

# ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2025. Т. 70, №1

# ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2025. Т. 70, №1

Журнал основан в 1956 г. как «Весці Акадэміі навук БССР.  
Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1992 г. – «Весці Акадэміі навук Беларусі.  
Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1998 г. – современное название

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,  
свидетельство о регистрации № 391 от 18 мая 2009 г.

*Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь  
для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных  
Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)*

Г л а в н ы й   р е д а к т о р

**Сергей Антонович Чижик –**

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Р е д а к ц и о н н а я   к о л л е г и я

**С. С. Щербаков** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь  
(заместитель главного редактора)

**И. А. Старостина** (ведущий редактор журнала)

**Д. Басаран** – Университет Буффало, Буффало, Соединенные Штаты Америки

**П. А. Витязь** – Управление аэрокосмической деятельности аппарата Национальной академии наук  
Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**Дзефэн Ван** – Юго-Западный университет Цзяотун, Чэнду, Китайская Народная Республика

**В. Г. Залесский** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск,  
Республика Беларусь

**В. В. Зильбершмидт** – Международный центр виброударных систем, Школа механического,  
электрического и технологического машиностроения им. Вольфсона Университета Лафборо,  
Лафборо, Великобритания

- А. Ф. Ильющенко** – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии – Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь
- Б. Каталинич** – Центрально-Европейское отделение Международной инженерной академии, Вена, Австрийская Республика
- М. Консари** – Университет штата Луизиана, Батон-Руж, Соединенные Штаты Америки
- С. М. Костромицкий** – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. Г. Кравцов** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Г. Красневский** – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. П. Ласковнѳв** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. М. Маляревич** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь
- В. П. Маркевич** – Институт фотоники Университета г. Манчестер, Манчестер, Великобритания
- Н. А. Махутов** – Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- В. В. Митюшев** – Краковский политехнический университет им. Тадеуша Костюшко, Краков, Республика Польша
- Н. К. Мышкин** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
- Нгуен-Ву Тронг** – Национальный институт прикладной механики и информатики Вьетнамской академии наук и технологий, Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам
- С. В. Панин** – Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация
- О. Г. Пенязков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Танович** – Белградский университет, Белград, Республика Сербия
- В. М. Федосюк** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь
- М. Л. Хейфец** – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Шуньин Цзи** – Совместный институт Даляньского политехнического университета и Белорусского государственного университета, Далянь, Китайская Народная Республика

*Адрес редакции:*  
*ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.*  
*Тел.: + 375 17 374-02-45; e-mail: fvesti@mail.ru*  
*vestift.belnauka.by*

---

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2025. Т. 70, № 1

*Выходит на русском, белорусском и английском языках*

---

Редактор *И. А. Старостина*  
Компьютерная верстка *И. В. Счеснюк*

Подписано в печать 12.03.2025. Выход в свет 27.03.2025. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 50 экз. Заказ 53.  
Цена номера: индивидуальная подписка – 14,48 руб., ведомственная подписка – 33,64 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск, Республика Беларусь

© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука»,  
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2025

# PROCEEDINGS

## OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2025, vol. 70, no. 1

---

The Journal was founded in 1956 under the titles  
“Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series”,  
since 1992 – “Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series”,  
since 1998 – it comes under its actual title

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus  
in the State Registry of Mass Media, reg. no. 391

*The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results  
of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database  
of Russian Science Citation Index (RSCI)*

### E d i t o r - i n - C h i e f

**Sergei A. Chizhik** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

### E d i t o r i a l B o a r d

**Sergei S. Sherbakov** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus  
(Deputy Editor-in-Chief)

**Irina A. Starostsina** (lead editor)

**Cemal Basaran** – University of Buffalo, Buffalo, United States of America

**Pyotr A. Vityaz** – Department of Aerospace Activities of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,  
Republic of Belarus

**Zefeng Wang** – Southwest Jiaotong University, Chengdu, People’s Republic of China

**Vitali G. Zalesski** – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,  
Republic of Belarus

**Vadim V. Silberschmidt** – International Centre of Vibro-Impact Systems, Wolfson School of Mechanical  
and Manufacturing Engineering at Loughborough University, Loughborough, United Kingdom

**Aliaksandr Ph. Ilyshchanka** – State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy –  
Academician O. V. Roman Institute of Powder Metallurgy, Minsk, Republic of Belarus

**Branko Katalinic** – Central-European Branch of the International Engineering Academy, Vienna, Republic  
of Austria

**Michael Khonsari** – Louisiana State University, Baton Rouge, United States of America

**Sergei M. Kostromitsky** – Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,  
Republic of Belarus

**Alexander G. Kravtsov** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic  
of Belarus

**Leonid G. Krasnevski** – Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences  
of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**Alexander P. Laskovnev** – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus  
**Alexander M. Malyarevich** – Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus  
**Vladimir P. Markevich** – Photon Science Institute and School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester, Manchester, United Kingdom  
**Nikolay A. Makhutov** – Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation  
**Vladimir V. Mityushev** – Cracow University of Technology, Krakow, Republic of Poland  
**Nikolai K. Myshkin** – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus  
**Nguyen-Vu Truong** – National Institute of Applied Mechanics and Informatics, Vietnam Academy of Science and Technology, Ho Chi Minh City, Socialist Republic of Vietnam  
**Sergey V. Panin** – Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation  
**Oleg G. Penyazkov** – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus  
**Lyubodrag Tanovich** – University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia  
**Valery M. Fedosyuk** – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus  
**Mikhail L. Kheifetz** – Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus  
**Shunying Ji** – Joint Institute of Dalian University of Technology and Belarusian State University, Dalian, People's Republic of China

*Address of the Editorial Office:*  
*I, Akademicheskaya Str., room 118, 220072, Minsk, Republic of Belarus.*  
*Tel.: +375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru*  
*vestift.belnauka.by*

---

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.  
Physical-technical series, 2025, vol. 70, no. 1  
*Printed in Russian, Belarusian and English languages*

---

Editor *I. A. Starostina*  
Computer imposition *I. V. Schasniuk*

It is sent of the press 12.03.2025. Appearance 27.03.2025. Format  $60 \times 84 \frac{1}{8}$ . Offset paper. The press digital.  
Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 50 copies. Order 53.  
Number price: individual subscription – 14,48 byn., departmental subscription – 33,64 byn.

Publisher and printing execution:  
Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya navuka"  
Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2, 2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina St., Minsk, 220084, Republic of Belarus.

© Formalization. RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka",  
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2025

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Латыпов О. Р., Ямщикова С. А., Антонов А. В., Даминев Р. Р., Латыпова Д. Р., Туркин И. С., Исрафилов Э. И.** Анализ химической стойкости термопластичных полимерных покрытий на основе полиолефинов в растворах кислот, солей и щелочей . . . . . 7
- Бука А. В., Колонтаева Т. В., Дятлова Е. М., Таратын И. А., Попов Р. Ю., Шевченко А. А.** Керамические материалы на основе композиций модифицированных манганита лантана и феррита висмута . . . . . 17

### МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

- Качанов И. В., Власов В. В.** Силовой режим скоростного выдавливания осесимметричных биметаллических стержневых изделий инструментального назначения . . . . . 28

### ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

- Янко М. В., Чорный А. Д., Заяц Е. М.** К расчету зарядки капель при коронном разряде в камере аэроионной обработки органических материалов . . . . . 37
- Ольшанский А. И., Котов А. А., Кузьменков С. М.** Кинетика влагообмена и температура в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов . . . . . 44

### РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- Абетковская С. О., Чижик С. А., Гуанбин Ю.** Полуконтактный режим атомно-силового микроскопа при малой жесткости консоли зонда *(на английском языке)*. . . . . 57
- Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В.** Влияние внешнего фонового оптического излучения на плоский угол зрения кремниевых фотоэлектронных умножителей . . . . . 69

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Артемьев В. М., Наумов А. О., Хмарский П. А.** Верификация программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным Европейской сети непрерывно функционирующих опорных станций EPN. . . . . 79

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)**CONTENTS****MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY**

- Latypov O. R., Yamshchikova S. A., Antonov A. V., Daminev R. R., Latypova D. R., Turkin I. S., Israfilov E. I.** Analysis of chemical resistance of thermoplastic polymer coatings based on polyolefin in solutions of acids, salts and alkalis . . . . . 7
- Buka A. V., Kolontaeva T. V., Dyatlova E. M., Taratyn I. A., Popov R. Yu., Shevchenok A. A.** Ceramic materials based on compositions of modified lanthanum manganite and bismuth ferrite . . . . . 17

**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**

- Kachanov I. V., Vlasov V. V.** Power mode of high-speed extrusion of axisymmetric bimetallic rod products for instrumental purposes . . . . . 28

**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

- Yanko M. V., Chorny A. D., Zayats Ya. M.** On the calculation of droplet charging during corona discharge in the chamber of air ionic treatment of organic materials . . . . . 37
- Ol'shanskii A. I., Kotow A. A., Kuzmenkov S. M.** Moisture exchange kinetics and temperature during the process of convective drying of thin flat wet materials . . . . . 44

**RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING**

- Abetkovskaia S. O., Chizhik S. A., Guangbin Yu.** Tapping mode of an atomic force microscope with a probe cantilever of a low spring constant . . . . . 57
- Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V.** Influence of external background optical radiation on the flat view angle of silicon photomultiplier . . . . . 69

**INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS**

- Artemiev V. M., Naumov A. O., Khmarskiy P. A.** Verification of software for three-dimensional radio tomographic monitoring of electron density in the ionosphere based on data from the EUREF Permanent Network . . . . . 79

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**  
**MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY**

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-7-16>  
УДК 620.197.6



*Оригинальная статья*

**О. Р. Латыпов<sup>1\*</sup>, С. А. Ямщикова<sup>1</sup>, А. В. Антонов<sup>2</sup>, Р. Р. Даминев<sup>1</sup>, Д. Р. Латыпова<sup>1</sup>,  
И. С. Туркин<sup>2</sup>, Э. И. Исрафилов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования  
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»,  
ул. Космонавтов, 1, 450064, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация

<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью «УралЭнергоРесурс»,  
пр. Металлургов, 12, 455000, Магнитогорск, Челябинская область, Российская Федерация

**АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ  
ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИОЛЕФИНОВ  
В РАСТВОРАХ КИСЛОТ, СОЛЕЙ И ЩЕЛОЧЕЙ**

**Аннотация.** Разработан новый состав порошковой полимерной краски, обладающий высокой адгезией, химической стойкостью и достаточной механической прочностью. Исследования химической стойкости покрытий на основе порошковой полимерной краски проводили путем экспозиции образцов покрытия в растворах кислот, солей и щелочей с концентрациями 5, 10 и 15 %. Наблюдали изменения декоративных и защитных свойств термопластичного покрытия после экспозиции. Анализ поверхности покрытий показал, что исследуемые концентрации растворов солей, кислот и щелочей не оказывают существенного влияния на изменение декоративных и защитных свойств термопластичного покрытия. Особый интерес заключался в наблюдении коррозионного влияния среды в дефекте покрытия после выдержки образцов в растворах NaOH, NaCl и HCl с концентрацией 15 %. После экспозиции металлических образцов с дефектом термопластичного покрытия в растворе NaOH с концентрацией 15 % произошла пассивация металлической поверхности в дефекте, что видно по отсутствию продуктов коррозии после испытаний. В растворах 15 % NaCl и HCl визуально отмечено присутствие продуктов коррозии, при этом существенного отслоения покрытия в связи с нарушением адгезии не наблюдалось. Анализ изменения механических характеристик материала покрытия после его экспозиции в растворах кислот, солей и щелочей с концентрацией 10 % показал приемлемое снижение предела прочности: не более 10 % по сравнению с контрольными данными. Разработанное термопластичное покрытие рекомендуется к применению для нефтегазового оборудования в условиях воздействия коррозионных факторов.

**Ключевые слова:** порошковая полимерная краска, термопластичное покрытие, полиолефины, химическая стойкость, пластичность, адгезия

**Благодарности:** работа выполнена в рамках комплексного проекта по теме «Разработка состава многофункциональных покрытий на основе полиолефинов, технологии их производства и нанесения на стальные и бетонные поверхности для обеспечения коррозионной стойкости выпускаемого оборудования и конструкций» (договор от 21.10.2022 №13/ИЦ-88-22 о предоставлении субсидии в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 09.04.2010 № 218).

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** *Латыпов Олег Ренатович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и защита от коррозии» Уфимского государственного нефтяного технического университета. <https://orcid.org/0000-0002-4487-1516>. E-mail: o.r.latyrov@mail.ru; *Ямщикова Светлана Алексеевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и защита от коррозии» Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: svetamzk@mail.ru; *Антонов Антон Вячеславович* – главный технолог ООО «УралЭнергоРесурс». E-mail: antonov.av@mpp74.ru; *Даминев Рустем Рифович* – доктор технических наук,

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

профессор, директор Института нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: daminew@mail.ru; *Латыпова Дина Ринатовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и защита от коррозии» Уфимского государственного нефтяного технического университета. <https://orcid.org/0000-0002-0637-3313>. E-mail: d.r.latypova@mail.ru; *Туркин Иван Сергеевич* – заместитель генерального директора по перспективному развитию ООО «УралЭнергоРесурс»; *Исрафилов Эльдар Ильгамович* – преподаватель кафедры «Материаловедение и защита от коррозии» Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: israfilov.eld@yandex.ru

**Вклад авторов:** *Латыпов Олег Ренатович* – создание концепции, обобщение результатов исследования, работа с текстом рукописи; *Ямщикова Светлана Алексеевна* – работа с литературными источниками; *Антонов Антон Вячеславович* – нанесение покрытия на металлические образцы; *Даминев Рустем Рифович* – интерпретация результатов исследования; *Латыпова Дина Ринатовна* – проведение сравнительного анализа; *Туркин Иван Сергеевич* – обобщение результатов исследования; *Исрафилов Эльдар Ильгамович* – проведение экспериментов.

**Для цитирования:** Анализ химической стойкости термопластичных полимерных покрытий на основе полиолефинов в растворах кислот, солей и щелочей / О. Р. Латыпов, С. А. Ямщикова, А. В. Антонов [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 7–16. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-7-16>

Поступила в редакцию: 10.09.2024

Доработанный вариант: 18.12.2024

Утверждена к публикации: 06.03.2025

Подписана в печать: 12.03.2025

### Original article

Oleg R. Latypov<sup>1\*</sup>, Svetlana A. Yamshchikova<sup>1</sup>, Anton V. Antonov<sup>2</sup>, Rustem R. Daminev<sup>1</sup>,  
Dina R. Latypova<sup>1</sup>, Ivan S. Turkin<sup>2</sup>, Eldar I. Israfilov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Educational Institution of Higher Education “Ufa State Petroleum Technological University”,  
Department of Materials Science and Corrosion Protection,

1, Kosmonavtov St., 450064, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

<sup>2</sup>Limited Liability Company “UralEnergoResurs”,

12, Metallurgov Ave., 455000, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation

## ANALYSIS OF CHEMICAL RESISTANCE OF THERMOPLASTIC POLYMER COATINGS BASED ON POLYOLEFIN IN SOLUTIONS OF ACIDS, SALTS AND ALKALIS

**Abstract.** The team of authors has developed a new composition of powder polymer paint, which has a number of advantages – higher adhesion, chemical resistance and sufficient mechanical strength. Studies of the chemical resistance of coatings based on powder polymer paint were carried out by exposing coating samples to solutions of acids, salts and alkalis with concentrations of 5, 10 and 15 %. Changes in the decorative and protective properties of the thermoplastic coating were observed after exposure. Analysis of the coating surface showed that the studied concentrations of salt, acid and alkali solutions do not have a significant effect on the change in the decorative and protective properties of the thermoplastic coating. Of particular interest was the observation of the corrosive effect of the medium in the coating defect after keeping the samples in NaOH, NaCl and HCl solutions with a concentration of 15 %. After exposure of metal samples with a defect in thermoplastic coating to a 15 % NaOH solution, passivation of the metal surface in the defect occurred, which is evident from the absence of corrosion products after testing. In 15 % NaCl and HCl solutions, the presence of corrosion products was visually noted. However, no significant peeling of the coating due to adhesion failure was observed. An analysis of the change in the mechanical characteristics of the coating material after its exposure to solutions of acids, salts and alkalis with a concentration of 10 % showed an acceptable decrease in the tensile strength of no more than 10 % compared to the control data. The thermoplastic coating developed in this way is recommended for use in oil and gas equipment exposed to corrosive factors.

