поверхности борных слоев между двумя стационарными состояниями адсорбированной частицы:

1) так называемый «прыжковый» механизм, когда протон Н<sup>+</sup> движется от одного атома бора поверхности до другого над двумя следующими друг за другом гексагонами (рис. 2, путь I);  
2) «эстафетный» механизм, когда протон Н<sup>+</sup> перемещается от одного атома бора до другого вдоль соединяющей их связи (рис. 2, путь II).

В качестве примера на рисунке 2 представлены два механизма миграции протона для гексагонального борного слоя.

В нашем случае рассматривались структуры не чисто гексагональные, а смешанные, то есть в основе своей они имеют треугольную решетку, но с так называемыми гексагональными вкраплениями, иными словами представляют собой смесь треугольников и шестиугольников. Поэтому перемещаться протон может с использованием двух механизмов миграции одновременно. Вдоль треугольного пространства с использованием эстафетного механизма, а вдоль борного гексагона – возможны оба механизма.

### Миграция протона вдоль борного слоя А типа

При моделировании процесса миграции протона по поверхности, расстояния между протоном  $H^+$  и поверхностью борного слоя в начальном и конечном состояниях (над опорными атомами бора поверхности борного слоя) были выбраны равными  $1.1 \text{ \AA}$ . Это соответствует оптимальному для данного расчетного метода расстоянию адсорбции атомарного водорода на поверхности борного слоя для случая адсорбции над атомом бора. В качестве координаты реакции  $R$  выбиралось расстояние между протоном и точкой, соответствующей

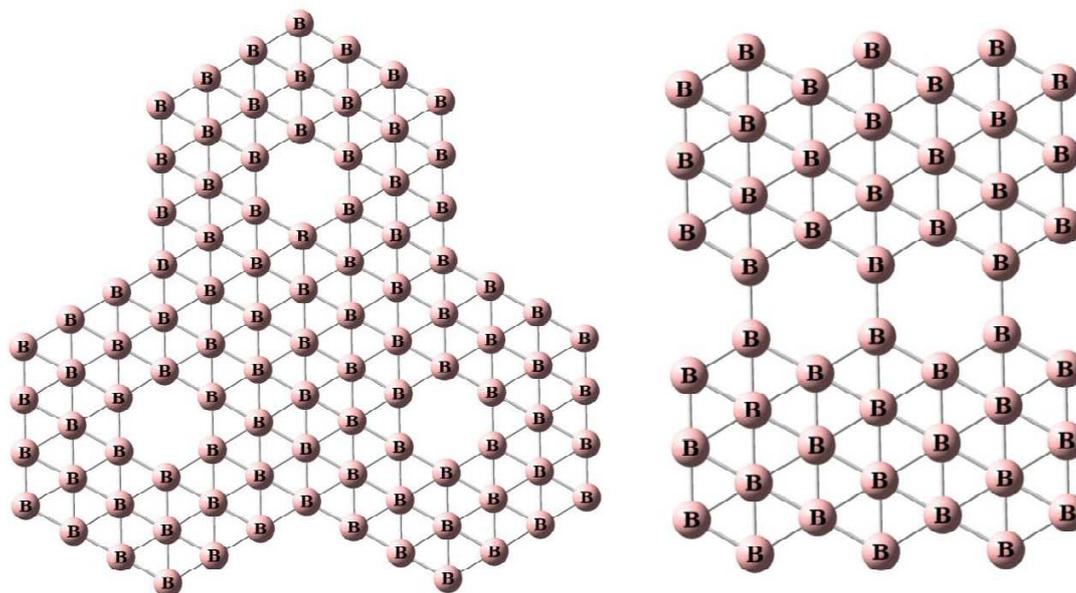


Рис. 1. Фрагмент расширенной элементарной ячейки борного слоя типа А (слева) и Б (справа)

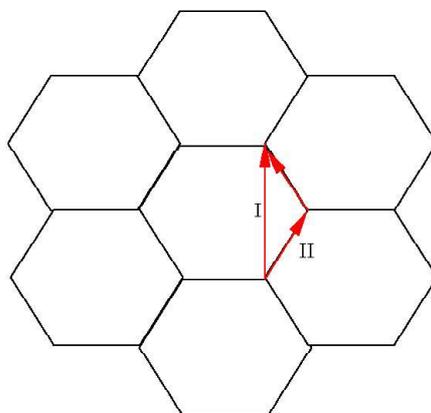


Рис. 2. Пути миграции протона по поверхности гексагонального борного слоя:

I – прыжковый механизм; II – эстафетный механизм

конечному стационарному состоянию частицы на поверхности борного слоя.

На рисунке 3 изображены два варианта рассматриваемых путей миграции протона по поверхности борного слоя типа А.

Ион  $H^+$  двигался к конечной точке миграции путем пошагового приближения с изменением координаты реакции на величину  $\Delta R = 0,1 \text{ \AA}$ .

При исследовании эстафетного механизма перемещения одиночного протона от одного атома бора до другого, мы рассматривали две химически неэквивалентные связи

$B-B$ , вдоль которых перемещался протон. В результате проведенных квантово-химических расчетов, нами были построены кривые потенциальных энергий процессов миграции протона (см. рис. 4, 5).

Энергетическая кривая перемещения протона по «прыжковому» механизму представлена на рисунке 6.

В итоге нами установлено, что во всех изученных случаях, протон, перемещаясь вдоль связей  $B-B$  («эстафетный» механизм) и даже в случае «перепрыгивания» двух соседних связей («прыжковый» механизм), не испытывает

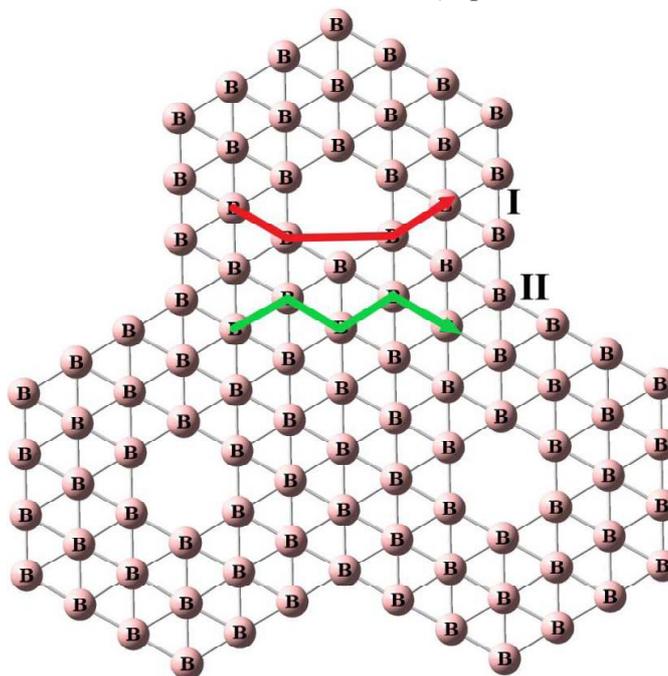


Рис. 3. Пути миграции протона по поверхности борного слоя типа А: путь I – с использованием прыжкового механизма; путь II – эстафетный механизм

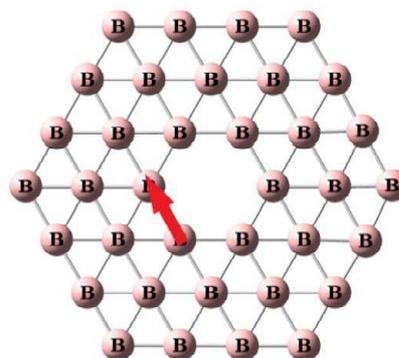
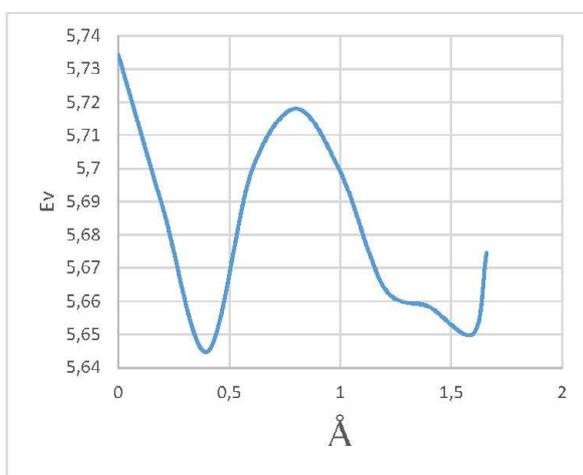


Рис. 4. Потенциальная энергия миграции протона по поверхности борного слоя типа А; путь II (протон двигался вдоль связи  $B-B$  вблизи незаполненного гексагона)

никаких затруднений в виде энергетических барьеров. С учетом погрешности метода перемещение протона происходит безбарьерно.

Были исследованы проводящие характеристики рассматриваемых структур. Получены одноэлектронные энергетические спектры борных слоев А типа содержащего на своей поверхности протон водорода и без него (см. рис. 7). На спектрах показаны положения потолка валентной зоны (2.0) и дна зоны проводимости (0.0).

Ширина запрещенной зоны борного слоя рассчитывалась по формуле 2:

$$\Delta E_g = E_C - E_V, \quad (2)$$

где  $E_C$  – энергия дна зоны проводимости,  $E_V$  – энергия потолка валентной зоны.

Значения  $\Delta E_g$  представлены в таблице 2. Однако, данные расчетов позволяют лишь качественно оценить изменение значения  $\Delta E_g$  в борном слое при модификации его одиночным протоном, так как борный слой был смоделирован по средствам молекулярного кластера, более ограниченного в размерах, чем реальные слои. Но тем не менее, можно увидеть, что присутствие протона ведет к уменьшению значения  $\Delta E_g$  и поднятию потолка и дна зоны проводимости относительно чистого борного слоя.