**Keywords:** powder polymer paint, thermoplastic coating, polyolefin, chemical resistance, plasticity, adhesion

**Acknowledgments:** the work was carried as part of a comprehensive project on the topic “Development of the composition of multifunctional coatings based on polyolefin, the technology of their production and application to steel and concrete surfaces to ensure corrosion resistance of manufactured equipment and structures” (agreement dated 10.21.2022 no. 13/IC-88-22 on the provision of a subsidy in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation dated 04.09.2010 No. 218).

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Oleg R. Latypov* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Materials Science and Corrosion Protection at Ufa State Petroleum Technological University. <https://orcid.org/0000-0002-4487-1516>. E-mail: o.r.latypov@mail.ru; *Svetlana A. Yamshchikova* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Materials Science and Corrosion Protection at Ufa State Petroleum Technological University. E-mail: svetamzk@mail.ru; *Anton V. Antonov* – Chief Technologist of “UralEnergoResurs” LLC. E-mail: antonov.av@mpp74.ru; *Rustem R. Daminev* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director at Institute of Oil and Gas Engineering and Digital Technologies of the Ufa State Petroleum Technological University. E-mail: daminew@mail.ru; *Dina R. Latypova* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Materials Science and Corrosion Protection at Ufa State Petroleum Technological University. <https://orcid.org/0000-0002-0637-3313>. E-mail: d.r.latypova@mail.ru; *Ivan S. Turkin* – Deputy

General Director for Prospective Development of “UralEnergResurs” LLC. E-mail: 79026050628@ya.ru; Eldar I. Israfilov – Lecturer of the Department of Materials Science and Corrosion Protection at Ufa State Petroleum Technological University. E-mail: israfilow.eld@yandex.ru

**Contribution of the authors:** Oleg R. Latypov – concept creation, generalization of research results, work with the manuscript text; Svetlana A. Yamshchikova – working with literature; Anton V. Antonov – application of coating to metal samples; Rustem R. Daminev – interpretation of research results; Dina R. Latypova – conducting a comparative analysis; Ivan S. Turkin – summary of research results; Eldar I. Israfilov – conducting experiments.

**For citation:** Latypov O. R., Yamshchikova S. A., Antonov A. V., Daminev R. R., Latypova D. R., Turkin I. S., Israfilov E. I. Analysis of chemical resistance of thermoplastic polymer coatings based on polyolefin in solutions of acids, salts and alkalis. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 7–16 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-7-16>

Received: 10.09.2024

Modified: 18.12.2024

Approved for publication: 06.03.2025

Signed to the press: 12.03.2025

**Введение.** Одним из наиболее эффективных способов защиты металлической поверхности оборудования от воздействия коррозионной среды является применение полимерных покрытий. В последнее время появилась необходимость расширения линейки общепринятых пленкообразователей. Лакокрасочные материалы на основе органических растворителей зачастую требуют особых условий нанесения: ограниченный интервал температур, тщательная подготовка поверхности, долгий период сушки и т. п., что весьма ограничивает область их применения. Для многих из них отсутствует возможность регулирования требуемой толщины, сплошности и омического сопротивления (например, для создания систем защитных покрытий подземных сооружений и трубопроводов). Стоит также отметить весьма узкий срок эксплуатации покрытий из жидких лакокрасочных материалов – в атмосферных условиях не более 10 лет. Наблюдается нарушение сплошности покрытий уже через 2–3 года после их нанесения на металлические покрытия в атмосферных условиях под воздействием низких температур и солнечной радиации. В связи с этим становится целесообразным распространение порошковых полимерных красок, из которых получают термореактивные и термопластичные покрытия. Однако требования к данному виду покрытий в нормативной документации полностью отсутствуют, так как статистика опыта их применения показана недостаточно.

Широкое применение в производстве антикоррозионных покрытий нашли термореактивные и термопластичные порошковые лакокрасочные материалы [1–3]. Главное их преимущество состоит в том, что термопластичные порошковые лакокрасочные материалы образуют покрытия за счет сплавления частиц и охлаждения полимерных расплавов без протекания химических превращений [4]. Состав образующихся при этом пленок соответствует составу исходного материала. Защитные покрытия обладают обратимыми свойствами при повторном нагревании, как и исходные термопластичные материалы, из которых они формируются. Термореактивные краски, наоборот, образуют покрытия за счет сплавления частиц и протекания последующих химических превращений. Химический состав покрытий из таких красок существенно отличается от своего первоначального. Образующиеся покрытия уже являются неплавкими и необратимыми [5–7]. Выбор того или иного состава покрытия связан прежде всего с условиями эксплуатации защищаемого оборудования, главным образом с уровнем агрессивности среды [8].

Расширение эксплуатационных свойств покрытий обеспечивается введением в их состав помимо пленкообразователя (полиэтилена) различных модификаторов [9]. Одним из способов модификации полиолефинов является их прививка малеиновым ангидридом. Количество сшивающих добавок составляет, как правило, 0,2–3,0 мас.% [10, 11]. При структурировании полиэтилена существенно меняется его структура: уменьшается степень кристалличности, изменяется морфология надмолекулярных структур, образуются мостичные связи, характер которых зависит от условий проведения процесса. Эти изменения в структуре положительно сказываются на свойствах полиэтилена и получаемых из него покрытий. В частности, снижается модуль упругости полимера и увеличиваются прочность при растяжении, относительное удлинение и адгезия покрытий. Запас прочности покрытий, представляющий собой отношение разрушающего

напряжения при растяжении к величине внутренних напряжений, возрастает от 2 до 5. Адгезия образцов к стали при структурировании увеличивается в 2–5 раз. Таким образом, вероятность растрескивания и отслаивания покрытий при длительной эксплуатации резко уменьшается.

Но, как и любой другой материал, полимерные материалы тоже подвергаются разрушению, что приводит к старению покрытий. Растворы агрессивных сред могут вызвать деградацию полимерных материалов, что способствует к потере их прочности, упругости и других свойств. Также существует вероятность того, что агрессивные среды обусловят потерю адгезии между полимерным покрытием и основным материалом. Воздействие агрессивных сред на термопластичное полимерное покрытие может вызвать также коррозию металлических поверхностей под покрытием, если они проникают сквозь поры и дефекты покрытия и взаимодействуют с металлом.

**Цель и задачи.** *Целью данной работы* была разработка оригинального состава порошковой полимерной краски на основе полиолефинов для ее нанесения в виде термопластичного покрытия на металлические конструкции, которые эксплуатируются в агрессивных природных и технологических средах. Разработанное термопластичное покрытие отличается повышенными значениями адгезии к металлу, прочности и пластичности, что дает возможность его применения как в области машиностроения, так и для защиты нефтегазового оборудования и трубопроводов от коррозии.

Для обеспечения заданных физико-химических свойств покрытия, необходимых при эксплуатации нефтегазового оборудования, была разработана порошковая полимерная краска, состоящая из термопластичного пленкообразователя на основе полиэтилена низкого давления, адгезива, антиоксидантов и пигмента. Размер частиц порошковой полимерной краски составлял от 165 до 315 мкм (рис. 1). Такой размер частиц необходим для обеспечения технологического процесса нанесения покрытия (исключает «пыление», слеживаемость при транспортировке и хранении).

Покрытия на основе полиолефинов наносятся газопламенным напылением, окунанием в псевдоожигженный слой и электростатическим напылением. Потери порошковой краски при ее нанесении на металлические и бетонные поверхности указанными способами по сравнению с жидкими лакокрасочными материалами значительно меньше, а качество образовавшегося покрытия является удовлетворительным в течение требуемого срока эксплуатации [12–14].

Задачами исследования являлись нанесение разработанной порошковой полимерной краски на основе полиолефинов на металлические образцы из стали 08пс (ГОСТ 1050–2013)<sup>1</sup> путем окунания в псевдоожигженный слой; изготовление образцов из порошковой полимерной краски для механических испытаний в виде лопаточек; экспозиция двух видов образцов в химических растворах; визуальная оценка изменения внешнего вида образцов покрытия; проведение меха-

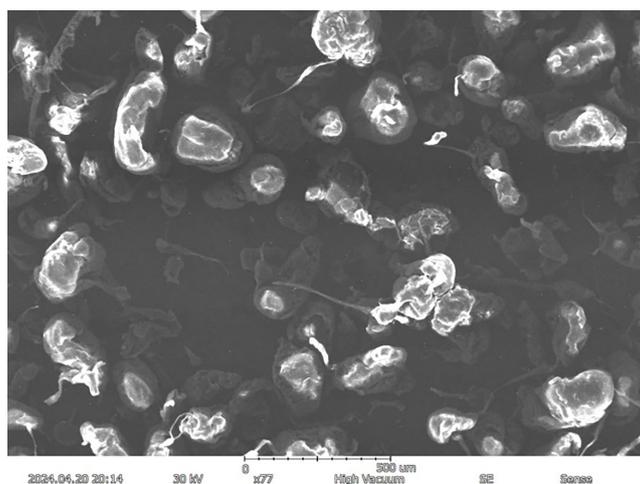


Рис. 1. Внешний вид частиц порошковой полимерной краски (77<sup>×</sup>)  
Fig. 1. Appearance of powder polymer paint particles (77<sup>×</sup>)

<sup>1</sup> ГОСТ 1050–2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. М.: Стандартинформ, 2014. 32 с.

нических испытаний лопаточек для определения предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве.

**Методика проведения исследования.** Методика исследования заключалась в оценке внешнего вида термопластичного полимерного покрытия на основе полиолефинов, нанесенного на металлические образцы из стали 08пс путем окунания в псевдоожигенный слой, и изменения механических свойств образцов в виде лопаток, выполненных из порошковой краски, после их экспозиции в следующих химических растворах: кислота соляная (HCl), натрий хлористый (NaCl) и натрия гидроксид (NaOH).

Метод основан на визуальном наблюдении изменения внешнего вида металлических образцов с нанесенным термопластическим покрытием и определении механических свойств образцов покрытий после воздействия агрессивных жидкостей в течение заданного времени. Для визуальной оценки дефектов использовали лупы типа ЛП увеличения  $4\times$  и  $10\times$ . Для механических испытаний применяли универсальную испытательную машину UTM 4204 (Китай).

Для исследования были подготовлены, четыре образца термопластичного покрытия, изготовленного в виде лопаточек, предназначенных для механических испытаний на разрывной машине, а также четыре образца из стали 08пс с нанесенным термопластичным полимерным покрытием методом псевдоожигенного слоя.

Чтобы оценить изменения механических характеристик после выдержки в агрессивных средах, образцы термопластичного покрытия в виде лопаточек испытывали на растяжение. Образцы-лопаточки изготовили следующим образом: взвесили навеску 37–39 г гранулы краски, равномерно распределили в пресс-форме, установили пресс-форму в нагретый до  $180\text{ }^\circ\text{C}$  пресс и прессовали расплавленные гранулы краски с нагрузкой 1500 кгс в течение 10 мин. Затем усилие прессы поднимали до 20 000 кгс и прессовали течение 7 мин, охладили пресс-форму, не снижая давления, и вырубili лопаточки из получившейся полимерной пластины по ГОСТ 11262–2017<sup>1</sup>, тип образца 1, толщиной 1 мм, размером  $115 \times 24$  мм и шириной 5 мм в месте разрыва.

На рис. 2 показан один из образцов, подготовленных для испытаний.

Поверхность металлических образцов из стали 08пс размером  $70 \times 150$  мм очистили от твердых включений путем пескоструйной очистки, обезжирили ацетоном, равномерно нагрели в сушильном шкафу до температуры  $270\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$ , погрузили нагретую деталь в псевдоожигенный слой термопластичной краски в ванне и выдержали в течение 6 с, затем охладили. Толщина термопластичного покрытия составляла  $0,5 \pm 0,05$  мм.

Полученные образцы вертикально погружали в эксикатор с агрессивным раствором таким образом, чтобы расстояние между ними и стенками эксикатора было не менее 10 мм, и закрывали крышкой. Для обеспечения вертикального положения образец помещали между двумя стеклянными палочками, опирающимися концами в стенки эксикатора. Стержни подвешивали за крючки на стеклянные палочки, опирающиеся концами в стенки эксикатора. Стеклянные палочки закрепляли над жидкостью в верхней части эксикатора. Уровень жидкости в процессе испытаний поддерживался постоянным. По мере уменьшения уровня жидкости она добавлялась.

Испытания на химическую стойкость к воздействию растворов HCl, NaCl и NaOH проводили при температуре  $(20 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 7 сут. Концентрации растворов составляли 5, 10 и 15 %. После испытаний образцы извлекали из раствора и готовили к осмотру: промывали проточной водой и высушивали фильтровальной бумагой.

Первоначально для исследования были подготовлены 5%-ные растворы NaCl, NaOH, HCl. В качестве растворителя использовалась дистиллированная вода. Оба вида исследуемых образцов (из стали 08пс с нанесенным покрытием и в виде лопаточек) были погружены в лабораторные стаканы с растворами для испытания таким образом, чтобы они не соприкасались со стенками стакана, а расстояние между ними составляло не менее 10 мм. При этом уровень жидкости оставался постоянным и покрывал исследуемые образцы на  $2/3$  их высоты.



Рис. 2. Внешний вид образца для испытания в виде лопаточки  
Fig. 2. Appearance of the test sample in the form of a spatula

<sup>1</sup> ГОСТ 11262–2017 (ISO 527-2:2012). Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2018. 20 с.

Для обеспечения вертикального положения в специальный крючок для закрепления пластинки были установлены деревянные палочки таким образом, чтобы их концы упирались в края лабораторных стаканов. После этого стаканы с помещенными в них образцами были плотно накрыты полиэтиленовой пленкой для исключения испарения растворов. Температура жидкости при проведении испытания составляла  $(20 \pm 2)$  °С.

После проведения испытания в течение 7 сут образцы извлекались из растворов агрессивных сред. Далее образцы с исследуемым покрытием промывались проточной водой и высушивались фильтровальной бумагой.

Таким же образом проводилась экспозиция образцов с покрытиями в 10%-ном и 15%-ном растворах NaCl, NaOH, HCl. Состав и концентрация химических растворов были выбраны в соответствии с рекомендациями ГОСТ 9.403–2022<sup>1</sup>.

Затем путем сопоставления с контрольным образцом были определены изменения декоративных и защитных свойств покрытия в соответствии с ГОСТ 9.407–2022<sup>2</sup> (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Оценка изменения декоративных и защитных свойств термопластичного покрытия в соответствии с ГОСТ 9.407–2022 в 15%-ных растворах NaCl, NaOH, HCl

Table 1. Evaluation of changes in decorative and protective properties of thermoplastic coating in accordance with GOST 9.407–2022 in 15% solutions of NaCl, NaOH, HCl

Метод оценки внешнего вида Appearance assessment method	Номер таблицы по ГОСТ 9.407–2022 Table number according to GOST 9.407–2022	Балл разрушения Destruction score	Характеристика разрушений Characteristics of destruction
Степень изменения блеска Degree of gloss change	4	0	Изменения отсутствуют There are no changes
Степень изменения цвета покрытия Degree of color change of the coating	5	0	Изменения отсутствуют There are no changes
Степень изменения грязеудержания покрытия Degree of change in the dirt retention of the coating	6	0	Изменения отсутствуют There are no changes
Степень изменения при определении меления Degree of change in the determination of chalking	7	0	На ткани частицы пигмента отсутствуют There are no pigment particles on the fabric
Степень растрескивания покрытия Degree of cracking of the coating	8	0	Отсутствие трещин No cracks
Степень отслаивания покрытий Degree of peeling of coatings	9	0	Отслаивание отсутствует There is no peeling
Степень изменения покрытия при определении выветривания Degree of change in the coating when determining weathering	10	0	Отсутствие дефектов Absence of defects
Степень образования пузырей (вздутий) Degree of formation of bubbles (blisters)	–	0	Отсутствие образования пузырей No bubble formation

После осмотра образцы термопластичного покрытия, выполненные в виде лопаточек, подвергали механическим испытаниям. Полимерное покрытие считали стойким к химическому сопротивлению коррозии, если после испытаний значение предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве составляло 95 % или более от начального значения.

Образцы закрепляли в зажимы испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов, таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой. Зажимы равномерно затягивали, чтобы исключить скольжение образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушение в месте закрепления.

<sup>1</sup> ГОСТ 9.403–2022. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Методы испытаний на стойкость к статическому воздействию жидкостей. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2022. 9 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 9.407–2022. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2022. 14 с.

Во время испытания измерялись нагрузка и удлинение образца непрерывно или в моменты достижения предела текучести, максимальной нагрузки, разрушения образца.

Прочность при растяжении полиэтилена согласно ГОСТ 11262–2017 должна превосходить значение 12 МПа, относительное удлинение после экспозиции в химических растворах при разрыве – 95 % и более.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты эксперимента показали, что декоративные и защитные свойства термопластичного покрытия после экспозиции в растворах не изменились.

Методом Х-образного надреза была проведена визуальная оценка адгезивных свойств покрытия после отслаивания приклеенной к нему липкой ленты в соответствии с ГОСТ 32702.2–2014<sup>1</sup>. Метод показал отсутствие отслаивания или удаления покрытия, балл разрушения был равен 0, что свидетельствует о хорошей адгезии покрытия к поверхности металла.

Далее для оценки изменения защитных свойств термопластичного полимерного покрытия в условиях сквозного дефекта образцы после испытаний адгезионных свойств поместили в растворы 15 % гидроксида натрия, хлорида натрия и соляной кислоты. На рис. 3, *a* представлен внешний вид образцов с Х-образными надрезами. После 7 сут экспозиции образцы с покрытием были промыты проточной водой и высушены фильтровальной бумагой. На рис. 3, *b* показан внешний вид образцов после экспозиции в 15%-ных растворах NaCl, NaOH, HCl.

Испытуемое термопластичное полимерное покрытие показало хорошую стойкость к статическому воздействию агрессивных сред, что свидетельствует о его высокой химической стойкости и хорошей адгезии к металлическому основанию. Эти параметры важны для долговечности и эффективности термопластичного полимерного покрытия в средах эксплуатации.

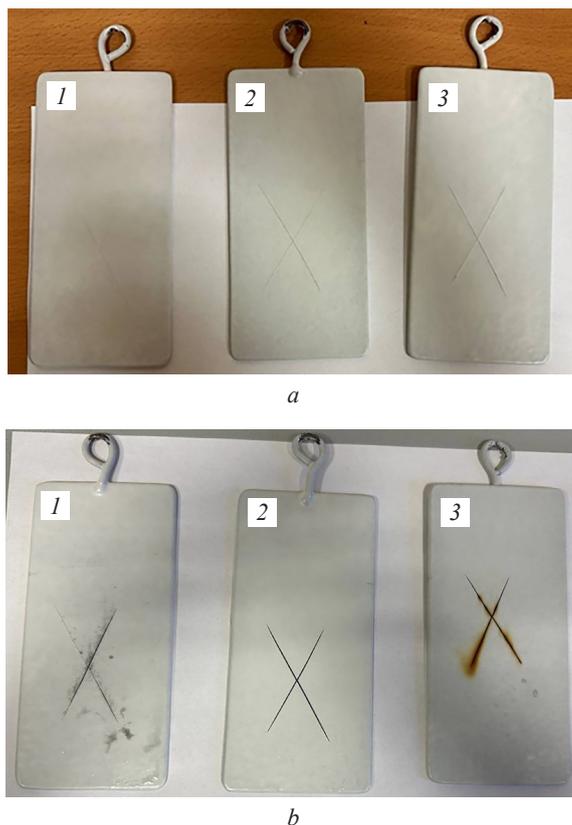


Рис. 3. Внешний вид Х-образных надрезов на образцах из стали 08пс с нанесенным термопластичным полимерным покрытием: *a* – перед испытаниями; *b* – после экспозиции в течение 7 сут в 15%-ных растворах NaCl (1), NaOH (2), HCl (3)

Fig. 3. Appearance of X-shaped incisions on 08ps steel samples with a thermoplastic polymer coating: *a* – before testing; *b* – after exposure for 7 days in 15% solutions of NaCl (1), NaOH (2), HCl (3)

<sup>1</sup> ГОСТ 32702.2–2014. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом Х-образного надреза. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.

В табл. 2 показаны результаты определения стойкости термопластичного покрытия к статическому воздействию водных растворов солей, кислот, щелочей.

Таблица 2. Результаты определения стойкости термопластичного покрытия к статическому воздействию водных растворов солей, кислот, щелочей  
Table 2. Results of determining the resistance of thermoplastic coating to static action of aqueous solutions of salts, acids, alkalis

Агрессивная среда Aggressive environment	Балл разрушения Destruction score	Характеристика разрушения Characteristics of destruction
Соляная кислота (HCl) 15 % Hydrochloric acid (HCl) 15 %	2	Выкрашивание покрытия вдоль любого из надрезов шириной до 1,5 мм Chipping of the coating along any of the incisions up to 1.5 mm wide
Гидроксид натрия (NaOH) 15 % Sodium hydroxide (NaOH) 15 %	0	Отсутствие отслаивания или удаления покрытия No peeling or removal of the coating
Хлорид натрия (NaCl) 15 % Sodium chloride (NaCl) 15 %	3	Выкрашивание покрытия на большом количестве надрезов шириной до 3,0 мм Chipping of the coating on a large number of incisions up to 3.0 mm wide

Данные табл. 2 свидетельствуют о воздействии различных коррозионных сред. В растворе щелочи произошла пассивация металлической поверхности в дефекте покрытия, что видно по отсутствию продуктов коррозии после испытаний. В растворах 15 % NaCl и HCl визуально отмечено присутствие продуктов коррозии (см. рис. 3, а). Это связано с тем, что ионы хлора свободно проникают в дефекты покрытия и тем самым вызывают появление растворимых продуктов хлорида железа. С учетом стадийности электрохимических процессов в растворе кислоты протекает процесс водородной деполяризации, что, однако, не вызвало сильного отслоения покрытия от поверхности металла. В растворе соли, наоборот, количество ионов гидроксония ограничено и процесс электрохимической коррозии протекает с кислородной деполяризацией. В результате этого процесса гидроксил-ионы способствуют нарушению адгезионных связей.

С целью выявления изменения прочности полимерного материала в выбранных условиях подготовленные плоские образцы термопластичного покрытия устанавливали на экспозицию также в щелочном, кислотном и солевом растворах с концентрацией 10 % в течение 7 сут.

Далее проводили испытания на растяжение. Внешний вид кривых «напряжение – деформация» для полимерных материалов имеют схожесть с типичными кривыми растяжения полимерных материалов с ярко выраженным на кривой пределом текучести, что позволило рассчитать изменение предела прочности образцов после испытания.

**Результаты и их обсуждение.** Исходя из полученных данных обработки построены графики, характеризующие средние значения пределов прочности в зависимости от среды, в которой выдерживались образцы перед испытанием на разрыв (рис. 4).

Видно, что предел прочности материала снижается после выдержки в растворах щелочи, соли и кислоты не более 10 % по сравнению с контрольными данными. При этом наибольшее влияние на снижение предела прочности оказывают щелочные среды, наименьшее воздействие – растворы соли. Однако такое снижение прочности и пластичности не оказывает существенного влияния на сплошность термопластичного покрытия, нанесенного на металлическую поверхность. Диффузия компонентов коррозионной среды сквозь структуру покрытия незначительна, в связи с чем развитие подпленочной коррозии затруднительно, а покрытие обеспечивает анодную поляризацию металла под ним.

Результаты испытания показали высокую стойкость к статическому воздействию разработанного термопластичного покрытия на основе полиэтилена в растворах солей, кислот и щелочей. Такие покрытия могут применяться для защиты от коррозии насосного оборудования, резервуаров и аппаратов, контактирующих с агрессивной средой. При этом покрытия можно наносить как на внутреннюю, так и на внешнюю поверхность контактирующего с растворами скважинного оборудования для кислотной обработки скважин, содержащих до 15 об.% соляной кислоты, которое в связи с этим имеет очень ограниченный срок эксплуатации. Одним из перспективных направлений применения термопластичного полимерного покрытия на основе полиолефинов может стать изоляция сварных швов и соединений магистральных трубопроводов.

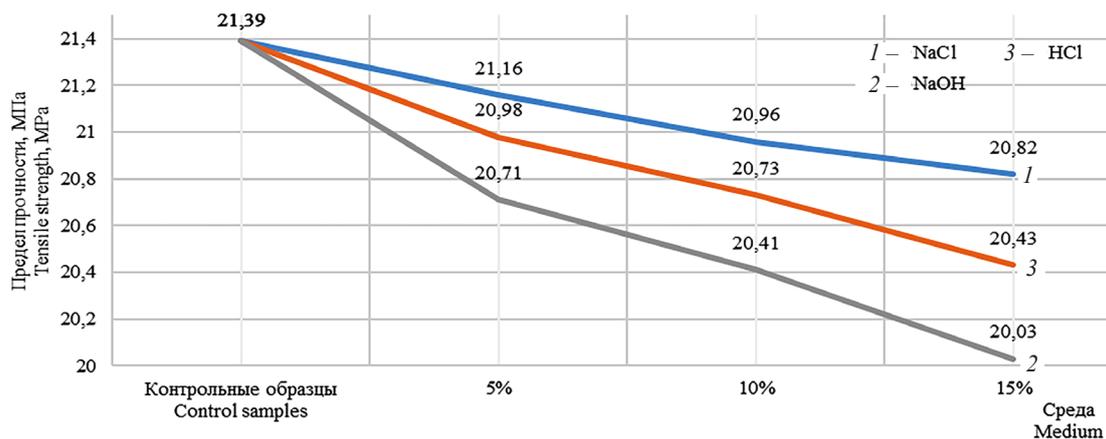


Рис. 4. Изменение предела прочности при растяжении после экспозиции в растворах в NaCl, NaOH, HCl с концентрацией 5, 10 и 15 %

Fig. 4. Change in tensile strength after exposure to solutions in NaCl, NaOH, HCl with a concentration of 5, 10 and 15 %

**Заклучение.** В ходе исследований возможности применения полимерных термопластичных покрытий на основе полиолефинов была разработана новая рецептура порошковой полимерной краски, состоящая из термопластичного пленкообразователя на основе полиэтилена низкого давления, адгезива, антиоксидантов и пигмента, обладающая улучшенными физико-химическими свойствами – повышенной адгезией и химической стойкостью.

Оценка химической стойкости поверхности термопластичного покрытия после экспозиции покрытия в растворах кислот, солей и щелочей с концентрациями 5, 10 и 15 % показала полное отсутствие изменения его декоративных и защитных свойств.

В процессе экспозиции металлических образцов с дефектом термопластичного покрытия в растворе NaOH с концентрацией 15 % произошла пассивация металлической поверхности в дефекте, что видно по отсутствию продуктов коррозии после испытаний. В растворах 15 % NaCl и HCl визуально отмечено присутствие продуктов коррозии. Однако существенного отслоения покрытия в связи с нарушением адгезии не наблюдалось.

Анализ изменения механических характеристик материала покрытия после его экспозиции в растворах кислот, солей и щелочей с концентрацией 10 % показал приемлемое снижение предела прочности – не более 10 % по сравнению с контрольными данными. После испытаний значение относительного удлинения при разрыве составило более 95 % от начального значения.

Разработанное термопластичное покрытие рекомендуется к применению для нефтегазового оборудования в условиях воздействия коррозионных факторов.

#### Список использованных источников

1. Шишенок, М. В. Современные полимерные материалы / М. В. Шишенок. – Минск: Выш. шк., 2017. – 273 с.
2. Бондарь, М. А. Разработка состава интеллектуального покрытия для защиты от коррозии оборудования нефтепереработки / М. А. Бондарь, О. Р. Латыпов, Д. Е. Бугай // Инженерная физика. – 2023. – № 7. – С. 3–6.
3. Прокопчук, Н. Р. Химия и физика пленкообразующих веществ / Н. Р. Прокопчук, А. Л. Шутова, П. П. Казаков. – Минск: БГТУ, 2014. – 365 с.
4. Разработка компонентного состава порошковой краски с антистатическими свойствами на основе полиэфирной смолы / Л. Н. Наумова, В. Ю. Ватаман, Н. А. Сущенко, С. Н. Гетманов // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 2, Биология. Геоология. Химия. Экология. – 2023. – № 2 (26). – С. 54–69. <https://doi.org/10.34130/2306-6229-2023-2-54>
5. Разработка состава интеллектуального покрытия для защиты нефтеперерабатывающего оборудования от коррозии / М. А. Бондарь, О. Р. Латыпов, Д. Р. Латыпова [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20, № 2. – С. 111–119. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-2-111-119>
6. Spyrou, E. Powder Coatings: Chemistry and Technology / E. Spyrou. – 3<sup>rd</sup> ed. – Vincentz Network, 2012. – 380 p. <https://doi.org/10.1515/9783748602361>
7. Барабанов, С. Н. Исследование технологических параметров порошковых покрытий / С. Н. Барабанов, Т. Е. Карасева // Научные горизонты. – 2023. – № 6 (70). – С. 91–96.
8. Yamshchikova, S. A. Selection of Protective Coating System for Tank Inner Surface / S. A. Yamshchikova, O. A. Nasibullina // Materials Scientific Forum. – 2023. – Vol. 1083. – P. 178–182. <https://doi.org/10.4028/p-660lid>

9. Maleic anhydride grafted onto high density polyethylene with an enhanced grafting degree via monomer microencapsulation / I. Rahayu, A. Zainuddin, Y. T. Malik, S. Hendrana // *Heliyon*. – 2020. – Vol. 6, Iss. 4. – Art. ID e03742. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03742>
10. Yuncan, Zhang. Functionalization of polyolefins with maleic anhydride in melt state through ultrasonic initiation / Yuncan Zhang, Jinyao Chen, Huilin Li // *Polymer*. – 2006. – Vol. 47, Iss. 13. – P. 4750–4759. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.04.040>
11. Study on application performance of oxidized polyethylene wax in powder coatings / Wenxue Wang, Yujue Wang, Ziliang Liu [et al.] // *Progress in Organic Coatings*. – 2019. – Vol. 136. – Art. ID 105294. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105294>
12. Оценка физико-механических свойств термопластичного покрытия на основе полиолефинов / О. Р. Латыпов, С. А. Ямщикова, А. В. Антонов [и др.] // *Нефтегазовое дело*. – 2024. – № 5. – С. 177–192. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2024-5-177-192>
13. Разработка рецептуры порошковой полимерной краски для защиты нефтегазовых объектов от коррозии / О. Р. Латыпов, С. А. Ямщикова, А. В. Антонов [и др.] // *Нефтегазовое дело*. – 2024. – № 4. – С. 91–110. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2024-4-91-110>
14. Современные возможности применения порошковых лакокрасочных материалов в нефтегазовой отрасли / О. Р. Латыпов, С. А. Ямщикова, А. В. Антонов [и др.] // *Башкирский химический журнал*. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 76–80.