Таблица 2

**Значения ширины запрещенной зоны в борном слое типа А**

Энергия связи	Чистый слой	Слой с протоном
$\Delta E_g$ (эВ)	0,1	0,14

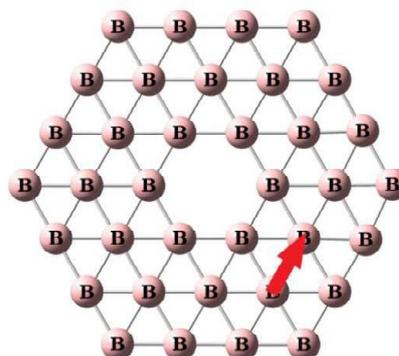
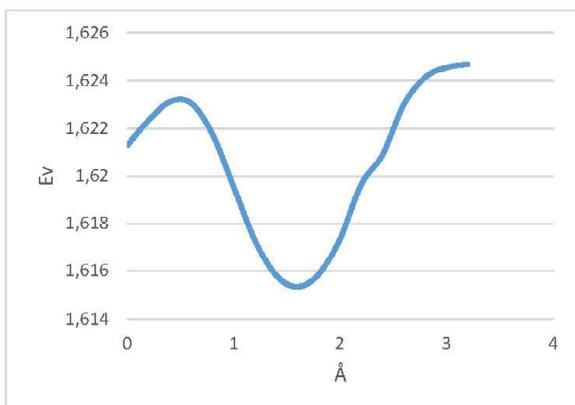


Рис. 5. Потенциальная энергия миграции протона по поверхности борного слоя типа А; путь II (протон двигался вдоль связи B–B)

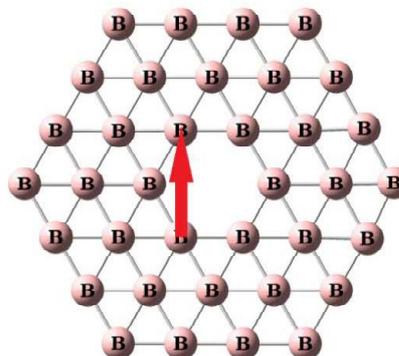
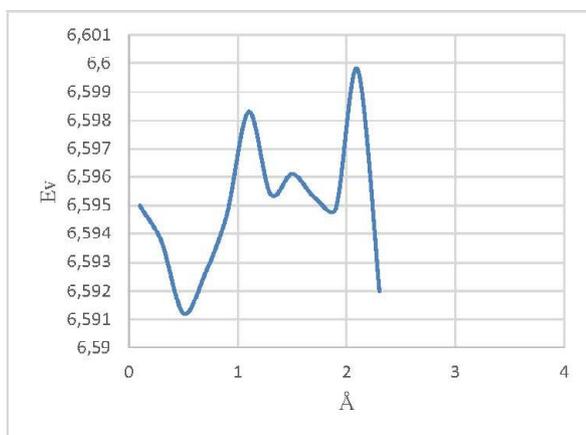


Рис. 6. Потенциальная энергия миграции протона по поверхности борного слоя типа А; путь I (протон двигался вдоль двух соседних связей B–B)

### Миграция протона по поверхности борного слоя Б типа

По аналогии с борным слоем А типа, нами была изучена возможность осуществления протонной проводимости другой структурной модификации двумерного бора, слоя Б типа. На рисунке 8 изображены варианты траекторий протона, с использованием двух механизмов миграции.

Анализ изменения потенциальной энергии системы в результате миграции протона по поверхности (см. рис. 9, 10), говорит о том, что, как и в случае слоя типа А, протон способен безбарьерно двигаться вдоль слоя. Изменение потенциальной энергии системы слишком мало  $\sim 0,1$  эВ.

Значения  $\Delta E_g$  представлены в таблице 3. Чистый борный слой типа Б и слой, содержащий на своей поверхности одиночный протон,

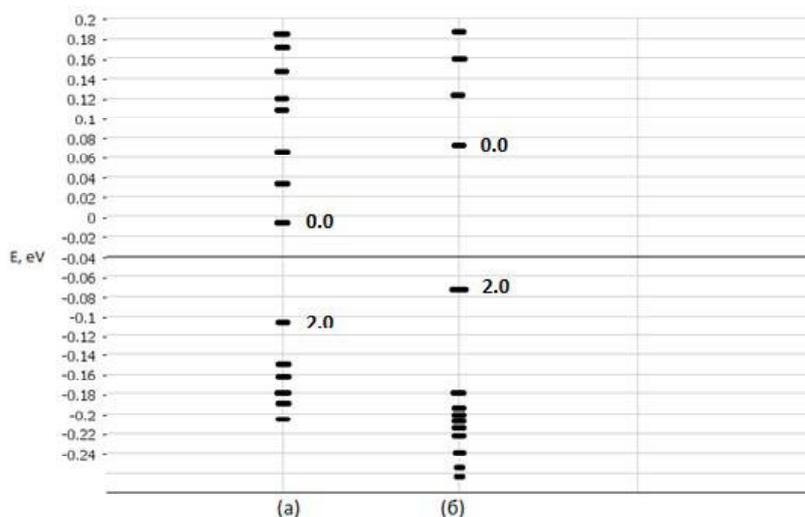


Рис. 7. Одноэлектронные энергетические спектры:  
а) борный слой типа А; б) борный слой типа А, содержащий протон

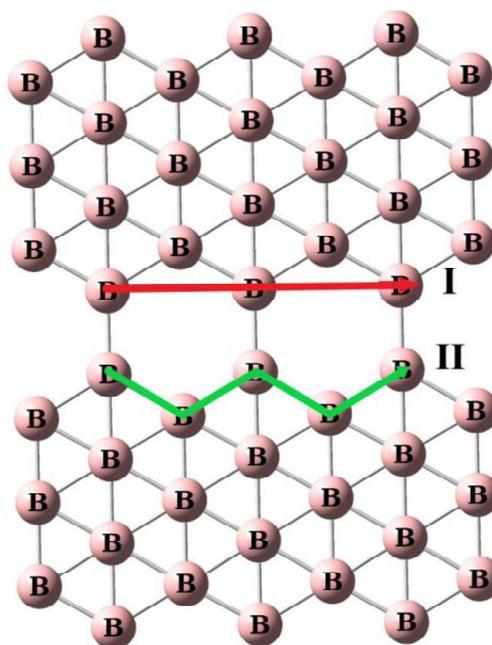


Рис. 8. Пути миграции протона по поверхности борного слоя типа Б:  
путь I – прыжковый механизм; путь II – эстафетный механизм

по характеру проводимости являются металлами,  $\Delta E_g = 0$ . Присутствие протона не меняет положение нижней вакантной и верхней заполненной орбиталей (дно зоны проводимости и потолок валентной зоны).

Таблица 3

### Значения ширины запрещенной зоны в борном слое типа Б

Энергия связи	Чистый слой	Слой с протоном
$\Delta E_g$ (эВ)	0,01	0,06

На рисунке 11 представлены одноэлектронные энергетические спектры для борных слоев Б типа с протоном и без него.

### Заключение

В данной работе в соответствии с поставленной целью была исследована возможность миграции протона по поверхности борных слоев двух типов. Получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. Определены электронно-энергетические характеристики процесса миграции одиночного протона по поверхности борных слоев двух типов и установлено, что во всех рассмотренных случаях протон способен перемещаться вдоль поверхности практически безбарьерно.

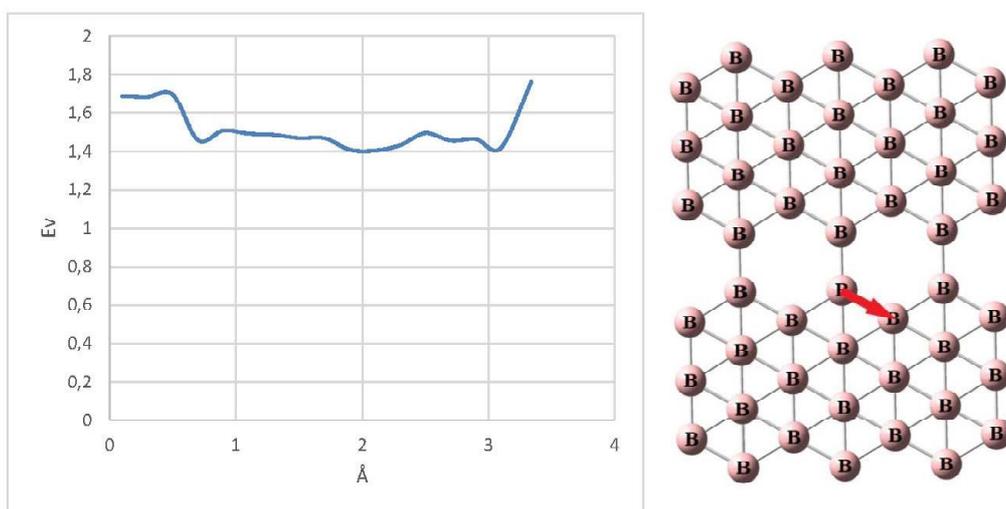


Рис. 9. Потенциальная энергия миграции протона по поверхности борного слоя типа Б; путь II (протон двигался вдоль связи B–B)

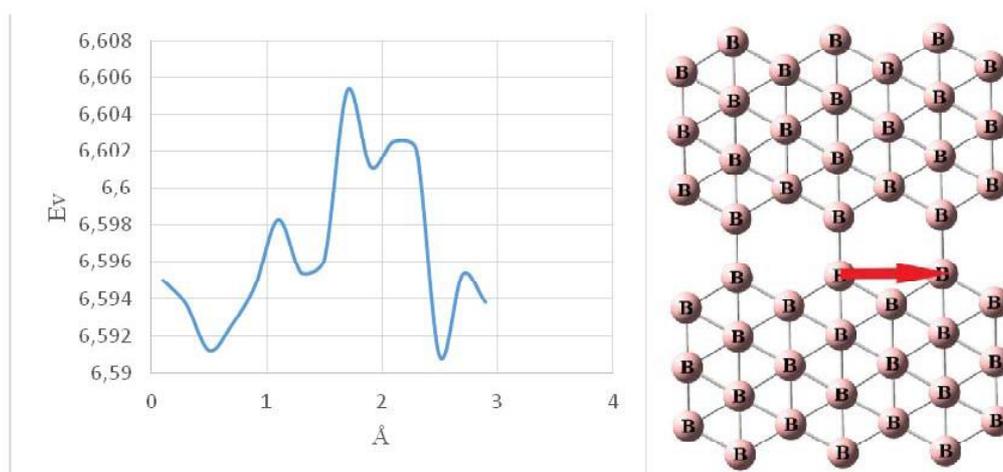


Рис. 10. Потенциальная энергия миграции протона по поверхности борного слоя типа Б; путь I (протон двигался вдоль двух соседних связей B–B)

2. Определен тип проводимости чистых борных слоев и слоев, модифицированных одиночным протоном. В борном слое А типа, протон способствует увеличению запрещенной зоны на 0,04 эВ, в слое Б типа запрещенная щель меняется на 0,05 эВ.

3. Доказано, что двумерные борные наноструктуры могут быть рассмотрены как новый класс топологической структуры бора, обладающий протонной проводимостью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Запороцкова, И. В. Об адсорбции молекулярного кислорода на внешней поверхности борной и боронитридной нанотрубок / И. В. Запороцкова, Е. В. Перевалова, С. В. Борознин // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10, Инновационная деятельность. – 2011. – № 5. – С. 18–24.

2. Самардак, А. Графен: новые методы получения и последние достижения / А. Самардак. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/430857](https://elementy.ru/novosti_nauki/430857). – Загл. с экрана.

3. Чижов, Ю. И. Молекулярная фотоэлектронная спектроскопия и расчеты методом теории функционала плотности р-комплексов хрома и железа / Ю. И. Чижов. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет, 2009. – 41 с.

4. Boroznina, E. V. The Adsorption of a Hydrogen Atom on the Two Types of Boron Sheets

Surface / E. V. Boroznina, N. N. Borkhoveva, S. V. Boroznin // Journal of Physics Conference Series. – 2014. – Vol. 586. – P. 012007.