## References

1. Shishonok M. V. *Modern Polymer Materials*. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 2017. 273 p. (in Russian).
2. Bondar M. A., Latypov O. R., Bugai D. E. Development of an intelligent coating composition for corrosion protection of oil refining equipment. *Inzhenernaya fizika = Engineering Physics*, 2023, no. 7, pp. 3–6 (in Russian).
3. Prokopchuk N. R., Shutova A. L., Kazakov P. P. *Chemistry and Physics of Film-Forming Substances*. Minsk, BSTU Publ., 2014. 365 p. (in Russian).
4. Naumova L. N., Vataman V. Yu., Sushchenko N. A., Getmanov S. N. Development of the component composition of powder paint with antistatic properties based on polyester resin. *Vestnik Syktyvskarskogo universiteta. Seriya 2. Biologiya, geologiya, himiya, ekologiya = Syktyvkar University Bulletin. Series 2. Biology, Geology, Chemistry, Ecology*, 2023, no. 2 (26), pp. 54–69 (in Russian). <https://doi.org/10.34130/2306-6229-2023-2-54>
5. Bondar M. A., Latypov O. R., Latypova D. R., Kueli A. K., Tlyasheva R. R., Bugai D. E. Development of an intelligent coating composition to protect oil refining equipment from corrosion. *Neftgazovoye delo = Petroleum Engineering*, 2022, vol. 20, no. 2, pp. 111–119 (in Russian). <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-2-111-119>
6. Spyrou E. *Powder Coatings. Chemistry and Technology*. 3<sup>rd</sup> ed. Vincentz Network, 2012. 380 p. <https://doi.org/10.1515/9783748602361>
7. Barabanov S. N., Karaseva T. E. Research of technological parameters of powder coatings. *Nauchnyye gorizonty [Scientific Horizons]*, 2023, no. 6 (70), pp. 91–96 (in Russian).
8. Yamshchikova S. A., Nasibullina O. A. Selection of Protective Coating System for Tank Inner Surface. *Materials Science Forum*, 2023, vol. 1083, pp. 178–182. <https://doi.org/10.4028/p-6601d>
9. Rahayu I., Zainuddin A., Malik Y. T., Hendrana S. Maleic anhydride grafted onto high density polyethylene with an enhanced grafting degree via monomer microencapsulation. *Heliyon*, 2020, vol. 6, iss. 4, art. ID e03742. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03742>
10. Yuncan Zhang, Jinyao Chen, Huilin Li. Functionalization of polyolefins with maleic anhydride in melt state through ultrasonic initiation. *Polymer*, 2006, vol. 47, iss. 13, pp. 4750–4759. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.04.040>
11. Wenxue Wang, Yujue Wang, Ziliang Liu, Yuying Han, Chuanxing Wang. Study on application performance of oxidized polyethylene wax in powder coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2019, vol. 136, art. ID 105294. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105294>
12. Latypov O. R., Yamshchikova S. A., Antonov A. V., Daminev R. R., Latypova D. R., Turkin I. S., Bondar M. A., Israfilov E. I. Evaluation of physical and mechanical properties of thermoplastic coating based on polyolefins. *Neftgazovoye delo = Petroleum Engineering*, 2024, no. 5, pp. 177–192 (in Russian). <https://doi.org/10.17122/ogbus-2024-5-177-192>
13. Latypov O. R., Yamshchikova S. A., Antonov A. V., Daminev R. R., Latypova D. R., Turkin I. S., Bondar M. A., Israfilov E. I. Development of a formula for powder polymer paint to protect oil and gas facilities from corrosion. *Neftgazovoye delo = Petroleum Engineering*, 2024, no. 4, pp. 91–110 (in Russian). <https://doi.org/10.17122/ogbus-2024-4-91-110>
14. Latypov O. R., Yamshchikova S. A., Antonov A. V., Daminev R. R., Latypova D. R., Turkin I. S. Modern Possibilities of Using Powder Coatings in the Oil and Gas Industry. *Bashkirskiy khimicheskij zhurnal = Bashkir Chemical Journal*, 2024, vol. 31, no. 3, pp. 76–80 (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-17-27>

УДК 621



*Оригинальная статья*

А. В. Бука<sup>1</sup>, Т. В. Колонтаева<sup>2\*</sup>, Е. М. Дятлова<sup>1</sup>, И. А. Таратын<sup>2</sup>,  
Р. Ю. Попов<sup>1</sup>, А. А. Шевченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет,  
ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет,  
пр. Независимости, 99, 220012, Минск, Республика Беларусь

## КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИЙ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МАНГАНИТА ЛАНТАНА И ФЕРРИТА ВИСМУТА

**Аннотация.** Исследованы композиционные материалы на основе керамики с улучшенными электрофизическими свойствами – модифицированные манганит лантана и феррит висмута. Оптимизирована технология синтеза манганита лантана и проведена модификация оксидом кальция с целью изменения антиферромагнитной решетки  $\text{LaMnO}_3$ , что обусловило магнитные и структурные превращения. Синтезирован феррит висмута, модифицированный ионами  $\text{La}^{3+}$ . Композиции составляли из модифицированных керамических фаз. Рентгенофазовый анализ образцов исходных керамических фаз и их композиций проводился на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker (Германия). Чтобы идентифицировать кристаллические фазы использовали международную картотеку Joint Committee on Powder Diffraction Standards 2003 и программное обеспечение MATCH фирмы Crystal Impact. Для синтеза применяли керамическую технологию. Спекание проводилось при температуре 950–1050 °С с выдержкой 2 ч при максимальной температуре. Исследованы физико-химические и электрические свойства, структура полученного материала, установлены механизмы поляризации. Синтезированные материалы могут быть использованы для изготовления интегрированных исполнительных элементов приборов и устройств автоматики.

**Ключевые слова:** манганит лантана, феррит висмута, керамический материал, модификация, поляризация

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** Бука Алексей Валентинович – магистр технических наук, аспирант кафедры технологии стекла и керамики Белорусского государственного технологического университета. E-mail: lesha\_buka@hotmail.com; Колонтаева Татьяна Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета. <https://orcid.org/0000-0003-1195-7193>. E-mail: tatkolontaeva@mail.ru; Дятлова Евгения Михайловна – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры технологии стекла и керамики Белорусского государственного технологического университета. E-mail: tatkolontaeva@mail.ru; Таратын Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета. <https://orcid.org/0000-0002-4386-3397>. E-mail: mems@bntu.by; Попов Ростислав Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики Белорусского государственного технологического университета. <https://orcid.org/0000-0001-5716-9593>. E-mail: gosporov@mail.ru; Шевченко Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин Белорусского государственного аграрного технического университета. E-mail: saa.fiz@bsatu.by

**Вклад авторов:** Бука Алексей Валентинович – создание модели исследования, пробоподготовка образцов, синтез материала, формулировка выводов, написание статьи; Колонтаева Татьяна Владимировна – сбор и систематизация данных, написание статьи, редактирование текста рукописи; Дятлова Евгения Михайловна – обоснование концепции исследования, анализ экспериментальных данных; Таратын Игорь Александрович – проведение инструментальных исследований; Попов Ростислав Юрьевич – проведение сравнительного анализа; Шевченко Александр Аркадьевич – проведение инструментальных исследований.

**Для цитирования:** Керамические материалы на основе композиций модифицированных манганита лантана и феррита висмута / А. В. Бука, Т. В. Колонтаева, Е. М. Дятлова [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 17–27. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-17-27>

Поступила в редакцию: 24.12.2024

Доработанный вариант: 05.02.2025

Утверждена к публикации: 06.03.2025

Подписана в печать: 12.03.2025

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

*Original article*

Aleksey V. Buka<sup>1</sup>, Tatyana V. Kolontaeva<sup>2\*</sup>, Evgenia M. Dyatlova<sup>1</sup>, Igor A. Taratyn<sup>2</sup>, Rostislav Yu. Popov<sup>1</sup>,  
Alexander A. Shevchenok<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University,  
13a, Sverdlov St., 220006, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University,  
65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Belarusian State Agrarian Technical University,  
99, Nezavisimosti Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus

**CERAMIC MATERIALS BASED ON COMPOSITIONS  
OF MODIFIED LANTHANUM MANGANITE AND BISMUTH FERRITE**

**Abstract.** Composite materials based on ceramics with improved electrophysical properties, such as modified lanthanum manganite and bismuth ferrite, are studied. The technology of lanthanum manganite synthesis has been optimized and modified with calcium oxide in order to change the antiferromagnetic lattice of  $\text{LaMnO}_3$ , which caused magnetic and structural transformations. Bismuth ferrite modified with  $\text{La}^{3+}$  ions has been synthesized. The compositions were composed of modified ceramic phases. X-ray phase analysis of samples of the initial ceramic phases and their compositions was carried out on a Bruker D8 ADVANCE diffractometer (Germany). To identify the crystalline phases, we used the international Joint Committee on Powder Diffraction Standards 2003 file and the MATCH software from Crystal Impact. Ceramic technology was used for synthesis. Sintering was carried out at a temperature of 950–1050 °C with an exposure time of 2 hours at a maximum temperature. The physicochemical and electrical properties, the structure of the obtained material are investigated, and the mechanisms of polarization are established. The synthesized materials can be used to manufacture integrated actuating elements of devices and automation devices.

**Keywords:** lanthanum manganite, bismuth ferrite, ceramic material, modification, polarization

**Conflict of interest:** authors declare no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Aleksey V. Buka* – Master of Engineering Sciences, Postgraduate Student of the Glass and Ceramics Techno-Logic Department at Belarusian State Technological University. E-mail: lesha\_buka@hotmail.com; *Tatyana V. Kolontaeva* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanotechnics at Belarusian National Technical University. <https://orcid.org/0000-0003-1195-7193>. E-mail: tatkolontaeva@mail.ru; *Evgenia M. Dyatlova* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher of the Department of Glass and Ceramics Technology at Belarusian State Technological University. E-mail: tatkolontaeva@mail.ru; *Igor A. Taratyn* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanotechnics at Belarusian National Technical University. <https://orcid.org/0000-0002-4386-3397>. E-mail: mems@bntu.by; *Rostislav Yu. Popov* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Glass and Ceramics Technology at Belarusian State Technological University. E-mail: rospopov@mail.ru; *Alexander A. Shevchenok* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Natural Sciences at Belarusian State Agrarian Technical University. E-mail: saa.fiz@bsatu.by

**Contribution of the authors:** *Alexey V. Buka* – creation of a study model, sample preparation of samples, synthesis of material, formulation of conclusions, writing an article; *Tatyana V. Kolontaeva* – data collection and systematization, writing an article, manuscript text editing; *Evgenia M. Dyatlova* – substantiation of the study concept, analysis of experimental data; *Igor A. Taratyn* – instrumental investigations; *Rostislav Yu. Popov* – comparative analysis; *Alexander A. Shevchenok* – instrumental investigations.

**For citation:** Buka A. V., Kolontaeva T. V., Dyatlova E. M., Taratyn I. A., Popov R. Yu., Shevchenok A. A. Ceramic materials based on compositions of modified lanthanum manganite and bismuth ferrite. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 17–27 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-17-27>

Received: 24.12.2024

Modified: 05.02.2025

Approved for publication: 06.03.2025

Signed to the press: 12.03.2025

**Введение.** В связи с бурным развитием электронной техники возникает острая необходимость в разработке новых керамических и композиционных материалов, обладающих комплексом диэлектрических, сегнето- и пьезоэлектрических, магнитных характеристик. Такие материалы могут быть использованы для изготовления интегрированных исполнительных элементов приборов и устройств автоматики.

Особый интерес в настоящее время представляют материалы, сочетающие в себе сегнето-электрические и магнитные свойства, а также обладающие высоким магнетосопротивлением и радиопоглощающим эффектом [1, 2]. Этот уникальный комплекс свойств имеют манганиты металлов, некоторые ферриты, а также композиции на их основе.

Манганіты – новы клас керамічных матэрыялаў, якія маюць здольнасць значна змяняць электрычнае супраціўленне пад дзеяннем магнітнага поля [3].

Феррыты – гэта аксідныя магнітныя матэрыялы са структурай іонных крышталюў, іх асабнасцю з'яўляецца сацыяна свайстваў дыэлектрыкаў, палупруваднікаў і ферромагнітыкаў, што прыводзіць да шырокаму выкарыстанню феррытаў у якасці кампанентаў радыаэлектронікі, аўтаматыкі, СВЧ-устаноў [4].

*Цель настоящей работы* – синтез і даследаванне кампазіцый на аснове мадыфіцыраваных манганіта лантана і феррыта вісмута.

Как известно, манганіт лантана – унікальная сістэма, у якой звязаны электронныя, магнітныя і рэштчатыя свайства матэрыялаў, рэгуляванне якіх можа быць ажыццэвана змяненнем іх хімічнага сацыяна і допіраваннем структуры [5]. У манганітах лантана найбольш важнымі фактарамі, якія ўплываюць на структурныя пераўтварэнні, з'яўляюцца сацыяна адносіны катіонаў  $Mn^{3+}$  к  $Mn^{4+}$ , а таксама прысутнасць дадатковага кісларода.

При определенных условиях часть  $Mn^{3+}$  переходит в  $Mn^{4+}$ , что вызывает изменение структурной модификации манганіта і яго характэрыстык.

Повышение содержания  $Mn^{4+}$  до 24 % обуславливает изменение орторомбической структуры на ромбоэдрическую модификацию. Такой переход также возможен при повышении температуры одновременным поворотом кислородных октаэдров  $MnO_6$  вдоль направления [111]. Замена ионов лантана или марганца другими катионами может влиять на степень окисления марганца, способствовать обмену между ионами и таким образом изменять магнитное поведение  $LaMnO_3$  или его электрычныя характэрыстыкі.

**Методы синтеза и исследования.** Для даследавання ў якасці аднаго з кампанентаў кампазіцыі намі выкарыстаны манганіт лантана, мадыфіцыраваны аксідом кальцыя, які ўводзіўся пры эквімолекулярнай замене аксіда лантана ў колькасці 5–10 %. Галоўнай мэтай мадыфікацыі стала сацыянаванне антыферромагнітнай рэшткі  $LaMnO_3$ , сацыяна з'яўляецца з ферромагнітных слаёў іона  $Mn$ , пры гэтым чаредуючыя плоскасці мелі процівапаложныя арыентацыі спіноў. Пры замене трывалентнага атома  $La$  двухвалентным атамом другога элемента ўзнікала спонтанная намагнічанасць у крышталюў  $LaMnO_3$ , пры гэтым у некаторым інтэрвале канцэнтрацый адзначалася з'яўленне металічнай феррымагнітнай фазы<sup>1</sup>.

Введение оксидов кальция в качестве легирующей добавки уменьшило расщепление энергии  $Mn^{3+}$  вблизи иона  $Ca^{2+}$  (эффект Яна–Теллера), при этом отмечено меньшее расщепление энергии  $Mn^{3+}$  вблизи вакансий иона  $La^{3+}$  и возникновение  $Mn^{4+}$  вблизи иона  $Ca^{2+}$ , что энергетически выгодно. Также при температурах ниже комнатных в легированном манганіте лантана наблідаліся як магнітныя, так і структурныя пераўтварэнні<sup>2</sup>.

Следует отметить, что оксид кальция интенсифицирует процесс спекания манганіта лантана за счет образования более легкоплавких эвтектик с компонентами массы, снижения вязкости расплава, что способствует более эффективному заполнению порового пространства спекаемой сістэмы<sup>3</sup>.

Модифицированный оксидом кальция манганіт лантана, синтезаваны пры тэмпературы 1300 °С, маюць наступнымі фізіка-хімічнымі характэрыстыкамі: кажуццая шчыльнасць – 3985 кг/м<sup>3</sup>; вадопоглыбленне – 3,2 %; адкрытая парасістасць – 12,8 %.

Электрыфізічныя свайства апрацовак вызначаны пры частаце 1 кГц ў тэмпературным інтэрвале 20–600 °С без прыложэння магнітнага поля і пры яго ўздзеянні са магнітнай індукцыяй 0,25 Тл. Удзельнае электрычнае супраціўленне апрацовак мае нізкія значэнні (1,2–6,8 Ом · см), са павышэннем тэмпературы вымярэння яно зніжаецца па экспаненцыянальнаму закону. Пад дзеяннем магнітнага поля характэры тэмпературнай залежнасці электрычнага супраціўлення сахраняецца, но яго значэнні змяняюцца на 15–20 %. Па даным [6] антыферромагнітныя кластэры, прысут-

<sup>1</sup> Исследование особенностей синтеза манганітаў металюў (III) і іх твёрдых раствороў са феррытамі ў сацыяна са мадыфікатарамі структуры пры выкарыстанні метада высокатэмпературнага спекавання і экзатэрмічных рэакцый ў растворах: ачыт о НИР (промежут.) / Беларус. гос. тэхнол. ун-т; рук. Е. М. Дятлова; ісполн. А. В. Бука. Мінск, 2021. 84 с. Рег. № 20211615.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> Там же.

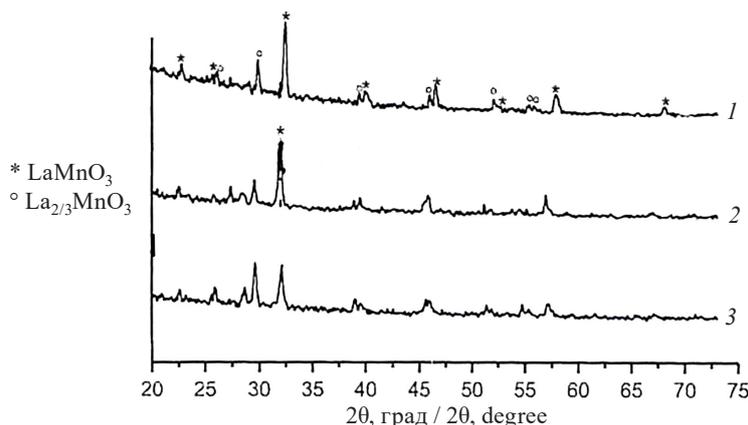


Рис. 1. Дифрактограммы опытного образца  $\text{LaMnO}_3$ , обожженного при различных температурах: кривая 1 – при 1300 °C; кривая 2 – при 1200 °C; кривая 3 – при 1100 °C

Fig. 1. Diffractograms of the prototype composition  $\text{LaMnO}_3$ , fired at various temperatures: curve 1 – at 1300 °C; curve 2 – at 1200 °C; curve 3 – at 1100 °C

ствующие в легированном манганите лантана, переходят во внешнем магнитном поле в ферромагнитное состояние, снижая тем самым электрическое сопротивление образцов.

Важно отметить, что диэлектрическая проницаемость материала имеет довольно низкие значения ( $\epsilon \approx 100$ ), так как образующиеся кристаллические фазы находятся в параэлектрической области, и поляризация происходит за счет переориентации ионов и деформации электронного облака<sup>1</sup>. Диэлектрические потери, характеризующиеся тангенсом угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ), складываются в основном из потерь на проводимость и в меньшей степени – на поляризацию материала и составляют 0,072–0,096 (в температурном интервале 20–600 °C).

Рентгенофазовый анализ образцов исходных керамических фаз и их композиций проводился на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker (Германия), детектор – сцинтилляционный счетчик. Для идентификации кристаллических фаз использовалась международная картотека Joint Committee on Powder Diffraction Standards 2003 и программное обеспечение MATCH фирмы Crystal Impact.

Исследован фазовый состав образца манганита лантана  $\text{LaMnO}_3$ . Химический состав соединения представлен оксидами в мол. %: ( $\text{La}_2\text{O}_3$ –50;  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ –50), в мас. %: ( $\text{La}_2\text{O}_3$ –67,3;  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ –32,7). Дифрактограммы  $\text{LaMnO}_3$ , прошедшего обжиг при температурах 1100–1300 °C, представлены на рис. 1.

Согласно данным рентгенофазового анализа основной кристаллической фазой в синтезированных материалах является  $\text{LaMn}^{3+}\text{O}_3$ , которая начинает формироваться в температурном интервале 500–600 °C, с увеличением температуры обжига ее количество растет, о чем свидетельствуют более интенсивные основные дифракционные максимумы в области угла  $2\theta$  – 27–33°. В качестве дополнительной фазы в керамике фиксируется  $\text{La}_{2/3}\text{Mn}^{4+}\text{O}_3$ , поскольку среда обжига нейтрально-окислительная, однако, судя по небольшим дифракционным максимумам, ее количество незначительно.

В качестве второго компонента для получения композиции  $\text{LaMnO}_3$ – $\text{BiFeO}_3$  использован модифицированный феррит висмута, синтезированный методом высокотемпературного спекания. Мультиферроик  $\text{BiFeO}_3$  представляет собой двойной перовскит со сложной пространственно-модулированной магнитной структурой циклоидного типа (G-типа) с достаточно высокими температурами антиферромагнитного ( $T_N = 367$  °C) и сегнетоэлектрического ( $T_k = 827$  °C) фазовых переходов, что делает возможным его использование в широком диапазоне температур, включая стандартные [7].

<sup>1</sup> Разработка интеллектуальных нанокомпозитов на основе полимеров и металлооксидов для интегрированных исполнительных элементов приборов и устройств автоматики : отчет о НИР (заключ.) / Белорус. гос. технол. ун-т; рук. Е. М. Дятлова; исполн.: Р. Ю Попов, А. В. Бука. Минск, 2020. 180 с. Рег. № 20161733.

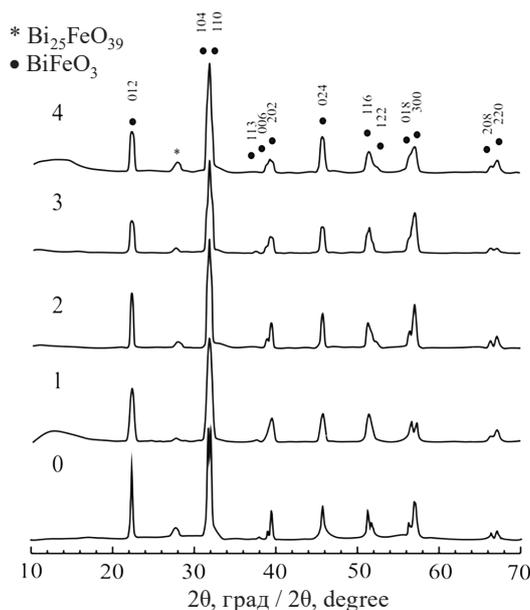


Рис. 2. Дифрактограмма опытного образца  $\text{BiFeO}_3$ , прошедшего термообработку при различных температурах и времени прокаливания. Температурно-временные параметры: 0 – необожженный; 1 – 800 °C (30 мин); 2 – 650 °C (180 мин); 3 – 800 °C (10 мин); 4 – 900 °C (30 мин)

Fig. 2. Diffractogram of a  $\text{BiFeO}_3$  prototype that has undergone heat treatment at various temperatures and calcination times. Temperature and time parameters: 0 – unburned; 1 – 800 °C (30 min); 2 – 650 °C (180 min); 3 – 800 °C (10 min); 4 – 900 °C (30 min)

В качестве модификатора структуры  $\text{BiFeO}_3$  выбраны ионы  $\text{La}^{3+}$ , которые имеют ионный радиус ( $r = 1,16 \text{ \AA}$ ), близкий к ионному радиусу  $\text{Bi}^{3+}$  ( $r = 1,17 \text{ \AA}$ ), что позволяет производить их взаимозамену, практически не деформируя решетку феррита висмута. В экспериментальных композициях использован модифицированный феррит висмута состава  $\text{Bi}_{0,9}\text{La}_{0,1}\text{FeO}_3$ . Данный мультиферроик характеризуется следующими свойствами: кажущаяся плотность – 4040 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение – 1,39 %, диэлектрическая проницаемость – 2210, тангенс угла диэлектрических потерь – 0,034, коэрцитивная сила – 64 кА/м, остаточная индукция – 1400 Э.

Температура синтеза модифицированного феррита висмута не превышает 900 °C.

Исследован фазовый состав образца феррита висмута  $\text{BiFeO}_3$ . Химический состав соединения представлен оксидами в мол. %: ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ –50;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ –50), в мас. %: ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ –74,5;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ –25,5).

На рис. 2 представлены дифрактограммы опытного образца  $\text{BiFeO}_3$ , прошедшего термообработку при различных температурах и времени прокаливания.

Фазовый состав материала представлен в основном ферритом  $\text{BiFeO}_3$  с небольшим количеством примесной фазы  $\text{Bi}_{24}\text{Fe}_2\text{O}_{39}$ .

Структура материала однородная, мелкокристаллическая, размер кристаллов 1–3 мкм.

При сравнении указанных составляющих композиций можно отметить, что феррит висмута отличается более высокими показателями диэлектрической проницаемости и электрического сопротивления по сравнению с манганитом лантана. Диэлектрические потери близки по своим значениям. Размеры кристаллов модифицированного  $\text{BiFeO}_3$  ниже, чем у  $\text{LaMnO}_3$ , а температура его спекания равна 850–900 °C (на 300–350 °C меньше).

Для дальнейшего исследования были выбраны составы композиций на основе модифицированных манганита лантана и феррита висмута, соотношения между которыми варьировались от 20 : 80 до 80 : 20 мол. %, или от 16,1 : 83,9 до 75,6 : 24,4 мас. %.

Для синтеза модифицированных  $\text{LaMnO}_3$  и  $\text{BiFeO}_3$  использованы оксиды необходимых элементов марок «хч» и «чда». Некоторые оксиды в процессе хранения гидратируются, содержат физическую, физико-химическую и даже химически связанную воду (особенно оксид лантана), что было учтено при расчете сырьевых смесей.

Исходные кристаллические фазы были синтезированы при ранее определенных оптимальных условиях и измельчены в планетарной мельнице до остатка на сите № 0063 менее 1 %. Из порошков синтезированных кристаллических фаз готовились опытные смеси в микрошаровой мельнице, куда также в качестве связки вводился 10%-ный раствор клея ПВА в количестве 3 %.

Изготовление образцов диаметром 10–12 мм и высотой 1,5 мм из указанных композиций осуществлялось полусухим двухступенчатым прессованием на гидравлическом прессе при давлении 40–50 МПа. Температура обжига опытных образцов была выбрана исходя из оптимальных температур спекания составляющих ее компонентов ( $\text{LaMnO}_3$  и  $\text{BiFeO}_3$ ) и находилась в пределах 950–1050 °C с выдержкой при максимальной температуре 2 ч.

Установлено, что степень спекания опытных образцов зависит как от состава композиций, так и от температуры обжига. Чем выше содержание  $\text{BiFeO}_3$  в композиции, тем ниже водопоглощение и выше плотность образцов, что вполне закономерно, поскольку температура спекания этой кристаллической фазы составляет около 850 °C. На образцах, содержащих 60 мол.% и более феррита висмута, при температуре обжига 1050 °C наблюдались признаки пережога в виде вспучивания и деформации образцов.

**Результаты и их обсуждение.** Значения основных свойств образцов в зависимости от температуры обжига приведены в табл. 1.

Таблица 1. Водопоглощение ( $B$ ) и кажущаяся плотность ( $\rho_k$ ) опытных композиций в зависимости от состава и температуры обжига ( $T_{\text{обж}}$ )

Table 1. Water absorption ( $B$ ) and apparent density ( $\rho_k$ ) of experimental compositions depending on the composition and firing temperature ( $T_{\text{обж}}$ )

Номер композиции Composition number	Молярное соотношение $\text{LaMnO}_3/\text{BiFeO}_3$ Molar ratio $\text{LaMnO}_3/\text{BiFeO}_3$	$T_{\text{обж}} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_{\text{обж}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_{\text{обж}} = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$	
		$B, \%$	$\rho_k, \text{кг/м}^3$ $\rho_k, \text{kg/m}^3$	$B, \%$	$\rho_k, \text{кг/м}^3$ $\rho_k, \text{kg/m}^3$	$B, \%$	$\rho_k, \text{кг/м}^3$ $\rho_k, \text{kg/m}^3$
1	8:2	12,6	3260	8,9	3480	5,2	3640
2	6:4	9,2	3610	6,4	3610	3,8	3910
3	4:6	6,8	3680	4,8	3980	Деформация образцов Deformation of samples	
4	2:8	2,6	4100	1,8	4380		

Графическая зависимость водопоглощения и плотности опытных образцов от температуры обжига представлены на рис. 3 и 4. Для образцов составов серии № 3 и 4 при температуре обжига 1050 °C наблюдался «пережог», данные физико-химических свойств отсутствуют.

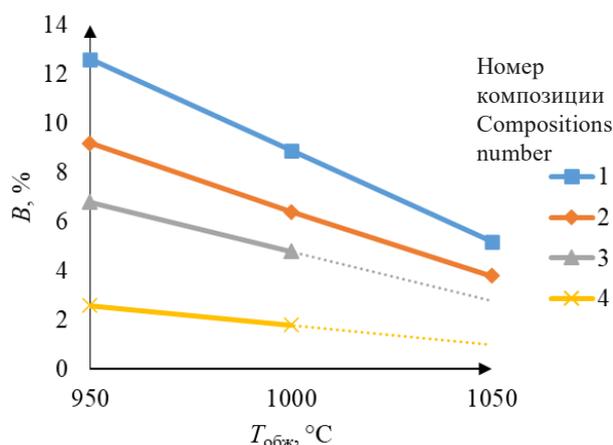


Рис. 3. Зависимость водопоглощения ( $B$ ) образцов композиций 1–4 от температуры обжига ( $T_{\text{обж}}$ )

Fig. 3. Dependence of the water absorption ( $B$ ) of samples of compositions 1–4 on the firing temperature ( $T_{\text{обж}}$ )

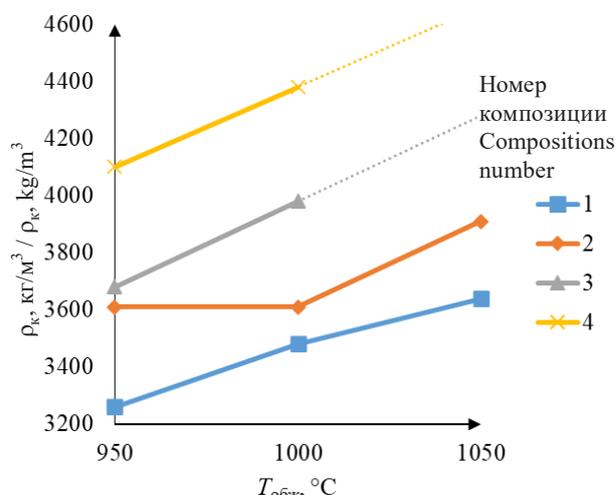


Рис. 4. Зависимость кажущейся плотности ( $\rho_k$ ) образцов композиций 1–4 от температуры обжига ( $T_{\text{обж}}$ )

Fig. 4. Dependence of the apparent density ( $\rho_k$ ) of samples of compositions 1–4 on the firing temperature ( $T_{\text{обж}}$ )

Устаноўлена, што плотнасць абразцов змяняецца ў межах 3260–4380 кг/м<sup>3</sup> і на ўзвышэнне яе значэнняў уплываюць два фактары – тэмпература абжыга, спосабаючая масапереносу і запоўненню пор, і істинная плотнасць феррыта вісмута, якая намяно прывышае плотнасць манганіта лантана.

Дзіэлектрычныя характэрыстыкі опытных кампазіцый, прашедшых абжыг пры 1000 °С, вызначаны пры частотах 1 кГц і 1 МГц і тэмпературы 20 °С. Значэнне дзіэлектрычнай праніцаемасці і тангенса угла дзіэлектрычных страт прадставлены ў табл. 2.

Табліца 2. Значэння дзіэлектрычнай праніцаемасці ( $\epsilon$ ) і тангенса угла дзіэлектрычных страт ( $\text{tg}\delta$ ) ў залежнасці ад састава і частоты электрычнага поля  
 Table 2. Values of the dielectric constant ( $\epsilon$ ) and the tangent of the dielectric loss angle ( $\text{tg}\delta$ ) depending on the composition and frequency of the electric field

Номер кампазіцыі Composition number	Частота 1 кГц Frequency 1 kHz		Частота 1 МГц Frequency 1 MHz	
	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$
1	110	0,61	96	0,76
2	145	0,36	142	0,52
3	308	0,18	298	0,16
4	410	0,09	385	0,11

Как видно из приведенных данных, значения дзіэлектрычнай праніцаемасці ( $\epsilon$ ) саставляюць 110–410 і ўзвышваюцца з павышэннем колькасці  $\text{BiFeO}_3$ , но эта залежнасць не носіць поўнасьцю аддытыўны характэр, так как структура кампазіта неаднародная, састаящая из фаз, значытельно атычаюцца по степені і механізму полярызацыі.

На рыс. 5 прадставлена залежнасць дзіэлектрычнай праніцаемасці ( $\epsilon$ ) ад іспользуемай частоты ( $f$ ).

Результаты ізымерення тангенса угла дзіэлектрычных страт ( $\text{tg}\delta$ ) ў залежнасці ад частоты ізымерення ( $f$ ) прыводзяцца на рыс. 6.