5. Boustani, I. New Quasi-Planar Surfaces of Bare Boron / I. Boustani // Surface Science. – 1997. – Vol. 370, № 2–3. – P. 355–363.

6. Synthesis of Borophenes: Anisotropic, Two-Dimensional Boron Polymorphs / A. J. Mannix [et al.] // Science. – 2015. – Vol. 350. – P. 1513–1516.

7. Zhang, Z. Two-Dimensional Boron: Structures, Properties and Applications / Z. Zhang, E. S. Penev, B. I. Yakobson // Chemical Society Reviews. – 2017. – Vol. 46, № 22. – P. 6746–6763.

### REFERENCES

1. Zaporockova I.V., Perevalova E.V., Boroznin S.V. Ob adsorbicii molekulyarnogo kisloroda na vneshnej poverhnosti bornoj i boronitridnoj nanotrubok [On the Adsorption of Molecular Oxygen on the Outer Surface of Boron and Boronitride Nanotubes]. *Science Journal of Volgograd State University. Technology and innovations*, 2011, no. 5, pp. 18-24.

2. Samaradak A. *Grafen: novye metody polucheniya i poslednie dostizheniya* [Graphene: New Methods of Production and Recent Achievements]. URL: [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/430857](https://elementy.ru/novosti_nauki/430857).

3. Chizhov Yu.I., *Molekulyarnaya fotoelektronnaya spektroskopiya i raschety metodom teorii funkcionala plotnosti p-kompleksov hroma i zheleza* [Molecular Photoelectron Spectroscopy and Calculations by the Density Functional Theory of

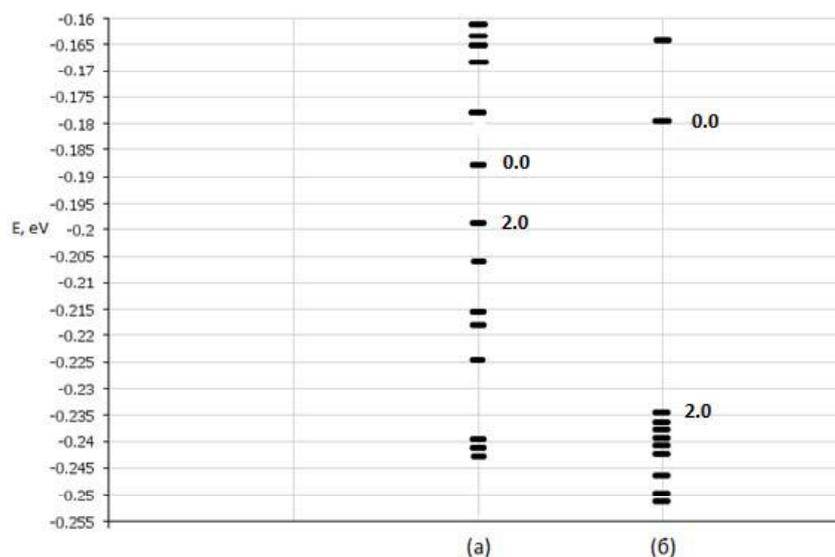


Рис. 11. Одноэлектронные энергетические спектры:  
а) борный слой типа Б; б) борный слой типа Б, содержащий протон

Chromium-Iron p-complexes]. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet, 2009. 41 p.

4. Boroznina E.V., Borkhoveva N.N., Boroznin S.V. The Adsorption of a Hydrogen Atom on the Two Types of Boron Sheets Surface. *Journal of Physics Conference Series*, 2014, vol. 586, p. 012007.

5. Boustani I. New Quasi-Planar Surfaces of Bare Boron. *Surface Science*, 1997, vol. 370, no. 2–3, pp. 355-363.

6. Mannix A.J., Zhou X.-F., Kiraly B., Wood J.D., Alducin D., Myers B.D., Liu X., Fisher B.L., Santiago U., Guest J.R. Synthesis of Borophenes: Anisotropic, Two-Dimensional Boron Polymorphs. *Science*, 2015, vol. 350, pp. 1513-1516.

7. Zhang Z., Penev E.S., Yakobson B.I. Two-Dimensional Boron: Structures, Properties and Applications. *Chemical Society Reviews*, 2017, vol. 46, no. 22, pp. 6746-6763.

## PROTON MIGRATION ON THE BORON SHEETS SURFACE

**Evgeniya V. Boroznina**

Associate Professor, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics),  
Department of Forensic Science and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
sefm@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Konstantin O. Smirnov**

Senior Lecturer, Department of Forensic Science and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
sefm@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Vladimir V. Akatiev**

Senior Lecturer, Department of Forensic Science and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
sefm@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Marina S. Kudinova**

Student, Department of Forensic Science and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
sefm@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** Borophene is a two-dimensional allotrope of boron and it is also known as boron sheet. First it has been predicted theoretically in the mid-1990s, experimentally borophene was confirmed in 2015 when the structure was successfully synthesized in 2015. One of the key features of borophene is its strong anisotropy – the dependence of mechanical and electrical properties on direction. This phenomenon is not typical for 2D materials and has never been observed in 2D metals before. Borophene has the highest tensile strength of all known two-dimensional materials. In early works, it was found that the adsorption of a hydrogen atom on the surface of borophene is possible and the analyses of electronic density showed that atom H became a proton. Therefore, in this work, the authors have studied the proton migration over the surface of boron sheets of two types and have found the most energetically favorable

path of proton motion. The electron-energy characteristics of the process of migration of a single proton along the surface of boron layers of two types are determined and it is established that in all the considered cases the proton is able to move along the surface almost barrier-free. The type of conductivity of pure boron layers and layers modified by a single proton is determined. In the A-type boron layer, the proton increases the band gap by 0.04 eV, and in the B-type layer, the band gap changes by 0.05 eV. It is proved that two-dimensional boron nanostructures can be considered as a new class of boron topological structure with proton conductivity.

**Key words:** borophene, proton conductivity, two-dimensional materials, quantum mechanical calculations, physical and chemical properties.



DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2021.1.4>

УДК 544

ББК 24.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НАНОМАРКИРОВКИ, НАНЕСЕННОЙ НА СТАЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

Татьяна Викторовна Кислова

Старший преподаватель кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
sefm@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе проведены исследования воздействия эксплуатационных факторов на динамику изменения параметров наномаркировки, нанесенной на стальные детали с использованием новой инновационной технологии – сканирующей зондовой микроскопии, обеспечивающей стопроцентную верификацию предметов и объектов.

**Ключевые слова:** защитная наномаркировка, долговечность, сталь, сканирующий зондовый микроскоп, динамическая литография.

Криминогенная обстановка в России на сегодняшний день характеризуется высоким уровнем преступности. Об этом свидетельствуют официальные данные Федеральной Службы Государственной Статистики и МВД России. Только в январе 2020 года совершено 496 преступлений, связанных с использованием оружия [4]. Одна из проблем, с которой сталкиваются правоохранительные органы при расследовании преступлений – это установление подлинности или верификация предметов, обнаруженных в ходе оперативно-следственных действий. Для повышения вероятности верификации предметов необходим ряд превентивных мер.

В качестве такой превентивной меры может выступать защитная маркировка предметов, представляющих повышенный интерес со стороны криминальных структур. Нанесение маркирующих знаков может быть использовано для защиты прав собственности, защиты от контрафактной продукции, а также

различными силовыми ведомствами для маркирования оружия [8]. Защитные свойства маркировки повышаются в том случае, если она является латентной, то есть не воспринимается визуально, в том числе с помощью доступных увеличительных приборов.

Скрытность нанесенной маркировки обеспечивается размерами нанометрового уровня, которые находятся в пределах 10–100 нм.

Считывание информации с целью обнаружения и последующей подделки такой маркировки невозможно с помощью известных оптических приборов. Нанесение и выявление ее изображения может быть воспроизведено только с использованием новой инновационной технологии – сканирующей зондовой микроскопии в литографическом режиме по специально разработанным методикам [1; 6; 7].

Проведенными ранее исследованиями установлено, что четкость, долговечность и износоустойчивость наномаркировки зависят от твердости, жесткости и пластичности ма-

териала изделия, подвергаемого маркированию [3]. Важнейшее требование, предъявляемое к наномаркировке – сохранять устойчивость к воздействию различных факторов, определяемых режимами эксплуатации изделия.

Поверхность стальных деталей изнашивается под действием многих факторов, зависящих от конкретных условий эксплуатации изделия. Можно выделить три основные группы факторов, определяющих вид и интенсивность износа: конструктивные, технологические и эксплуатационные. Эксплуатационными факторами являются: соблюдение режима эксплуатации и технического обслуживания изделия; марка и качество используемых для смазки материалов; соблюдение технологии чистки и смазки деталей.

Под воздействием внешней окружающей среды (атмосферы) на поверхности стальных деталей протекают химические и электрохимические процессы. Входящие в состав атмосферы кислород, азот, углекислый газ, пары воды и различные примеси, окисляют металл и приводят к коррозионному разрушению. Существует много различных способов защиты металлов от коррозии.

В данной работе исследованиям подвергались детали огнестрельного оружия, так как оружие относится к числу распространенных объектов криминалистического исследования. Для предохранения металлических деталей оружия от коррозии и износа необходимо принимать меры для исключения испарения влаги на поверхности металлических частей оружия, защищать его различными покрытиями, смазками и периодически, особенно после стрельбы, тщательно чистить. Для обеспечения безотказной работы механизмов огнестрельного оружия применяют механическую чистку и смазку оружейным маслом [10].

Наномаркировка, нанесенная на металлическую деталь оружия, также подвергается, одновременно с оружием, естественным, абразивным и химическим воздействиям во время чистки и смазки.

Поэтому актуальным является исследование долговечности наномаркировки под воздействием факторов, характерных для рабочих условий эксплуатации изделия.

В работе проведены исследования наномаркировки, нанесенной по подобранным па-

раметрам и заданному графическому изображению – шаблону, на стальную легированную деталь оружия (спусковая тяга), на заранее подготовленную поверхность, в области предварительно созданной координатной сетки (реперных точек) [6].

Для нанесения и выявления защитных маркирующих знаков нанометрового уровня используется сканирующий зондовый микроскоп в режиме динамической силовой литографии растровым способом. При осуществлении нанесения наномаркировки давление кончика вольфрамового зонда вызывает локальную необратимую механическую деформацию поверхности и изменение рельефа твердого тела. В результате на поверхности появляется канавка с характерным сечением и глубиной, определяемыми формой зонда и твердостью материала (см. рис. 1). При этом происходит извлечение материала из канавки в виде борозд (отвала) вдоль нее, что является признаком отражаемого объекта (зонда сканирующего микроскопа). Первое выявление наномаркировки произведено сразу после ее нанесения (см. рис. 1а). Глубина канавки наномаркировки определялась анализом сечения по z-координате (см. рис. 1б).

Деталь после нанесения наномаркировки подвергалась химическим и механическим воздействиям, в соответствии с известными применяемыми схемами чистки оружия к конкретной детали – спусковой тяги огнестрельного оружия. Испытания проводили по схеме с использованием химических реагентов: спирт ректификат – масло оружейное нейтральное – растворитель – масло оружейное щелочное – растворитель, с временными промежутками между обработками от 1 до 3 месяцев. Общее время испытания составило 42 месяца. Механическое воздействие на изделие осуществляли путем протирки хлопковой ветошью ручным способом после каждой обработки детали каким-либо из перечисленных выше химических веществ. После чистки и смазки детали масло остается в канавках наномаркировки и со временем загустевает. Для удаления остатков масла использовали растворитель уайт-спирит и спирт технической ректификованный.

Выявление наномаркировки с одновременным измерением ее глубины проводили

после каждого химического и механического воздействия в течении всего срока испытаний.

Результаты измерения глубины приведены в таблице.

В процессе выполнения данной работы были получены следующие результаты. Наномаркировка, нанесенная на деталь, была выявлена во всех случаях воздействия на нее. Глубина линии (канавки) при нанесении соста-

вила около 380 нм. Вдоль канавок присутствовали борозды извлеченного металла с максимальной высотой относительно поверхности детали 315 нм.

Исследование геометрии и размера глубины линий наномаркировки после воздействия оружейным маслом показало уменьшение их величины (рис. 2а). После обработки щелочным маслом часть маркировки

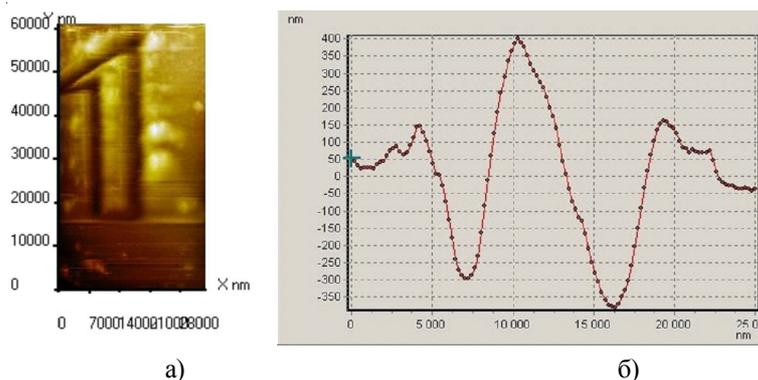


Рис. 1. Наномаркировка (цифра «1») после нанесения на деталь:  
а) СЗМ-изображение; б) график, отображающий глубину линий

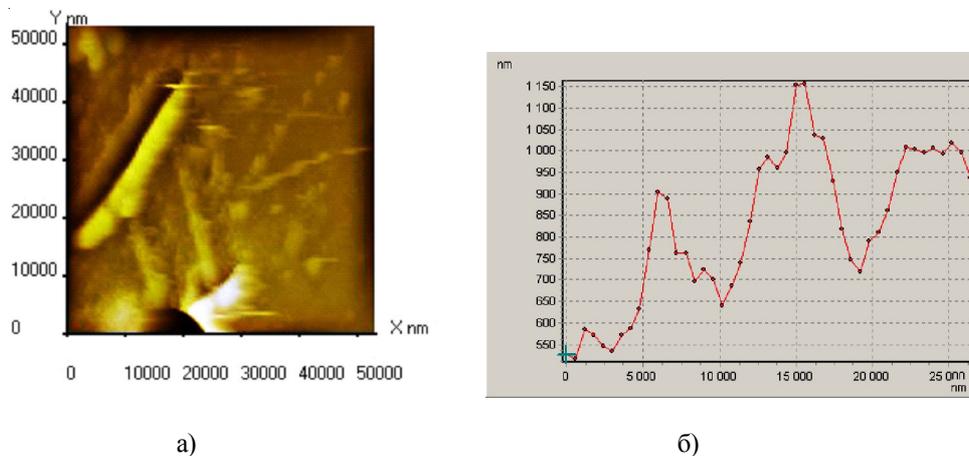


Рис. 2. Наномаркировка (цифра «1») спустя 42 месяца:  
а) СЗМ-изображение; б) график, отображающий глубину линий

### Глубина наномаркировки в зависимости от химического воздействия различных материалов

Последовательность воздействия	Материалы, применяемые для воздействия	Глубина канавки, нм	Высота борозды вдоль канавки, нм
1	Спирт	311–378	270–304
2	Масло нейтральное	72–135	254–303
3	Растворитель	102–167	266–297
4	Масло щелочное	39–91	215–253
5	Растворитель	84–163	237–298

не выявлена, но выявлены борозды извлеченного материала детали по контуру линий нанесенной наномаркировки, что подтверждает присутствие наномаркировки (см. рис. 2б). Размер борозд, образовавшихся вдоль линий нанесенной наномаркировки, за время испытаний практически не изменился во всех случаях химического и механического воздействия. Отсутствие канавок объясняется тем, что загустевшее масло в этих местах заполнило канавку по всей глубине наномаркировки. После обработки детали каким-либо растворителем размер глубины канавки наномаркировки увеличился и составил 84–163 нм. То есть ацетон, спирт, уайт-спирит растворяют оружейное масло, в результате чего наномаркировка снова выявляется.

Данные результаты испытаний показывают на длительный срок жизни наномаркировки, нанесенной на стальную поверхность, ее стойкость к агрессивным и абразивным воздействиям во время эксплуатации. Выполненные исследования доказали возможность применения наномаркировки, обладающей высокой степенью латентности, на стальных деталях огнестрельного оружия. Нанесение защитной наномаркировки в сочетании с другими видами маркировки обеспечит дополнительную защиту изделий от подделки. В случае же контроля над оборотом огнестрельного оружия, при оперативно-розыскных мероприятиях, в ходе криминалистических исследований, защитная наномаркировка позволит эффективно решать диагностические и идентификационные задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возможность применения зондовых нанотехнологий для нанесения защитных маркировок / И. В. Запороцкова [и др.] // Вестник криминалистики. – 2009. – № 2. – С. 41–48.
2. Горячева, Н. Ю. Маркировка и криминалистическое кодирование огнестрельного оружия / Н. Ю. Горячева // Вестник Уфимского юридического института МВД России. – 2016. – № 4. – С. 52–56.
3. Кислова, Т. В. Исследование возможности нанесения наномаркировки на стальные поверхности с помощью сканирующего зондового микроскопа / Т. В. Кислова // НБИ технологии. – 2019. –

Т. 13, № 4. – С. 44–49. – DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2019.4.6>.

4. Краткая характеристика состояния преступности в Российской Федерации за январь 2020 года. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <https://xn--b1aew.xn--p1ai/reports/item/19655871>. – Загл. с экрана.

5. Кудинова, Н. С. Конструктивно-технологические свойства промышленных установок как объекты трасологической экспертизы / Н. С. Кудинова, А. Г. Сухарев // Судебная экспертиза : межвуз. сб. науч. ст. / под ред. А. В. Стальмахова. – Саратов : [б. и.], 2003. – Вып. 2. – С. 56–65.

6. Патент № 2365989 Российская Федерация МПК G06K 1/00 (2006.01), B82B 1/00 (2006.01). Способ нанесения наномаркировок на изделия : № 2008110538 ; заявл. 21.03.2008 ; опубл. 27.08.2009 / Запороцкова И. В., Кислова Т. В. – 12 с.

7. Применение сканирующей зондовой микроскопии для создания защитных наномаркировок / И. В. Запороцкова [и др.] // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. – 2008. – № 3. – С. 81–87.

8. Федеральный закон от 13.12.1996 № 150-ФЗ «Об оружии» (принят ГД ФС РФ 13.11.1996) (ред. от 29.12.2015) // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

9. Цуканов, А. С. Возможности совершенствования государственной системы контроля оборота гражданского и служебного огнестрельного гладкоствольного оружия / А. С. Цуканов // Вестник Московского университета МВД России. – 2017. – № 1. – С. 109–112.

10. Эксплуатация стрелкового оружия : учеб. пособие / К. С. Фокин [и др.] ; под общ. ред. И. В. Фролова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 88 с.

#### REFERENCES

1. Zaporockova I.V., Kislova T.V., Goremykina Yu.Yu., Suharev A.G. *Vozmozhnost' primeneniya zondovykh nanotekhnologij dlya naneseniya zashchitnykh markirovok* [The Possibility of Using Probe Nanotechnology for Applying Protective Markings]. *Vestnik kriminalistiki*, 2009, no. 2, pp. 41–48.
2. Goryacheva N.Yu. *Markirovka i kriminalisticheskoe kodirovanie ognestrel'nogo oruzhiya* [Marking and Forensic Coding of Firearms]. *Vestnik Ufimskogo yuridicheskogo instituta MVD Rossii*, 2016, no. 4, pp. 52–56.
3. Kislova T.V. *Issledovanie vozmozhnosti naneseniya nanomarkirovki na stal'nye poverhnosti s pomoshch'yu skaniruyushchego zondovogo mikroskopa* [Investigation of the Possibility of Applying Nanomarkings on Steel Surfaces Using a Scanning Probe Microscope]. *NBI Technologies*, 2019,

vol. 13, no. 4, pp. 44-49. DOI: <https://doi.org/10.15688/NBITjvolsu.2019.4.6>.

4. *Kratkaya karakteristika sostoyaniya prestupnosti v Rossijskoj Federacii za yanvar' 2020 goda* [Brief Description of the State of Crime in the Russian Federation for January 2020]. URL: <https://xn--b1aew.xn--p1ai/reports/item/19655871>.

5. Kudinova N.S., Suharev A.G. Konstruktivno-tekhnologicheskie svoystva promyshlennykh ustanovok kak ob'ekty trasologicheskoy ekspertizy [Structural and Technological Properties of Industrial Installations as Objects of Tracological Expertise]. *Sudebnaya ekspertiza : mezhvuz. sb. nauch. st.* Saratov, 2003, iss. 2, pp. 56-65.

6. Zaporockova I.V., Kislova T.V. *Patent No. 2365989 Russian Federation MIIK G06K 1/00 (2006.01), B82B 1/00 (2006.01). Sposob nanoseniya nanomarkirovok na izdeliya: zayavl. 21.03.2008 ; opubl. 27.08.2009* [Method of Applying Nanomarkings to Products]. 12 p.

7. Zaporockova I.V., Kislova T.V., Goremykina Yu.Yu., Suharev A.G. Primenenie skani-

ruyushchej zondovoj mikroskopii dlya sozdaniya zashchitnykh nanomarkirovok [The Use of Scanning Probe Microscopy to Create Protective Nanomarkings]. *Science Journal of Volgograd State University. Technology and innovations*, 2008, no. 3, pp. 81-87.

8. Federal'nyj zakon ot 13.12.1996 № 150-FZ «Ob oruzhii» (prinyat GD FS RF 13.11.1996) (red. ot 29.12.2015) [Federal Law No. 150-FZ of December 13, 1996 "On Weapons"]. *Access from Reference Legal System "KonsultantPlyus"*.