Для дзіэлектрыкаў тыпа манганітаў і феррытаў характэрна сааэтаенне несаколькіх відаў полярызацыі. Это электронная полярызацыя – упругое смяшчэнне і дэфармацыя электронных оболочек атомаў і іонаў. Она характэрна для любых дзіэлектрыкаў, не залежыць ад тэмпературы і частоты электрычнага поля, протекае мгновенно в течеенне  $10^{-15}$  с.

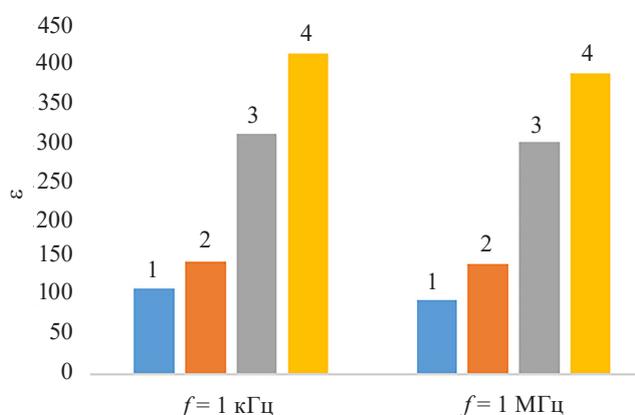


Рис. 5. Залежнасць дзіэлектрычнай праніцаемасці ( $\epsilon$ ) опытных кампазіцый 1–4 ад частоты ( $f$ )

Fig. 5. Dependence of the dielectric constant ( $\epsilon$ ) of the experimental compositions 1–4 on the frequency ( $f$ )

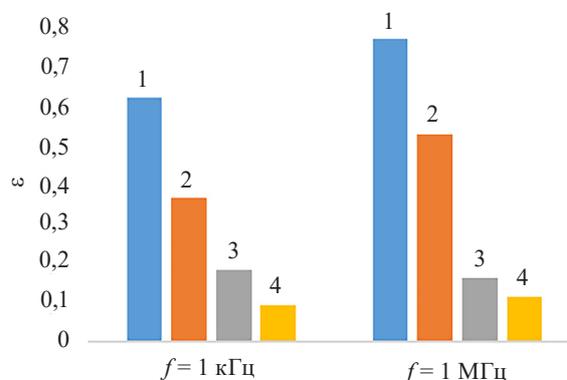


Рис. 6. Залежнасць тангенса угла дзіэлектрычных страт ( $\text{tg}\delta$ ) опытных кампазіцый 1–4 ад частоты ( $f$ )

Fig. 6. Dependence of the tangent of the dielectric loss angle ( $\text{tg}\delta$ ) of the experimental compositions 1–4 on the frequency ( $f$ )

Имеет место также ионная поляризация, обусловленная смещением упругосвязанных ионов под действием электрического поля, которая протекает также мгновенно ( $10^{-13}$  с) и практически не зависит от частоты электрического поля, но с повышением температуры она усиливается за счет большей подвижности ионов.

Указанные виды поляризации обуславливают невысокие значения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) системы, поэтому исходя из экспериментальных данных можно предположить наличие в некоторой степени более сильной спонтанной (дипольной) поляризации за счет переориентации имеющихся в композиции доменов.

С увеличением количества модифицированного феррита висмута, вероятно, значительно повышается доля спонтанной поляризации системы по сравнению с другими ее видами, поэтому значения диэлектрической проницаемости возрастают почти в 4 раза. Наличие этого вида поляризации подтверждается снижением значений  $\epsilon$  при повышении частоты электрического поля, а поскольку спонтанная поляризация происходит не мгновенно, на переориентацию доменов необходимо определенное время [8]. Диэлектрические потери ( $\text{tg}\delta$ ), наоборот, увеличиваются с повышением  $\text{LaMnO}_3$ , что закономерно, так как это соединение характеризуется более высокой проводимостью, что способствует росту тангенса угла диэлектрических потерь. Следует отметить, что значения  $\text{tg}\delta$  композиций согласуются с данными [9], а значения  $\epsilon$  значительно выше (в 2–3 раза).

Рентгенофазовый анализ композиционных материалов свидетельствует о наличии двух кристаллических фаз манганита лантана и феррита висмута, имеются в небольшом количестве и примесные фазы, которые были зафиксированы в исходных синтезированных материалах (см. рис. 1 и 2).

Оптическая микроскопия образцов композиций № 1 и 4, результаты которой представлены на рис. 7 и 8, свидетельствует о микронеоднородности структуры композитов. Видно, что раз-



a

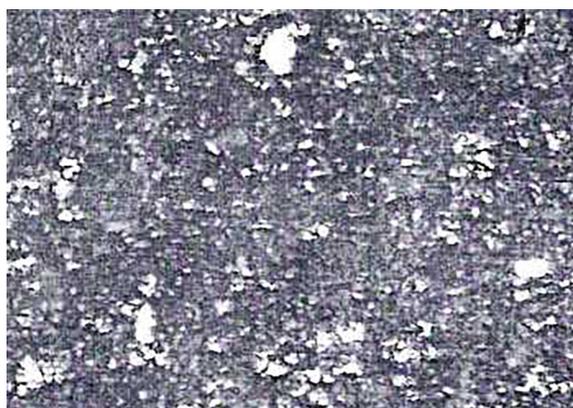


b

Рис. 7. Оптические снимки поверхности образцов композиций № 1 (a) и № 4 (b). Увеличение  $100\times$   
Fig. 7. Optical images of the surface of samples of compositions no. 1 (a) and no. 4 (b). Magnification  $100\times$



*a*



*b*

Рис. 8. Оптические снимки поверхности образцов композиций № 1 (*a*) и № 4 (*b*). Увеличение 500<sup>×</sup>  
 Fig. 8. Optical images of the surface of sample compositions no. 1 (*a*) and no. 4 (*b*). Magnification 500<sup>×</sup>

мер зерен увеличивается при переходе от  $\text{ViFeO}_3$  к  $\text{LaMnO}_3$ , поскольку изначально субстанция модифицированного феррита висмута была более тонкодисперсная, чем у манганита лантана. Размеры кристаллов колеблются от 1 до 10–15 мкм. В образце состава № 1 (80 мол.%  $\text{LaMnO}_3$ ) наблюдаются агрегаты кристаллов около 40–45 мкм.

На основании проведенных исследований был выбран оптимальный состав композиции, содержащий 40 мол.% манганита лантана и 60 мол.% феррита висмута. Физико-химические и электрофизические свойства состава, обожженного при температуре 1000 °С с выдержкой при максимальной температуре 2 ч, представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Свойства образца оптимального состава  
 T a b l e 3. Properties of a sample of optimal composition

Свойство, единица измерения Property, unit of measurement	Показатель Indicator
Водопоглощение, % Water absorption, %	4,8
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup> Apparent density, kg/m <sup>3</sup>	3680
Диэлектрическая проницаемость при частоте 1 кГц Dielectric constant at frequency 1 kHz	308
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 кГц Tangent of dielectric loss angle at frequency 1 kHz	0,18
Диэлектрическая проницаемость при частоте 1 МГц Dielectric constant at frequency 1 MHz	298
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 МГц Tangent of dielectric loss angle at frequency 1 MHz	0,16

Благодаря своим свойствам, керамические мультиферроики позволяют вести исследования в различных направлениях с целью создания не только порошковых материалов, но и функциональных покрытий

**Заключение.** В результате выполненного исследования разработаны опытные керамические материалы на основе композиции модифицированного манганита лантана и феррита висмута. В частности оптимизирована технология синтеза манганита лантана, подобраны температурно-временные режимы, обеспечивающие воспроизводимость результатов. Спекание проводилось при температуре 950–1050 °С с выдержкой 2 ч при максимальной температуре. Проведена модификация четырех композиций оксидом кальция в количестве 5–10 % при эквимолекулярной замене оксида лантана. Также был синтезирован феррит висмута, модифицированный ионами  $\text{La}^{3+}$ . Композиции составляли из модифицированных керамических фаз. Для синтеза применяли керамическую технологию.

Исследованы основные физико-химические и электрические свойства композиций, структура материалов. Установлены механизмы поляризации. В связи с чувствительностью структуры керамических материалов-мультиферроиков к различным факторам, исследования будут продолжаться в направлении изучения формирования магнитной структуры материалов и основных магнитных характеристик.

Синтезированные материалы могут быть рекомендованы для использования и изготовления различных компонентов электронной техники, элементов спин-оптики с заданным комплексом сегнетоэлектрических и магнитных свойств, а также в качестве электродов для ячеек с твердым электролитом и других целей.

### Список использованных источников

1. Синтез и рентгенографическое исследование новых наноструктурированных медно-цинковых манганитов, содержащих щелочные металлы / Б. К. Касенов, Ш. Б. Касенова, Ж. И. Сагинтаева [и др.] // *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2021. – Vol. 18, № 1 (35). – P. 29–33. <https://doi.org/10.31489/2021No1/29-33>
2. Disorder-driven ferromagnetic insulator phase in manganite heterostructures / Zhongyuan Jiang, Haoliang Huang, Jie Zhang [et al.] // *Ceramics International*. – 2022. – Vol. 48, Iss. 6. – P. 8374–8379. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.043>
3. Гермов, А. Ю. Ядерный магнитный резонанс в электронно-допированных кубических манганитах  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$ ; дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.11 / Гермов Александр Юрьевич; Ин-т физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН. – Екатеринбург, 2018. – 116 л.
4. Бадаев, А. С. Физические основы микроэлектроники. Физические свойства твердых тел: учеб. пособие / А. С. Бадаев, А. В. Чернышев. – Воронеж: ГОУВПО «ВГТУ», 2011. – 294 с.
5. Пчелина, Д. И. Мессбауэровские исследования фазового расщепления манганитов лантана, легированных атомами стронция: дис. ... маг. физ.-мат. наук: 03.04.02 / Пчелина Диана Игоревна; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – М., 2018. – 64 л.
6. Методы синтеза  $\text{LaMnO}_3$ : обзор / А. Г. Рудская, М. П. Васенко, С. В. Чаговец [и др.] // *Инженерный вестник Дона*. – 2013. – Т. 25, вып. 2. – С. 78–91. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1724>
7. Effect of Ho substitution on structure and magnetic property of  $\text{BiFeO}_3$  prepared by sol-gel method / Y. Q. Liu, Y. J. Wang, J. Zhang [et al.] // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2015. – Vol. 40. – P. 787–795. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.06.090>
8. Глазкова, Я. С. Синтез и зондовая мессбауэровская диагностика перовскитоподобных манганитов  $\text{AMn}_7\text{O}_{12}$  (A = Ca, Sr, Cd, Pb) и  $\text{AMnO}_3$  (A = Tl, Bi): дис. ... канд. хим. наук: 01.04.07 / Глазкова Яна Сергеевна; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – М., 2017. – 154 л.
9. Фисенко, Е. Г. Семейство перовскитов и сегнетоэлектричество / Е. Г. Фисенко. – М.: Атомиздат, 1972. – 248 с.

### References

1. Kasenov B. K., Kasenova Sh. B., Sagintaeva Zh. I., Nukhuly A., Turtubaeva M. O., Bekturganov Zh. S., Zeinidenov A. K., Kuanyshbekov E. E., Isabaeva M. A. Synthesis and X-ray examination of new nanostructured copper-zinc manganites containing alkali metals. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2021, vol. 18, no. 1 (35), pp. 29–33 (in Russian). <https://doi.org/10.31489/2021No1/29-33>
2. Zhongyuan Jiang, Haoliang Huang, Jie Zhang, Mengmeng Yang, Qian Li, Jianlin Wang, Zhengping Fu, [et al.]. Disorder-driven ferromagnetic insulator phase in manganite heterostructures. *Ceramics International*, 2022, vol. 48, iss. 6, pp. 8374–8379. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.043>
3. Hermov A. Yu. *Nuclear Magnetic Resonance in Electron-Doped Cubic Manganites  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$*  [dissertation]. Yekaterinburg, 2018. 116 p. (in Russian).

4. Badaev A. S., Chernyshev A. V. *Physical Foundations of Microelectronics. Physical Properties of Solids*. Voronezh, Voronezh State Technical University, 2011. 294 p. (in Russian).
5. Pchelina D. I. *Mossbauer Studies of the Phase Separation of Lanthanum Manganites Doped with Strontium Atoms* [dissertation]. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2018. 64 p. (in Russian).
6. Rudskaya A. G., Vlasenko M. P., Chagovets S. V., Nazarenko A. V., Teslenko P. Yu., Razumnaya A. G., Kofanova N. B., Kupriyanov M. F. Methods of LaMnO<sub>3</sub> synthesis: review. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2013, vol. 25, iss. 2, pp. 78–91. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1724> (in Russian).
7. Liu Y. Q., Wang Y. J., Zhang J., Gao M., Zhang Y. J., Wei M. B., Yang J. H. Effect of Ho substitution on structure and magnetic property of BiFeO<sub>3</sub> prepared by sol–gel method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, vol. 40, pp. 787–795. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.06.090>
8. Glazkova Ya. S. *Synthesis and Probe Mossbauer Diagnostics of Perovskite-Like Manganites AMn<sub>7</sub>O<sub>12</sub> (A = Ca, Sr, Cd, Pb) and AMnO<sub>3</sub> (A = Tl, Bi)* [dissertation]. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2017. 154 p. (in Russian).
9. Fisenko E. G. *The Perovskite Family and Ferroelectricity*. Moscow, Atomizdat Publ., 1972. 248 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**  
**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-28-36>  
УДК 531.781.2Оригинальная статья**И. В. Качанов, В. В. Власов\****Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь***СИЛОВОЙ РЕЖИМ СКОРОСТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ  
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ  
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Аннотация.** Приводится математическая модель, разработанная для расчета силового воздействия на пуансон при скоростном ударном выдавливании осесимметричного ступенчатого стержневого инструмента (пуансоны, толкатели, фрезы и т. д.). В основу модели положен двухэтапный переход, который реализуется по схемам «прямоугольник – квадрат», «квадрат – круг». При этом переход от квадрата к кругу осуществляется при условии равенства площадей поперечных сечений, что позволяет сохранить практически неизменным кинематически возможное поле линий скольжения, включая годографы скоростей и ускорений, при переходе от плоской к осесимметричной деформации. Первый переход в разработанной модели реализуется путем преобразования (адаптации) полученных ранее расчетных уравнений для формообразования прямоугольной заготовки в уравнения для анализа силового режима при выдавливании стержневого инструмента с квадратным сечением на всех ступенях. На втором переходе полученные уравнения для анализа силового режима работы пуансона при плоской деформации квадратной заготовки из условия равенства площадей адаптируются для анализа осесимметричной деформации на основе использования соотношений  $D_i(d_i) = 1,128A_i(a_i)$ ,  $A_i(a_i) = 0,886D_i(d_i)$ , в которых  $D_i(d_i)$  – искомые диаметры круглых сечений осесимметричной детали, которые определяются по известным значениям сторон  $A_i(a_i)$  квадратных сечений детали, сформированной в условиях плоской деформации. Предложенная схема расчета силовых параметров процесса скоростного ударного выдавливания позволяет оперативно рассчитать силовой режим формирования для любого стержневого ступенчатого инструмента с осесимметричной (круглой) формой поперечных ступеней, используя для этого классический метод верхней оценки. С учетом корректных допущений указанный метод эффективно применяется только для анализа скоростной ударной деформации плоских ступенчатых стержневых изделий. Используя предложенную методику технологии, в производственных условиях можно оперативно пересчитать силовой режим формоизменения с плоской на осесимметричную деформацию и на этом основании подобрать оборудование (чеканочный либо кривошипно-шатунный прессы, штамповочный молот и т. д.), необходимое для реализации процесса изготовления инструмента.

**Ключевые слова:** скоростное выдавливание, стержневой биметаллический инструмент, метод верхней оценки, равенство площадей, баланс мощности внешних и внутренних сил

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** Качанов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» Белорусского национального технического университета; Власов Вячеслав Владимирович – старший преподаватель кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» Белорусского национального технического университета. E-mail: vlasov881988@mail.ru

**Вклад авторов:** Качанов Игорь Владимирович – предложил идею пересчета уравнений силового режима формоизменения полученных для плоской на осесимметричной деформаций; Власов Вячеслав Владимирович – разработал конкретную схему силового режима, а также годографов скоростей и ускорений при переходе с плоской на осесимметричную деформацию, основанную на принципе равенства поперечных площадей квадратной и круглой заготовок.

**Для цитирования:** Качанов, И. В. Силовой режим скоростного выдавливания осесимметричных биметаллических стержневых изделий инструментального назначения / И. В. Качанов, В. В. Власов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 28–36. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-28-36>

Поступила в редакцию: 26.11.2024

Утверждена к публикации: 06.03.2025

Подписана в печать: 12.03.2025

### Original article

Igor V. Kachanov, Viacheslav V. Vlasov\*

Belarusian National Technical University,  
65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus

## POWER MODE OF HIGH-SPEED EXTRUSION OF AXISYMMETRIC BIMETALLIC ROD PRODUCTS FOR INSTRUMENTAL PURPOSES

**Abstract.** A mathematical model developed to calculate the force impact on a punch during high-speed impact extrusion of axisymmetric stepped rod tools (punches, pushers, cutters, etc.) is described in the article. The model is based on a two-stage transformation, which is implemented according to the scheme “rectangle – square”, “square – circle”. At the same time, the transformation from square to circle is implemented under the condition of equality of cross-sectional areas, which allows keeping practically unchanged the kinematically possible field of slip lines, including velocity and acceleration hodographs during the transformation from plane to axisymmetric deformation. The first transformation in the developed model is accomplished by transforming (adapting) the previously obtained calculation equations for forming a rectangular workpiece into equations for analyzing the force regime during extrusion of a rod tool with a square cross-section at all stages. During the second transformation the obtained equations for the analysis of the force mode of the punch operation at flat deformation of a square workpiece from the condition of equality of squares are adapted for the analysis of axisymmetric deformation on the basis of using the relations  $D_i(d_i) = 1.128A_i(a_i)$ ,  $A_i(a_i) = 0.886D_i(d_i)$ , in which  $D_i(d_i)$  – are the required diameters of circular sections of axisymmetric workpiece which are determined by the known values of sides  $A_i(a_i)$  of square sections of the workpiece formed under conditions of flat deformation. The proposed scheme for calculating the power parameters of the high-speed impact extrusion process makes it possible to quickly calculate the power mode of formation for any rod step tool with an axisymmetric (round) shape of the transverse steps, using the classical upper estimation method. Taking into account the correct assumptions, this method is effectively used only for analyzing the high-speed impact deformation of flat stepped rod products. Using the proposed technology methodology, in production conditions, it is possible to quickly recalculate the force mode of shaping from flat to axisymmetric deformation and, on this basis, select the equipment (stamping or crank presses, stamping hammers, etc.) necessary for the implementation of the tool manufacturing process.

**Keywords:** high-speed extrusion, rod bimetallic tool, upper estimation method, equality of squares, power balance of external and internal forces

**Conflict of interest:** authors declare no conflict of interest.

**Information about the authors:** Igor V. Kachanov – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department “Hydraulic and energy construction, water transport and hydraulics” at Belarusian National Technical University; Viacheslav V. Vlasov – Senior Lecturer of the Department “Hydraulic and energy construction, water transport and hydraulics” at Belarusian National Technical University. E-mail: vlasov881988@mail.ru

**Contribution of the authors:** Igor V. Kachanov – proposed the idea of recalculating the equations of the force mode of shape change obtained for plane to axisymmetric deformations; Viacheslav V. Vlasov – developed a specific diagram of the force mode, as well as hodographs of velocities and accelerations during the transition from flat to axisymmetric deformation, based on the principle of equality of the transverse areas of square and round workpieces.

**For citation:** Kachanov I. V., Vlasov V. V. Power mode of high-speed extrusion of axisymmetric bimetallic rod products for instrumental purposes. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 28–36 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-28-36>

Received: 26.11.2024

Approved for publication: 06.03.2025

Signed to the press: 12.03.2025

**Введение.** Для реализации современных процессов металлообработки, разработки горнорудных месторождений, ремонта дорожного асфальтобетонного полотна широко используется осесимметричный инструмент стержневой формы (пуансоны, фрезы, прошивники и т. д.). В ряде работ (например, [1]) отмечается, что для изготовления такого инструмента целесообразно применять процессы скоростного ударного выдавливания. Однако реализация указанных процессов сталкивается с необходимостью прогнозирования реального силового режима формоизменения, что связано с вопросами технически обоснованного подбора штамповочного оборудования и обеспечения стойкости инструментальной оснастки, особенно в момент воздействия на нее пиковых нагрузок.

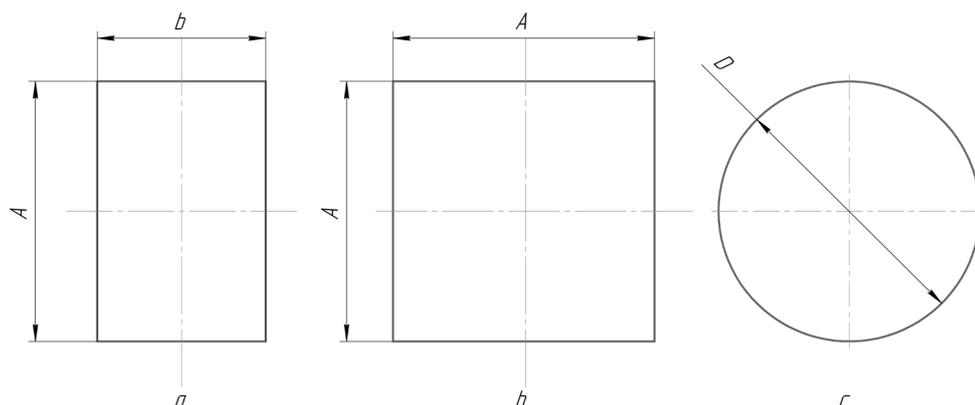


Рис. 1. Формы поперечных сечений прямоугольной (а), квадратной (b) и круглой (с) заготовок для двухэтапного перехода по схеме «прямоугольник – квадрат», «квадрат – круг», используемого для решения задачи скоростного ударного выдавливания осесимметричных изделий

Fig. 1. Shapes of cross sections of rectangular (a), square (b) and round (c) workpieces for two-stage transformation according to the “rectangle – square”, “square – circle” scheme used to solve the problem of high-speed impact extrusion of axisymmetric products

В [3–9] приводятся различные методики для расчета нагрузок, действующих на инструмент в условиях как плоской, так и осесимметричной деформации. Однако следует отметить, что в условиях ударной штамповки из-за неучета, например, инерционных нагрузок, существенно влияющих на силовой режим процесса формоизменения, эти методики имеют следующие недостатки: невысокую корректность и большую трудоемкость.

Как альтернатива вышеуказанным эмпирическим подходам в работе [10] приводится теоретическое решение задачи в условиях плоской деформации скоростного ударного выдавливания на основе применения метода верхней оценки, которое позволило получить уравнения для расчета силового режима при изготовлении многоступенчатого стержневого инструмента из исходной прямоугольной заготовки (рис. 1, а).

Следует отметить, что полученное в [10] решение имеет очевидный недостаток, связанный с невозможностью прогнозировать силовой режим при изготовлении деталей с осесимметричной (круглой формой) поперечного сечения, широко используемых в инструментальном производстве (фрезы, пуансоны, толкатели, прошивники и т. д.)

Для устранения указанного недостатка предлагается внести изменения в уравнение, полученное при решении задачи скоростного ударного выдавливания плоской прямоугольной заготовки. Суть изменений сводится к использованию в уравнениях для анализа силового режима [9] процесса ударного выдавливания квадратной заготовки (рис. 1, b) с площадью поперечного сечения  $f_{кв}$  ( $f_{кв} = A^2$ , где  $A$  – сторона квадратной заготовки) вместо прямоугольной с площадью  $f_{пр}$  ( $f_{пр} = Ab$ ) (см. рис. 1, а).

В уравнения, приведенные в работе [9], нами предлагается дополнительно внести еще одно изменение, которое позволит их использовать для анализа скоростного выдавливания осесимметричных стержневых деталей круглого сечения. Суть этого изменения сводится к тому, чтобы площадь исходной квадратной заготовки  $f_{кв} = A^2$  заменить на равновеликую площадь круга ( $f_{кр} = \pi D^2/4$ ).

Из условия равенства указанных площадей ( $A^2 = \pi D^2/4$ ) устанавливаются искомые соотношения между диаметрами круглых  $D_i(d_i)$  и сторонами квадратных сечений  $A_i(a_i)$  в виде выражения

$$D_i(d_i) = 1,128A_i(a_i) \Rightarrow A_i(a_i) = 0,886D_i(d_i). \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что по известным значениям размеров детали, например, с квадратными сечениями заготовки и ступеней  $A_i(a_i)$  путем умножения на 1,128 можно установить требуемые диаметры  $D_i(d_i)$  заготовки и круглых сечений осесимметричной стержневой детали. В свою очередь при решении обратной задачи из выражения (1) по известным значениям размеров осесимметричной детали  $D_i(d_i)$  путем умножения их на множитель 0,886 можно определить при необходимости размеры  $A_i(a_i)$  заготовки и ступеней квадратного сечения детали.

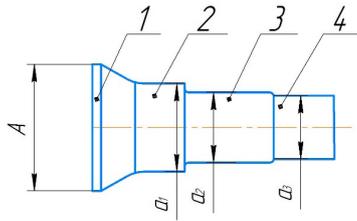


Рис. 2. Ступенчатая стержневая деталь с квадратным сечением прессостатка 1 и ступеней 2, 3, 4

Fig. 2. Stepped rod workpiece with square section of pressostat 1 and 2, 3, 4 stages

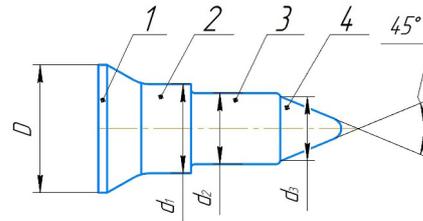


Рис. 3. Ступенчатая стержневая осесимметричная деталь с круглым сечением прессостатка 1 и ступеней 2, 3, 4

Fig. 3. Stepped rod axisymmetric workpiece with circular section of pressostat 1 and 2, 3, 4 stages

Исходя из изложенного нами предлагается методика, позволяющая преобразовать на первом переходе исходные уравнения для анализа силового режима выдавливания прямоугольной заготовки в уравнения для анализа формоизменения заготовки квадратного сечения с получением стержневой детали с квадратной формой сечений, площадь которой уменьшается от прессостатка 1 до конечного элемента 4 (рис. 2) стержневой детали.

Полученные расчетные уравнения на втором этапе, учитывая выражение (1), предлагается адаптировать для скоростного выдавливания многоступенчатой осесимметричной стержневой детали (рис. 3), у которой площади круглых сечений уменьшаются последовательно от максимального значения (прессостаток 1), включая промежуточные ступени 2, 3, до минимального (ступень 4).

**Первый этап пересчета силового режима при переходе от прямоугольной заготовки к квадратной.** Для анализа силового режима процесса скоростного ударного выдавливания прямоугольной плоскоступенчатой детали из исходной прямоугольной заготовки на основе метода верхней оценки нами в работе [10] использовалось кинематически возможное поле линий скольжения с построенными годографами скоростей и ускорений (рис. 4 и 5).

Исходя из условия баланса мощностей внешних и внутренних сил была получена силовая диаграмма «усилие на пуансоне – путь деформирования» ( $P_n = f(h_n)$ ) (рис. 5, d). На основании экспериментальных данных [10] процесс был разделен на две стадии: разгона и торможения (участки  $\Delta h_p$  и  $h_{n.T}$  соответственно на рис. 5, d).

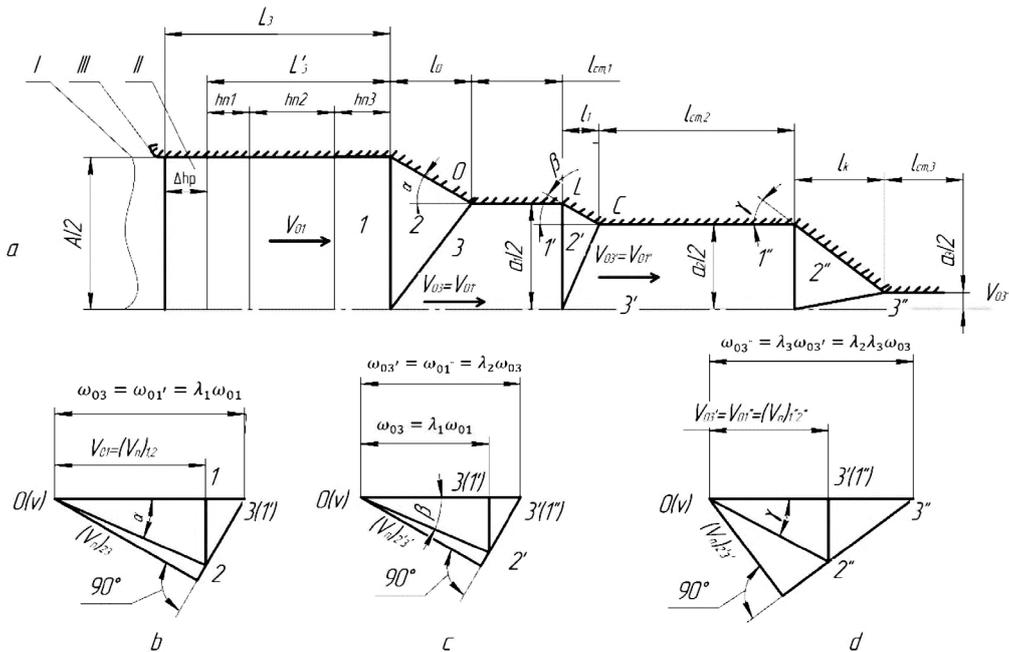


Рис. 4. Кинематически возможное поле линий скольжения (a) и соответствующие ему годографы скоростей (b, c, d) при скоростном ударном выдавливании ступенчатых плоских изделий (приведенных величин приведено в [10])

Fig. 4. The kinematically possible field of slip lines (a) and the corresponding velocity curves (b, c, d) for high-speed impact extrusion of stepped flat products (given values from [10])

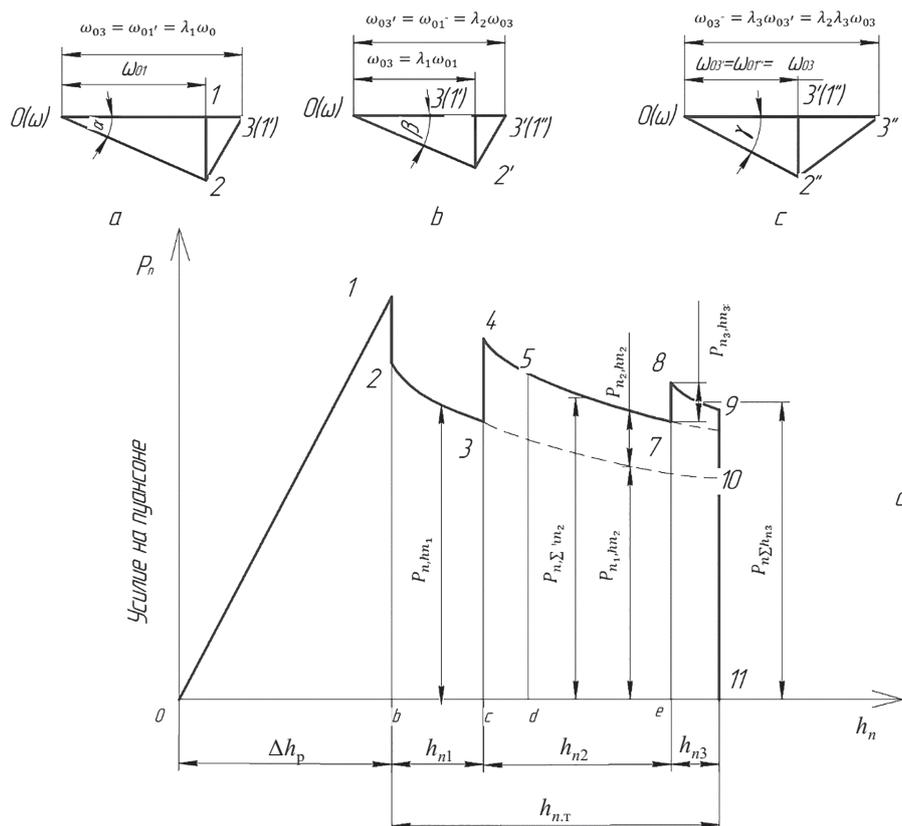


Рис. 5. Годографы ускорений (a, b, c) и силовая диаграмма  $P_n = f(h_n)$ , «усилие на пуансоне – путь деформирования» (d) при скоростном ударном выдавливании плоских ступенчатых изделий  
Fig. 5. Hodographs of accelerations (a, b, c) and the force diagram  $P_n = f(h_n)$ , “force on the punch – path of deformation” (d) with high-speed impact extrusion of flat step products

Для завершающего этапа процесса, когда путь деформирования пуансона  $h_{п}$  равняется  $h_{n3}$  (см. рис. 4, a), величина суммарного усилия  $P_{n\Sigma h_{n3}}$ , действующего на пуансон, будет зависеть от сопротивления деформированию при пластическом течении материала заготовки через три очага деформации, сосредоточенных в блоках 2, 2', 2'' (см. рис. 4, a).