9. Cukanov A.S. Vozmozhnosti sovershenstvovaniya gosudarstvennoj sistemy kontrolya oborota grazhdanskogo i sluzhebnogo ognestrel'nogo gladkostvol'nogo oruzhiya [Opportunities for Improving the State System for Controlling the Turnover of Civil and Service Smoothbore Firearms]. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii*, 2017, no. 1, pp. 109-112.

10. Fokin K.S. et al. *Ekspluatatsiya strelkovogo oruzhiya: ucheb. posobie* [Operation of Small Arms]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta, 2018, 88 p.

## INVESTIGATION OF THE DURABILITY OF NANOMARKINGS APPLIED TO STEEL PRODUCTS USING A SCANNING PROBE MICROSCOPE UNDER THE INFLUENCE OF OPERATIONAL FACTORS

Tatyana V. Kislova

Senior Lecturer, Department of Forensic Science and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
sefm@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The criminogenic situation in Russia today is characterized by a high level of crime. This is evidenced by the official data of the Federal State Statistics Service and the Ministry of Internal Affairs of Russia. In January 2020 alone, 496 crimes related to the use of weapons were committed. One of the problems that law enforcement agencies face when investigating crimes is establishing the authenticity or verification of items found during operational investigative actions. To increase the probability of verification of items, a number of preventive measures are necessary. As such a preventive measure, the protective marking of items of increased interest from criminal structures can act. The application of marking marks can be used to protect property rights, protect against counterfeit products, as well as by various law enforcement agencies for marking weapons. The protective properties of the marking are increased if it is latent, that is, it is not perceived visually, including with the help of available magnifying devices. In this work, the impact of operational factors on the dynamics of changes in the parameters of nanomarkings applied to steel parts is studied using a new innovative technology-scanning probe microscopy, which provides one hundred percent verification of subjects and objects.

**Key words:** protective nanomark, durability, steel, scanning probe microscope, dynamic lithography.



www.volsu.ru

# ИННОВАЦИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ И ХИМИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

---

---

DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2021.1.5>

УДК 532.5.013

ББК 22.253.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ СМАЗКИ В ЗАЗОРАХ МЕХАНИЗМА ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**Александр Викторович Васильев**

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплотехника и гидравлика»,  
Волгоградский государственный технический университет  
vasilyev@vstu.ru  
просп. им. Ленина, 28, 400005 г. Волгоград, Российская Федерация

**Евгений Сергеевич Агеев**

Аспирант кафедры «Теплотехника и гидравлика»,  
Волгоградский государственный технический университет  
tig@vstu.ru  
просп. им. Ленина, 28, 400005 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрена методика расчета гидродинамики смазки в зазорах на основе обобщенной математической модели динамики механизма газораспределения. Приведены результаты ее использования для привода выпускного клапана двигателя 8ЧВН15/16. Показано, что разработанные методики и алгоритмы обеспечивают более точное определение динамических и трибологических характеристик механизма газораспределения.

**Ключевые слова:** механизм газораспределения, гидродинамика смазки, двигатель внутреннего сгорания, трибологические характеристики, математическое моделирование.

При проектировании и исследовании механизма газораспределения (МГР) ДВС большое внимание в последнее время уделяется

гидродинамике смазки в зазорах. Это вызвано заметным ее влиянием на динамику механизма, широким использованием различных

гидроэлементов в клапанном приводе, а также необходимостью определения трибологических характеристик основных сопряжений МГР, в значительной мере определяющих его надежность [3–6]. В связи с этим в данной работе представлена обобщенная методика математического моделирования динамики МГР с учетом гидродинамики смазки, а также приведены некоторые результаты ее использования.

При сближении контактирующих поверхностей (или уменьшении толщины масляной пленки) внешняя нагрузка  $Q$ , действующая на сопряжение, равна алгебраической сумме несущей силы вытесняемой смазки  $Q_B$  и несущей гидродинамической силы  $Q_G$ , возникающей вследствие перемещения точки контакта по рабочим поверхностям кулачка и толкателя:

$$Q = Q_B + Q_G. \quad (1)$$

На основе изложенной методики разработан алгоритм пошагового итерационного расчета нестационарного значения толщины масляной пленки в сопряжении кулачок-толкатель. При этом производная  $dh/dt$  в (3) представляется в конечно-разностном виде, а в качестве внешней нагрузки  $Q$  может быть использована как квазистатическая сила в приводе, равная сумме сил клапанных пружин и инерции приведенных к толкателю масс движущихся деталей механизма, так и сила, рассчитываемая путем математического моделирования динамики МГР. В последнем случае дополнительно учитываются колебательные процессы в клапанном приводе, и расчет является более точным.

В связи с этим рассмотрим расчет гидродинамики смазки в зазорах МГР в рамках обобщенной математической модели его динамики, позволяющей исследовать клапанные механизмы различных типов с учетом их существенных особенностей, таких как начальные усилия и зазоры в связях, рассеяние энергии при колебаниях, наличие односторонних связей и возможность разрыва кинематической цепи, ударные взаимодействия деталей при восстановлении контактов в звеньях, переменность параметров (передаточных чисел, жесткостей, силы давления газов на тарелку клапана).

Дифференциальные уравнения движения системы из  $N$ -связанных масс имеют вид

$$m_i \ddot{x}_i = P_i - F_i + \sum_{n=1}^{n_i} (P_{in} - F_{in}) \quad (i = 1, \dots, N), \quad (2)$$

где  $m_i$  – величина  $i$ -й массы;  $\ddot{x}_i$  – ее ускорение;  $P_i$  – внешняя сила, действующая на  $i$ -ю массу (например, сила от давления газов в цилиндре);  $F_i$  – сила внешнего трения;  $n_i$  – общее количество связей  $i$ -й массы с другими или с неподвижной заделкой;  $P_{in}$  и  $F_{in}$  – силы соответственно от упругой деформации и внутреннего трения в  $n$ -й связи, действующие на  $i$ -ю массу.

Сила вязкого трения

$$F_i = b_i \dot{x}_i, \quad (3)$$

где  $b_i$  – коэффициент внешнего трения;  $\dot{x}_i$  – скорость  $i$ -й массы.

Для двухсторонней связи, передающей как растягивающие, так и сжимающие усилия,

$$P_{in} = \mp (P_{in})_0 - c_{in} (x_i - x_j / r_{in} \pm s_{in}), \quad (4)$$

где  $(P_{in})_0$  – начальное усилие (при  $x_i = x_j = 0$ ;  $c_{in}$  – жесткость связи;  $x_i$  и  $x_j$  – перемещения соответственно  $i$ -й и  $j$ -й масс;  $j$  – номер массы, соответствующей связи  $n$ ;  $r_{in}$  – передаточное отношение связи ( $r_{in}$  не равно единице, например, для коромысла);  $s_{in}$  – кинематическое возбуждение, определяемое законом перемещения толкателя для связи кулачок-толкатель, либо законом перемещения плунжера гидрокомпенсатора при наличии последнего в данной связи. В других случаях величина  $s_{in}$  полагается равной нулю. В (4) и ниже верхний знак соответствует случаю, когда масса  $j$  расположена далее массы  $i$  в положительном направлении оси  $OX$ , а нижний знак – противоположному случаю.  $(P_{in})_0$  положительно для сжатой и отрицательно для растянутой связи.

В односторонней связи (не передающей растягивающие усилия) возможно возникновение зазора  $\delta_{in}$  при относительном расхождении масс. Тогда при наличии кинематического возбуждения

$$P_{in} = \mp (P_{in})_0 - c_{in} [x_i - x_j / r_{in} \pm (s_{in} + \delta_{in} - \Delta_{in})], \quad (5)$$

где  $\delta_{in}$  и  $\Delta_{in}$  – соответственно текущее и начальное (при нулевых перемещениях масс) значения зазоров.

Очевидно, при соблюдении условия равновесия хотя бы одно из начальных значений  $\Delta_{in}$  и  $(P_{in})_0$  должно быть равно нулю, если только в данной связи отсутствует несущая гидродинамическая сила. Величина  $\delta_{in}$  при отсутствии смазки в зазоре определяется по формуле:

$$\delta_{in} = \max\{[\Delta_{in} - (P_{in})_0 / c_{in} - s_{in} \mp (x_i - x_j / r_{in})], 0\}. \quad (6)$$

Сила внутреннего трения  $F_{in}$  в связи принимается пропорциональной скорости ее деформации. Для двухсторонней связи

$$F_m = (\dot{x}_i - \dot{x}_j / r_{in} \pm \dot{s}_{in}), \quad (7)$$

где  $b_{in}$  – коэффициент внутреннего трения;  $\dot{x}_j$  – скорость  $j$ -й массы,  $\dot{s}_{in}$  – скорость кинематического возбуждения.

Для односторонней связи выражение (7) справедливо при равном нулю зазоре  $\delta_{in}$ . В противном случае при отсутствии смазки в зазоре величина  $F_{in}$  полагается равной нулю.

Пусть зазор заполнен маслом, и соответствующая упругая связь сжата, то есть выражение  $(P_{in} - F_{in})$  меньше нуля, если масса  $j$  расположена далее массы  $i$  в положительном направлении оси  $OX$ , и  $(P_{in} - F_{in})$  больше нуля в противоположном случае. Тогда при чистом вытеснении смазки для определения  $\delta_{in}$  следует вместо (6) использовать, следующее соотношение:

$$\dot{\delta}_{in} = -|P_{in} - F_{in}| \delta_{in}^3 / K_{in}. \quad (8)$$

Если же соответствующая односторонняя связь, не передающая растягивающих усилий, не является сжатой (то есть выражение  $(P_{in} - F_{in})$  принимает нулевое значение), предполагаем, что величина  $\delta_{in}$  может увеличиваться в случае взаимного расхождения масс:

$$\dot{\delta}_{in} = \max\{[-\dot{s}_{in} \mp (\dot{x}_i - \dot{x}_j / r_{in})], 0\}. \quad (9)$$

Соответственно, сила внутреннего трения в связи рассчитывается по формуле

$$F_m = b_{in} [\dot{x}_i - \dot{x}_j / r_{in} \pm (\dot{s}_{in} + \dot{\delta}_{in})]. \quad (10)$$

Изложенный подход позволяет строить математические модели клапанного привода с учетом гидродинамики смазки в его зазорах, количество и параметры которых задаются в исходных данных. Уравнения (2) после понижения порядка путем введения дополнительных переменных в сочетании с (9) или (10) образуют систему, решаемую методом Рунге-Кутты.

С использованием идентифицированной по экспериментальным данным девятимассовой динамической модели [2] привода выпускного клапана двигателя 8ЧВН15/16 выполнены расчеты чистого вытеснения смазки из теплового зазора, а также определена толщина масляной пленки в сопряжении кулачок-толкатель.

На рисунке 1 приведены графики изменения толщины масляной пленки в тепловом зазоре МГР для двух значений частоты вра-

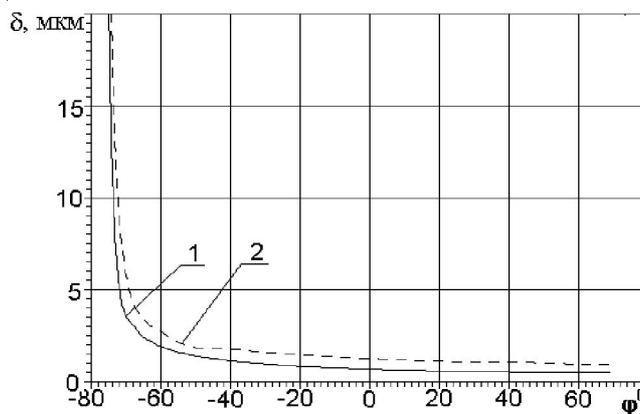


Рис. 1. Толщина масляной пленки в тепловом зазоре МГР двигателя 8ЧВН15/16 в зависимости от угла поворота кулачка (случай чистого вытеснения масла):

1 – n = 600 об/мин; 2 – n = 2000 об/мин

щения коленчатого вала. При этом зазор, начальное значение которого задавалось равным 0,1 мм, вводился в связь между элементами, моделирующими штангу толкателя и коромысло, причем форма контакта принималась круговой с радиусом 5 мм.

Расчет вытеснения смазки из зазора позволяет учесть рассеяние энергии в слое смазки дополнительно к потерям на внешнее и внутреннее трение. При этом также изменяются жесткостные характеристики связи. Так, ее приведенная жесткость, рассчитанная с учетом уменьшения толщины масляной пленки, меньше заданной статической жесткости, и переменна по углу поворота кулачка [1]. Отмеченные обстоятельства оказывают влияние на результаты моделирования динамики клапанного привода. На рисунке 2 при-

ведены результаты сравнительных расчетов силы, действующей со стороны коромысла на клапан в начальный период его подъема при исходной величине теплового зазора 0,3 мм и частоте вращения коленчатого вала двигателя 1900 об/мин. Плавность нарастания силы при вступлении механизма в работу, характерная для расчета с учетом вытеснения масла (кривая 2), хорошо согласуется с экспериментальными данными. При этом наблюдается смягчение ударного взаимодействия деталей при восстановлении контактов в звеньях как в начале движения клапана, так и в случае разрывов кинематической цепи.

При наличии масла в зазоре (кривая 2 на рисунке 2) первые максимальное и минимальное пиковые значения силы равны соответственно 1255 Н и 690 Н, в то время как

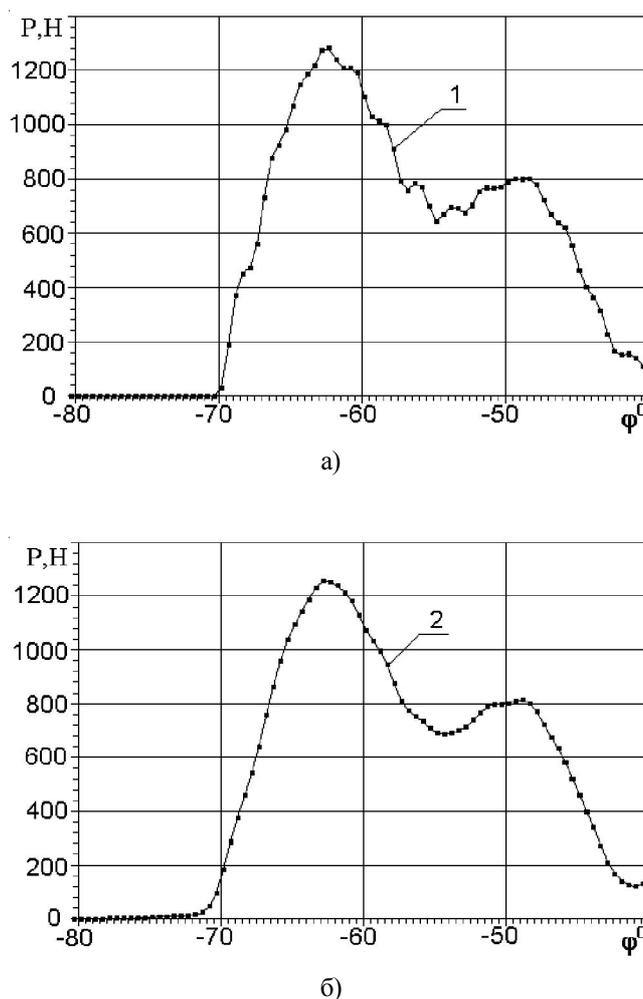


Рис. 2. Сила в коромысле привода клапана двигателя 8ЧВН15/16 в зависимости от угла поворота кулачка: а) без учета гидродинамики смазки; б) с учетом гидродинамики смазки

эти же параметры при расчете без учета вытеснения масла (кривая 1 на рисунке 2) равны 1 281 Н и 643 Н. Различие интенсивности возбуждаемых в приводе высокочастотных колебаний в начальной фазе движения клапана, хорошо заметные при сравнении кривых 1 и 2 на рисунке 2, становятся более существенными при увеличении зазора и частоты вращения распределительного вала. Поскольку высокочастотные колебания быстро затухают, различия в динамике при посадке клапана, вызванные учетом вытеснения масла из зазоров, менее существенны. Таким образом, анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что учет наличия масляных пленок между элементами повышает адекватность математической модели динамики МГР.

На рисунке 3 приведены результаты расчета толщины масляной пленки в сопряжении кулачок-толкатель. Кривая 1 получена на основе формулы (4) (квазистационарный расчет) при нагружении сопряжения силами клапанных пружин и инерции приведенных к толкателю движущихся масс. Кривая 2 соответствует расчету с учетом эффекта вытеснения смазки по изложенной выше методике (нестационарный расчет) и таком же, как и для кривой 1, квазистатическом нагружении сопряжения. Наконец, кривая 3 рассчитана с учетом как нестационарности гидродинамики смазки, так и наличия колебательных процессов в механизме, моделируемых на основе представленной

выше обобщенной математической модели динамики МГР. Расчет выполнен для частоты вращения коленчатого вала 1700 об/мин и нулевого теплового зазора.

Кривые 1 и 2 различаются вследствие наличия эффекта вытеснения смазки. Отличия особенно заметны в области минимальных толщин и становятся более существенными с ростом частоты вращения кулачка, а также при разрывном ускорении толкателя.

Заметно также влияние на результаты более точного расчета сил с учетом колебательных процессов в механизме. Различия кривых 2 и 3 наибольшие также в зонах действия вытеснительных эффектов и невелики при отсутствии последних. Это объясняется тем, что при использовании (4) изменение нагрузки слабо влияет на  $h_{\min}$  вследствие малого показателя степени у  $Q_T$ , равного (-0,13). Увеличение  $h_{\min}$  в начале и конце движения клапана для кривой 3 по сравнению с кривыми 1 и 2 вызвано тем, что при математическом моделировании динамики, в отличие от квазистатического расчета силы, обеспечивается постепенность нагрузки и разгрузки сопряжения.

Таким образом, разработанная обобщенная математическая модель динамики МГР, позволяющая рассчитывать гидродинамику смазки в его сопряжениях, обеспечивает более точное определение динамических и трибологических характеристик механизма, являющихся основой для оценки его работоспособности и надежности.

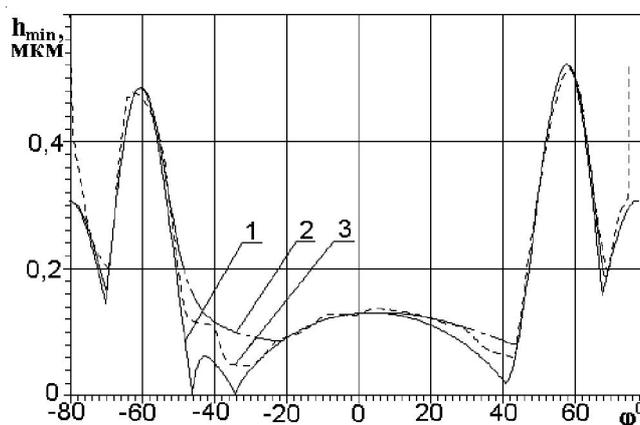


Рис. 3. Минимальная толщина масляной пленки в сопряжении кулачок-толкатель двигателя 8ЧВН15/16 в зависимости от угла поворота кулачка:

- 1 – квазистатический расчет; 2 – расчет с учетом нестационарности режима смазки;  
3 – расчет с учетом нестационарности режима смазки и колебательных процессов в МГР

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Васильев, А. В. Обобщенная математическая модель динамики механизма газораспределения ДВС с гидротолкателем / А. В. Васильев // Деп. в ВИНТИ. – 1997. – № 3709 – В97. – С. 1–15.
2. Григорьев, Е. А. Математическое моделирование динамики механизма газораспределения ДВС / Е. А. Григорьев, А. В. Васильев // Двигателестроение. – 1991. – № 12. – С. 7–9.
3. Dowson, D. *Elastohydrodynamic Lubrication* / D. Dowson, G. R. Higginson. – L. : Pergamon Press, 1966. – 235 p.
4. Holland, J. Zur Ausbildung eines Schmierfilms zwischen Nocken und / J. Holland // MTZ. – 1978. – Vol. 39, № 5. – S. 225–231.
5. Holland J. Die Elastohydrodynamik / J. Holland // Konstruktion. – 1978. – Vol. 30, h. 9. – S. 363–369.
6. Kreuter, P. Valve Train Calculation Model with Regard to Oil Film Effects / P. Kreuter, F. Pischinger // SAE Techn. Pap. Ser. – 1985. – № 850399. – P. 1–10.

**REFERENCES**

1. Vasil'ev A.V. Obobshchyonnaya matematicheskaya model' dinamiki mekhanizma gazoraspredeleniya DVS s gidrotolkatelem [Generalized Mathematical Model of the Dynamics of the Gas Distribution Mechanism of an Internal Combustion Engine with a Hydraulic Pusher]. *Dep. v VINITI*, 1997, no. 3709 - V97, pp. 1-15.
2. Grigor'ev E.A., Vasil'ev A.V. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki mekhanizma gazoraspredeleniya DVS [Mathematical Modeling of the Dynamics of the Gas Distribution Mechanism of the Internal Combustion Engine]. *Dvigatelistroenie*, 1991, no. 12, pp. 7-9.
3. Dowson D., Higginson G.R. *Elastohydrodynamic Lubrication*. London, Pergamon Press, 1966. 235 p.
4. Holland J. Zur Ausbildung eines Schmierfilms zwischen Nocken und. *MTZ*, 1978, vol. 39, no. 5, S. 225-231.
5. Holland J. Die Elastohydrodynamik. *Konstruktion*, 1978, vol. 30, h. 9, S. 363-369.
6. Kreuter P., Pischinger F. Valve Train Calculation Model with Regard to Oil Film Effects. *SAE Techn. Pap. Ser.*, 1985, no. 850399, pp. 1-10.

**INVESTIGATION OF THE FLUID DYNAMICS OF LUBRICATION  
IN THE GAPS OF THE GAS DISTRIBUTION MECHANISM  
OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

**Alexander V. Vasilyev**

Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Department of Heat Engineering and Hydraulics,  
Volgograd State Technical University  
vasilyev@vstu.ru  
Prosp. Lenina, 28, 400005 Volgograd, Russian Federation

**Evgenij S. Ageev**

Postgraduate Student, Department of Heat Engineering and Hydraulics,  
Volgograd State Technical University  
tig@vstu.ru  
Prosp. Lenina, 28, 400005 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The method of calculating the fluid dynamics of the lubricant in the gaps is considered on the basis of a generalized mathematical model of the dynamics of the gas distribution mechanism. The results of its use for the drive of the engine exhaust valve are presented. It is shown that the developed methods and algorithms provide a more accurate determination of the dynamic and tribological characteristics of the gas distribution mechanism.

**Key words:** gas distribution mechanism, lubrication hydrodynamics, internal combustion engine, tribological characteristics, mathematical modeling.



## ИННОВАЦИИ В БИОТЕХНОЛОГИЯХ

---

---

DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2021.1.6>

УДК 519.6

ББК 22.19

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ ПО ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЕ

**Сергей Германович Сучков**

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
Директор научно-технологического центра «Микро- и нанoeлектроника»,  
Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
[suchkov.s.g@mail.ru](mailto:suchkov.s.g@mail.ru)  
ул. Астраханская, 83, 410012 г. Саратов, Российская Федерация

**Дмитрий Сергеевич Сучков**

Доктор физико-математических наук, заместитель директора НИИ механики и физики,  
Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
[suchkovds@ya.ru](mailto:suchkovds@ya.ru)  
ул. Астраханская, 83, 410012 г. Саратов, Российская Федерация

**Светлана Михайловна Сучкова**

Инженер ООО «Конверсия-СГУ»  
[svetlana.m.suchkova@ya.ru](mailto:svetlana.m.suchkova@ya.ru)  
ул. Московская, 66, 410012 г. Саратов, Российская Федерация

**Аннотация.** Предложена феноменологическая модель математического описания практически важных изменений пульсовой волны между нормой и патологией. Полученные результаты свидетельствуют о существенно нелинейном по давлению характере трансформации пульсовой волны в области манжетки.

**Ключевые слова:** пульсовая волна, феноменологическая модель, кровеносные сосуды, уравнения гидродинамики, математическое моделирование.

Пульсовая волна представляет собой сложное совместное движение крови и стенок сосудов, описываемое нелинейной системой дифференциальных уравнений гидродинамики и теории упругости с подвижной границей. Даже приближенное решение такой задачи в настоящее время не представляется возможным без существенных упрощений, сводящих задачу к практически не интересным случаям. Поэтому для математического описания практически важных изменений пульсовой волны между нормой и патологией и выявления основных физических параметров, характеризующих патологию, необходимо построить феноменологическую модель, параметры которой определяются из сравнения с экспериментом.

Для скорости пульсовой волны воспользуемся известной эмпирической формулой [1–4]:

$$V = \sqrt{\frac{Eh}{\rho d}}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $h$  – толщина,  $\rho$  – плотность стенки сосуда,  $d$  – диаметр кровеносного сосуда.

При наложении манжетки на область бицепса прохождение пульсовой волны, как и любой другой, через конечную по размерам неоднородность (длиной  $L_m$ ) сопровождается возникновением отраженных волн от начала и конца манжетки. Датчик давления находится в середине манжетки, поэтому на него приходит прошедшая первую границу манжетки волна и волна, отраженная от второй границы манжетки. Следующие отражения не будем учитывать ввиду малости их амплитуды. Будем считать, что

под манжеткой уменьшается диаметр сосудов. Тогда под манжеткой скорость волны увеличивается и от границ манжетки происходит отражение вследствие скачка акустического импеданса  $\rho V$ . Кроме того, возникает топографическая неоднородность вследствие скачка диаметра сосудов под манжеткой, что также вызывает отражение, зависящее от отношения размера неоднородности и длины волны.

Импульс пульсовой волны  $P(t)$  имеет спектр частот:

$$S_p(f) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} P(t) \cos(2\pi ft) dt, \quad (2)$$

показанный на рисунке 2а для нормы, а на рисунке 2б при патологии.

Из рисунков 1б и 2б видно, что при патологии возникают высокочастотные осцилляции пульсовой волны. Для их описания можно предположить, что, по-видимому, при падении пульсовой волны на участок сосуда, пережатый манжеткой, возбуждаются колебания стенок сосуда. Поэтому предположим, что диаметр сосуда перед манжеткой  $d_1$ , зависит от давления в виде:

$$d_1(t) = d_{10} \{1 + k_1 [1 + k_{vib} \sin(2\pi f_{vib} t)] P(t)\}, \quad (3)$$

а под манжеткой  $d_2$  и после манжетки  $d_3$  в виде:

$$d_i(t) = d_{i0} (1 + k_i P(t)) \quad (i = 2, 3), \quad (4)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_{vib}, d_{10}, d_{20}, d_{30}, f_{vib}$  – феноменологические параметры в соответствующих областях,

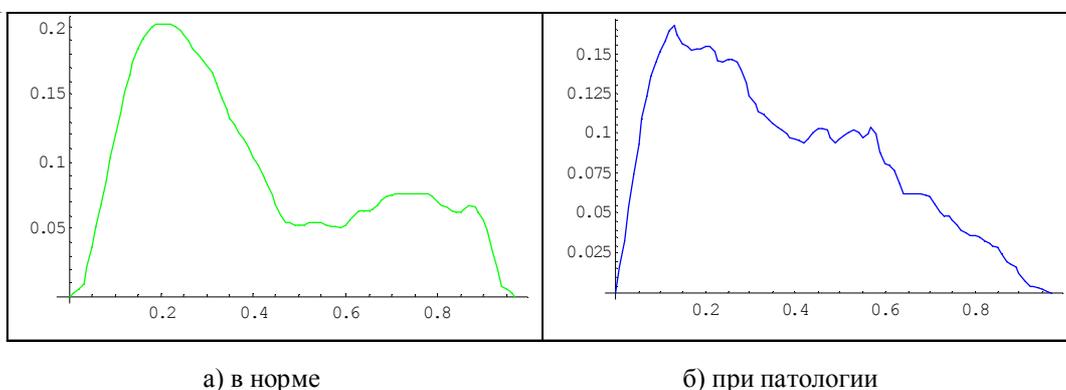


Рис. 1. Форма импульса пульсовой волны

$P(t)$  – давление в пульсовой волне. Предположим также, что модуль упругости стенки сосуда зависит от диаметра и для разных областей сосуда имеет вид:

$$E_i(t) = E_0(1 + e_d d_i(t)), \quad (5)$$

где  $E_0, e_d$  – феноменологические параметры. Толщина стенки сосуда также зависит от диаметра сосуда и задается очевидной формулой

$$h_i(t) = h_0 \left( \frac{d_i}{d_{0i}} \right)^2, \quad (6)$$

где  $h_0$  – феноменологический параметр. Зависимость от частоты  $f$  скорости распространения пульсовой волны в кровеносном сосуде возьмем в виде:

$$V_i(f) = V_{i0}(1 + \gamma_1 f + \gamma_2 f^2), \quad (7)$$

где  $V_{i0}$  определяются формулой (1),  $\gamma_1, \gamma_2$  – феноменологические параметры. Зависимость от частоты коэффициента отражения от границ манжетки (по аналогии с отражением акустических волн от границы раздела и топографической неоднородности), считая плотность сосуда  $\rho$  одинаковой во всех областях, примем в виде:

$$R(f) = \frac{V_i - V_j}{V_i + V_j} + C_1 \frac{d_i - d_j}{V_{i0}} f, \quad (8)$$

где  $V_i, V_j$  – скорости пульсовой волны,  $d_i, d_j$  – диаметры сосуда в разных областях,  $C_1$  – феноменологический параметр.

Полный интерференционный сигнал будем определять путем сложения (точнее, интегрирования) всех частотных составляющих пульсовой волны, прошедших первую границу

манжетки и через интервал времени  $\tau/2 = L_m/2V_2$  принятый в середине манжетки с учетом затухания частотных составляющих, пропорционального квадрату частоты

$$M_1(t) = 2\sqrt{2\pi} \int_0^\infty \sqrt{1 - R_1(f)^2} S_p(f) \cos\left(2\pi f\left(t + \frac{\tau}{2}\right)\right) e^{-\alpha 2\pi f^2 / V_2 \cdot L_m / 2} df, \quad (9)$$

где  $R_1(f)$  – коэффициент отражения от первой границы манжетки,  $\alpha$  – коэффициент затухания (феноменологический параметр), и частотных составляющих, отраженных от второй границы манжетки и принятых через интервал времени  $3\tau/2$ :

$$M_2(t) = 2\sqrt{2\pi} \int_0^\infty R_2(f) \sqrt{1 - R_1(f)^2} S_p(f) \cos\left(2\pi f\left(t + \frac{3\tau}{2}\right)\right) e^{-\alpha 2\pi f^2 / V_2 \cdot L_m / 2} df, \quad (10)$$

где  $R_2(f)$  – коэффициент отражения от второй границы.

Таким образом, полный интерференционный сигнал, принятый датчиком в середине манжетки, определяется суммой

$$M(t) = M_1(t) + M_2(t) \quad (11)$$

и зависит от модельных параметров  $k_i, f_{\text{vib}}, e_d, \gamma_1, \gamma_2, C_1, C_2, \alpha$ , от материальных ( $\rho_i, E_0$ ) и геометрических ( $d_{i0}, h_0$ ) параметров, являющихся феноменологическими и определяющими скорости и затухание пульсовой волны в различных частях сосуда в области манжетки.

Указанные 17 феноменологических параметров определяются методом наименьших квадратов при минимизации целевой функции

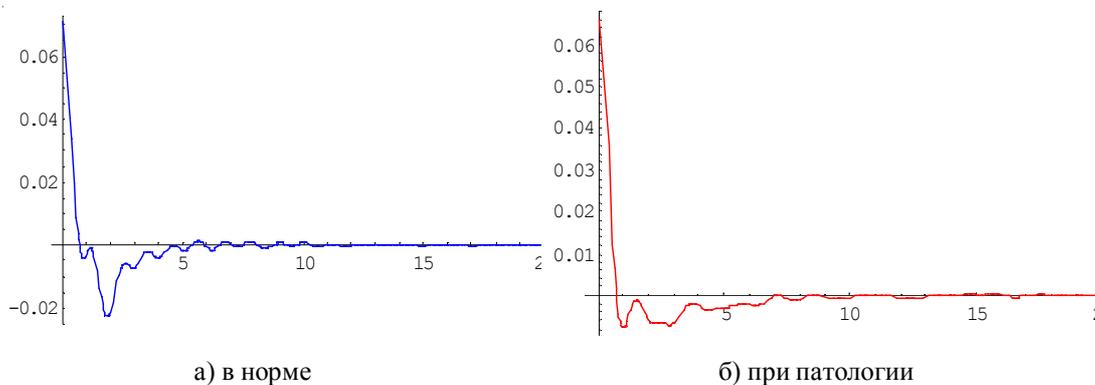


Рис. 2. Спектр пульсовой волны

$F_c$  в виде суммы квадратов отклонений расчетной ( $M(t)$ ) и экспериментальной ( $P(t)$ ) характеристик:

$$F_c = \sum_{k=1}^N (M(t) - P(t))^2 \quad (12)$$

На рисунке 3 представлены графики давления пульсовой волны в норме (зеленая кривая), при патологии сосудов (синяя кривая) и модельная кривая (красная), полученная при рассмотрении падения нормальной пульсовой волны на участок сосуда с манжеткой.

Целью расчета являлось определение параметров сосуда, при которых форма пульсовой волны становится близкой к патологической.

Представленная на рисунке 3 расчетная кривая соответствует следующим значениям параметров:

$$\begin{aligned} E_0 &= 26659 \text{ (Па/м}^2\text{)}, e_d = -14.3, \\ d_{10} &= 6.7 \text{ мм}, d_{20} = 1.1 \text{ мм}, d_{30} = 4.8 \text{ мм}, f_{vib} = \\ &= 14.28 \text{ Гц}, \\ k_1 &= 4.98, k_2 = 6.55, k_3 = 0.07, k_{vib} = 0.08, \\ h_0 &= 0.18 \text{ мм}, \rho = 1150 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \\ C_1 &= 48, C_2 = -919, \gamma_1 = 0.047, \gamma_2 = 0.013, \\ \alpha &= 0.0039. \end{aligned}$$

Полученные результаты свидетельствуют о существенно нелинейном по давлению характере трансформации пульсовой волны в области манжетки. Обращает на себя внимание также обнаруженный эффект уменьшения модуля упругости при увеличении диаметра сосуда, о чем свидетельствует отрицательное значение коэффициента  $e_d$ .

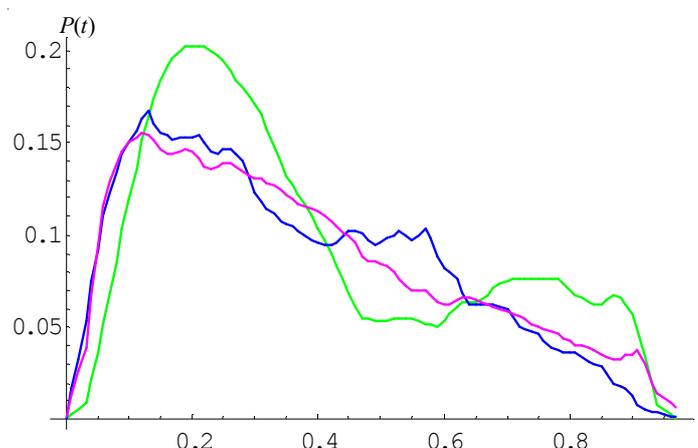


Рис. 3. Сравнение формы импульсов пульсовых волн в норме (зеленая), при патологии (синяя) и расчетной (красная)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астраханцева, Е. В. Математическое моделирование гемодинамики крупных кровеносных сосудов / Е. В. Астраханцева, В. Ю. Гидастов, Д. Л. Ревизников // Математическое моделирование. – 2005. – Т. 17, № 8. – С. 61–80.
2. Доль, А. В. Математические модели движения крови в системе сосудов с упругими стенками / А. В. Доль, Ю. П. Гуляев, Д. В. Иванов // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 9–1. – С. 79–84.
3. Механика кровообращения / К. Каро [и др.]. – М.: Мир, 1981. – 600 с.
4. Педли, Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов: пер. с англ. / Т. Педли. – М.: Мир, 1983. – 400 с.

## REFERENCES

1. Astrahanceva E.V., Gidastov V.Yu., Reviznikov D.L. Matematicheskoe modelirovanie gemodinamiki krupnykh krovenosnykh sosudov [Mathematical Modeling of Hemodynamics of Large Blood Vessels]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2005, vol. 17, no. 8, pp. 61-80.
2. Dol' A.V., Gulyaev Yu.P., Ivanov D.V. Matematicheskie modeli dvizheniya krovi v sisteme sosudov s uprugimi stenkami [Mathematical Models of Blood Flow in a System of Vessels with Elastic Walls]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2014, no. 9-1, pp. 79-84.
3. Karo K., Pedli T., Shroter R., Sid U. *Mekhanika krovoobrashcheniya* [Mechanics of Blood Circulation]. Moscow, Mir Publ., 1981. 600 p.
4. Pedli T. *Gidrodinamika krupnykh krovenosnykh sosudov: per. s angl.* [Hydrodynamics of Large Blood Vessels]. Moscow, Mir Publ., 1983. 400 p.

**DETERMINATION OF BLOOD VESSEL PARAMETERS  
BY PULSE WAVE**

**Sergey G. Suchkov**

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher,  
Director of the Scientific and Technological Center “Micro- and Nanoelectronics”,  
Saratov National Research State University  
suchkov.s.g@mail.ru  
Astrakhanskaya St, 83, 410012 Saratov, Russian Federation

**Dmitry S. Suchkov**

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Deputy Director,  
Research Institute of Mechanics and Physics,  
Saratov National Research State University  
suchkovds@ya.ru  
Astrakhanskaya St, 83, 410012 Saratov, Russian Federation

**Svetlana M. Suchkova**

Engineer, LLC “Conversion-SSU”  
svetlana.m.suchkova@ya.ru  
Moskovskaya St, 66, 410012 Saratov, Russian Federation

**Abstract.** A pulse wave is a complex joint motion of blood and vessel walls described by a nonlinear system of differential equations of hydrodynamics and elasticity theory with a mobile boundary. Even an approximate solution to such a problem is currently not possible without significant simplifications, reducing the problem to almost uninteresting cases. Therefore, to mathematically describe the practically important changes in the pulse wave between the norm and pathology and to identify the main physical parameters that characterize the pathology, it is necessary to build a phenomenological model, the parameters of which are determined from comparison with the experiment. The results obtained indicate that the pulse wave transformation in the cuff area is significantly nonlinear in pressure. Attention is also drawn to the effect of a decrease in the elastic modulus with an increase in the diameter of the vessel.

**Key words:** pulse wave, phenomenological model, blood vessels, hydrodynamic equations, mathematical modeling.

---

---

Журнал «НБИ технологии» издается для широкого ознакомления научной общественности с результатами современных исследований, посвященных вопросам развития инновационной деятельности, защиты объектов интеллектуальной собственности и ее коммерциализации, государственной политики в сфере управления инновациями, а также реализации инновационных технологий обучения.



Авторами «НБИ технологии» могут быть преподаватели, научные сотрудники и аспиранты высших учебных заведений и научно-исследовательских учреждений России, а также другие отечественные и зарубежные исследователи.

---

---

#### **Уважаемые читатели!**

Подписка на II полугодие 2021 года осуществляется по «Объединенному каталогу. Пресса России. Газеты и журналы». Т. 1. Подписной индекс 10384.

Стоимость подписки на II полугодие 2021 года 1 034 руб. 22 коп.  
Распространение журнала осуществляется по адресной системе.

---

---

## ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ В РЕДКОЛЛЕГИЮ ЖУРНАЛА «НБИ ТЕХНОЛОГИИ»

1. Материалы представляются на бумажном и электронном носителях по адресу: 400062, г. Волгоград, просп. Университетский, 100, Волгоградский государственный университет – главному редактору Запороцкой Ирине Владимировне или высылаются по электронной почте на адреса: [vestnik10@volsu.ru](mailto:vestnik10@volsu.ru).

Обязательно наличие сопроводительного письма, в котором должны содержаться следующие пункты: гарантия оригинальности статьи, отсутствия в ней недостоверных данных и плагиата; обязательство не подавать данный материал в другой журнал; информация о наличии/отсутствии потенциального конфликта интересов с членами редколлегии; данные о финансировании исследования (с пометкой об их конфиденциальности или необходимости опубликования); согласие с принципами, изложенными в разделе «Издательская этика» журнала (<https://ti.jvolsu.com/index.php/publishing-ethics-ru>).

Для российских авторов (аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук) необходимо дополнительно представить рекомендацию, подписанную научным руководителем и заверенную печатью учреждения.

### 2. Правила оформления статей.

Объем статьи не должен превышать 1 п. л.

Каждая статья должна включать следующие элементы издательского оформления:

- 1) Индексы УДК и ББК.
- 2) Заглавие. Подзаголовочные данные (на русском и английском языках).
- 3) Имя, отчество, фамилия автора; ученое звание, ученая степень; контактная информация (место работы/учебы и должность автора, полный почтовый адрес организации, телефон, e-mail) на русском и английском языках.
- 4) Аннотация на русском языке и авторское резюме (Abstract) на английском языке.
- 5) 5–8 ключевых слов или словосочетаний (на русском и английском языках).
- 6) Текст статьи.
- 7) Список литературы на русском языке, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.1-2003, и References – список литературы на английском языке (латинским шрифтом), оформленный в соответствии с требованиями редакции. При необходимости – примечания, приложения.

### 2.1. Требования к авторским оригиналам на бумажном и электронном носителях:

- 1) Поля по 2 см с каждой стороны.
- 2) Нумерация страницы по центру внизу.
- 3) Шрифт Times New Roman, кегль 14, междустрочный интервал 1,5.
- 4) Файл должен быть создан в программе «Microsoft Word» и сохранен с расширением \*.rtf; имя файла должно быть набрано латиницей и отражать фамилию автора.

### 2.2. Оформление библиографических ссылок и примечаний:

- 1) Библиографические ссылки на пристатейный список литературы должны быть оформлены с указанием в строке текста в квадратных скобках цифрового порядкового номера источника и через запятую номеров соответствующих страниц.
- 2) Пристатейный список литературы, озаглавленный как «Список литературы», составляется в алфавитном пронумерованном порядке. Он должен быть оформлен согласно ГОСТ 7.1–2003 с указанием обязательных сведений библиографического описания.

3. После получения материалов рукопись направляется на рецензирование. Решение о публикации статей принимается редакционной коллегией после рецензирования. Редакция оставляет за собой право отклонить или отправить представленные статьи на доработку на основании соответствующих заключений рецензентов. После получения положительной рецензии редакция уведомляет авторов о том, что статья принята к опубликованию, а также направляет замечания рецензентов и редакторов, в соответствии с которыми необходимо исправить или дополнить статью. В случае отказа в публикации статьи редакция представляет автору мотивированный отказ.

Полнотекстовые версии опубликованных статей и их метаданные (аннотации, ключевые слова, информация об авторах на русском и английском языках, список литературы) будут размещены в свободном доступе в Интернете на официальном сайте издания, на платформе Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU и других реферативных баз данных.

4. Более подробно с требованиями к статьям можно ознакомиться на страничке Издательства на сайте Волгоградского государственного университета: <https://www.volsu.ru> – и сайте журнала: <https://ti.jvolsu.com>.

---

---