Уравнение для расчета минимального усилия деформирования  $P_{n\Sigma h_{n3}}$  на этом этапе процесса имеет следующий вид [10]:

$$\begin{aligned}
 P_{n\Sigma h_{n3}} = & \frac{AbM \left\{ k \left[ F_{1\text{опт}} + 4\mu \left( \frac{L'_3}{A} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \left[ F_{2\text{опт}} + (\lambda_1 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[ F'_{3\text{опт}} + \frac{L'_3}{A} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{A} \right]} + \\
 & + \frac{AbM \left\{ k \left[ F'_{1\text{опт}} + 4\mu \left( \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} \right) \right] + \lambda_1 \rho V_0^2 \left[ F'_{2\text{опт}} + (\lambda_2 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[ F'_{3\text{опт}} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} \right]} + \\
 & + \frac{AbM \left\{ k \left[ F''_{1\text{опт}} + 4\mu \left( \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \left[ F''_{2\text{опт}} + (\lambda_3 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[ F''_{3\text{опт}} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{A} \right]}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Физический смысл всех величин, входящих в уравнение (2), приведен в [10]. При этом коэффициенты вытяжки  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  в уравнении (2) определяются по зависимостям:

$$\lambda_1 = \frac{A_1}{a_1}; \lambda_2 = \frac{a_1}{a_2}; \lambda_3 = \frac{a_2}{a_3}. \quad (3)$$

Для адаптации уравнения (2) к условиям выдавливания квадратной заготовки предлагаем заменить в нем площадь прямоугольника (см. рис. 1, а)  $f_{\text{пр}} (f_{\text{пр}} = Ab)$  на квадрат (см. рис. 1, б)  $f_{\text{кв}} (f_{\text{кв}} = A^2)$ . При деформации квадратной заготовки в многоочковой матрице с квадратными сечениями для каждой ступени коэффициенты  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  будут определяться следующими очевидными соотношениями:

$$\lambda_1 = \frac{A^2}{a_1^2}; \lambda_2 = \frac{a_1^2}{a_2^2}; \lambda_3 = \frac{a_2^2}{a_3^2}. \quad (4)$$

Для того чтобы получить квадратные сечения по всей длине ступенчатого изделия, необходимо подвергнуть деформации заготовку в условиях объемного приложения нагрузки. Математически это будет означать, что после замены площади прямоугольника  $f_{\text{пр}} (f_{\text{пр}} = Ab)$  на площадь квадрата  $f_{\text{кв}} (f_{\text{кв}} = A^2)$  указанную зависимость (2), выполнив умножение на 2, можно использовать для расчета суммарного усилия, действующего на пуансон  $P_{n\Sigma h_{n3}}$ , на пути деформирования  $h_{n3}$ . При этом уравнение для расчета усилия  $P_{n\Sigma h_{n3}}$ , действующего на пуансон при скоростном выдавливании инструментального изделия со ступенями квадратного сечения, примет вид:

$$P_{n\Sigma h_{n3}} = \frac{2A^2M \left\{ k \left[ F_1(\alpha, \mu, \lambda_1) + 4\mu \left( \frac{L'_3}{A} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \left[ F_2(\alpha) + (\lambda_1 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^3 \left[ F_3(\alpha, \lambda_1) + \frac{L'_3}{A} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{A} \right]} +$$

$$+ \frac{2A^2M \left\{ k \left[ F'_1(\beta, \mu, \lambda_2) + 4\mu \left( \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} \right) \right] + \lambda_1 \rho V_0^2 \left[ F'_2(\beta) + (\lambda_2 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^3 \left[ F'_3(\lambda_2, \beta) + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} \right]} +$$

$$+ \frac{2A^2M \left\{ k \left[ F''_1(\gamma, \mu, \lambda_3) + 4\mu \left( \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \left[ F''_2(\gamma) + (\lambda_3 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^3 \left[ F''_3(\gamma, \mu, \lambda_3) + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{A} \right]}. \quad (5)$$

Новизной уравнения (5) по отношению к уравнению (2) следует считать его адаптацию для формоизменения квадратной заготовки и получение в итоге ступенчатой стержневой детали с квадратным сечением для каждой ступени, что обеспечивается за счет умножения трех слагаемых в числителях зависимости (5) на величину  $2A^2$  вместо  $Ab$ , как это имеют место в зависимости (2). При этом все величины, входящие в зависимость (5), имеют тот же смысл, что и в зависимости (2).

**Второй этап перехода от плоской к осесимметричной деформации.** Чтобы получить зависимость для расчета усилия выдавливания осесимметричной заготовки в уравнение (5) предлагается внести изменение, которое сводится к замене площади квадратной заготовки  $f_{\text{кв}} (f_{\text{кв}} = A^2)$  (см. рис 1, а) на равноценную площадь круга  $f_{\text{кр}} (f_{\text{кр}} = \pi d^2/4)$  (см. рис. 1, б).

Исходя из условия равенства площадей  $f_{\text{кв}} = f_{\text{кр}}$  с учетом выражения (1) соотношение длины сторон квадрата и диаметра равноценной площади круга характеризуется следующей зависимостью:

$$f_{\text{кв}} = f_{\text{кр}} \Rightarrow A^2 = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow A = 0,886D, \quad (6)$$

где  $A$  – длина стороны квадратной заготовки, используемой в условиях плоской деформации (рис. 6) для получения многоступенчатых стержневых деталей квадратного сечения;  $D$  – диаметр круглой заготовки (рис. 6), взаимосвязанной со стороной квадрата  $A$  зависимостью (1) и используемой для изготовления ступенчатых деталей круглого сечения в условиях осесимметричной деформации.

Принимая допущение, что вид кинематически возможного поля линий скольжения, приведенного в [10], при выдавливании квадратной и круглой заготовок с одинаковой площадью  $f_{\text{кв}} = f_{\text{кр}}$  остается практически неизменным, и используя зависимость (6) после преобразований уравнения (5), получим уравнение для расчета усилия  $P_{n\Sigma h_{n3}}$ , действующего на пуансон при  $h_n = h_{n3}$  при выдавливании осесимметричной заготовки через три очага деформации 2, 2', 2'' (см. рис 4, а), в следующем виде:

$$P_{n\Sigma h_{n3}} = \frac{1,57D^2M \left\{ k \left[ F_{1\text{опт}} + 4\mu \left( \frac{L'_3}{0,886D} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{0,886D} \right) \right] + \rho V_0^2 \left[ F_{2\text{опт}} + (\lambda_1 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho(0,886D)^3 \left[ F'_{3\text{опт}} + \frac{L'_3}{0,886D} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{0,886D} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{0,886D} \right]} +$$

$$+ \frac{1,57D^2M \left\{ k \left[ F'_{1\text{опт}} + 4\mu \left( \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{0,886D} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2}{0,886D} h_{n2} \right) \right] + \lambda_1 \rho V_0^2 \left[ F'_{2\text{опт}} + (\lambda_2 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho(0,886D)^3 \left[ F'_{3\text{опт}} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{0,886D} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{0,886D} \right]} +$$

$$+ \frac{1,57D^2M \left\{ k \left[ F''_{1\text{опт}} + 4\mu \left( \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{0,886D} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{0,886D} \right) \right] + \rho V_0^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \left[ F''_{2\text{опт}} + (\lambda_3 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho(0,886D)^3 \left[ F''_{3\text{опт}} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{0,886D} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{0,886D} \right]}. \quad (7)$$

Анализ уравнения (7) показывает, что, используя корректное решение плоской задачи, основанное на неизменности кинематически возможного поля линий скольжения и годографа скорости и ускорения, из условия равенства площадей квадратной и круглой заготовок можно получить расчетные уравнения для анализа силового режима процесса ударного выдавливания осесимметричной стержневой многоступенчатой детали.

При этом из рассмотренных уравнений (5), (7) видно, что при равенстве площадей квадратной и круглой заготовок усилие на пуансон в условиях плоской и осесимметричной деформации будет иметь одно и то же значение. Положенный в основу двухэтапного перехода принцип равенства площадей квадратных и круглых сечений позволяет с учетом новых величин оперативно преобразовать уравнения для расчета усилия формоизменения в условиях плоской деформации в уравнения для определения силового режима процесса ударного выдавливания стержневого осесимметричного многоступенчатого биметаллического инструмента с диаметрами ступеней  $d_1, d_2, d_3$ , получаемых из исходной круглой заготовки с начальным диаметром  $D$  (см. рис. 3).

**Заключение.** Для анализа силового режима процесса ударного выдавливания в условиях осесимметричной деформации разработана методика пересчета уравнений, полученных для

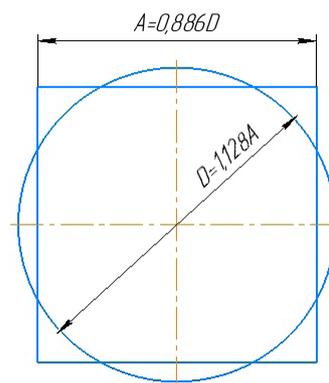


Рис. 6. Формы сечений равноценных по площади квадратной и круглой заготовок, используемых для перехода от плоской к осесимметричной деформации  
Fig. 6. Cross-sectional areas of equal-sized square and round workpieces used for transformation from plane to axisymmetric deformation

плоской деформации прямоугольных заготовок. Методика предполагает последовательное формоизменение заготовок с формой поперечных сечений «прямоугольник – квадрат», «квадрат – круг» за два этапа с одновременным пересчетом уравнений для расчета определения силовых нагрузок, действующих на пуансон на каждом этапе указанного формоизменения.

Разработанная методика двухэтапного перехода от плоской к осесимметричной деформации позволяет использовать уравнения для анализа силового режима пуансона в условии плоской ударной деформации квадратной заготовки, для расчета параметров ударного выдавливания многоступенчатого инструмента круглого сечения с диаметром заготовки  $D$  и ступеней  $d_1, d_2, d_3$ .

На основе равенства площадей поперечных сечений квадратной и круглой заготовок и неизменности кинематически возможного поля линий скольжения, а также годографов скоростей и ускорений установлена зависимость между стороной квадрата  $A$  и диаметром круглой заготовки  $D$  в виде  $A = 0,886D$ , в которой обеспечивается одно и то же усилие формоизменения при изготовлении стержневых деталей как с квадратной, так и с осесимметричной (например, круглой) формой поперечного сечения.

Предложенная схема расчета силовых параметров процесса скоростного ударного выдавливания позволяет оперативно рассчитать силовой режим формирования для любого стержневого ступенчатого инструмента с осесимметричной (круглой) формой поперечных ступеней, используя классический метод верхней оценки.

На современном уровне указанный метод с учетом корректных допущений эффективно используется только для анализа скоростной ударной деформации плоских ступенчатых стержневых изделий. Применяя предложенную методику технологии, в производственных условиях возможно оперативно пересчитать силовой режим формоизменения с плоской на осесимметричную деформацию и на основании такого пересчета подобрать оборудование (чеканочный либо кривошипно-шатунный прессы, штамповочный молот и т. д.), необходимое для реализации процесса изготовления инструмента.

### Список используемых источников

1. Быков, К. Ю. Силовой режим скоростного комбинированного выдавливания плоских биметаллических дорожных резов / К. Ю. Быков, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 4. – С. 287–295. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295>
2. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исаевича. – Минск: Технопринт, 2002. – 327 с.
3. Сидельников, С. Б. Теория процессовковки и штамповки: учеб. пособие / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, И. Л. Константинов; Сиб. федер. ун-т, Ин-т цвет. металлов и материаловедения. – Изд. 3-е, доп. и перераб. – Красноярск: СФУ, 2017. – 103 с.
4. Макаров, Е. Г. Теория пластичности для инженеров: учеб. пособие / Е. Г. Макаров. – СПб.: БГТУ Военмех, 2011. – 85 с.
5. Теория обработки металлов давлением: учеб. для вузов / В. А. Голенков, С. П. Яковлев, С. А. Головин [и др.]; под ред. В. А. Голенкова, С. П. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.
6. Гречников, Ф. В. Теория пластического деформирования металлов: учебник / Ф. В. Гречников, В. Р. Каргин. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2021. – 448 с.
7. Коликов, А. П. Теория обработки металлов давлением: учебник / А. П. Коликов, Б. А. Романцев. – М.: Изд. дом МИСиС, 2015. – 451 с.
8. Здор, Г. Н. Технология высокоскоростного деформирования материалов / Г. Н. Здор, Л. А. Исаевич, И. В. Качанов. – Минск: БНТУ, 2010. – 456 с.
9. Смирнов, В. С. Теория обработки металлов давлением / В. С. Смирнов. – М.: Металлургия, 1973. – 497 с.
10. Качанов, И. В. Оптимизация режима нагружения при скоростном ударном выдавливании биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий / И. В. Качанов, В. В. Власов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 43–52. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-43-52>

### References

1. Bykov K. Yu., Kachanov I. V., Shatalov I. M. Power Mode of High-Speed Combined Extrusion of Flat Bimetallic Road Milling Picks. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2021, vol. 20, no. 4, pp. 287–295 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295>
2. Kachanov I. V. *High-Speed Hot Extrusion of Rod Products*. Minsk, Technoprint Publ., 2002. 327 p. (in Russian).

3. Sidel'nikov S. B., Dovzhenko N. N., Konstantinov I. L. *Theory of Forging and Stamping Processes: Textbook*. Ed. 3<sup>rd</sup>. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2017. 103 p. (in Russian).
4. Makarov E. G. *Plasticity Theory for Engineers*. St. Petersburg, Baltic State Technical University Voenmech named after. D. F. Ustinov, 2011. 85 p. (in Russian).
5. Golenkov V. A., Yakovlev S. P., Golovin S. A., Yakovlev S. S., Cook V. D. Golenkov V. A., Yakovlev S. P. (eds.). *Theory of Metal Forming*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 442 p. (in Russian).
6. Grechnikov F. V., Kargin V. R. *Theory of Plastic Deformation of Metals*. Samara, Samara University Publ. House, 2021. 448 p. (in Russian).
7. Kolikov A. P., Romantsev B. A. *Theory of Metal Forming*. Moscow, MISiS Publ. House, 2015. 451 p. (in Russian).
8. Zdor G. N., Isaevich L. A., Kachanov I. V. *Technology of High-Speed Deformation of Materials*. Minsk, BNTU, 2010. 456 p. (in Russian).
9. Smirnov V. S. *Theory of Metal Pressure Processing*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 497 p. (in Russian).
10. Kachanov I. V., Vlasov V. V. Optimization of the power mode at the high-speed shock-sleeping of bimetallic plane-stage rod products. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 43–52 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-43-52>

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**  
**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-37-43>  
УДК 536.2;532.516;663.033



*Оригинальная статья*

**М. В. Янко<sup>1</sup>, А. Д. Чорный<sup>2\*</sup>, Е. М. Заяц<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
пр. Независимости, 99, 220012, Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,  
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**К РАСЧЕТУ ЗАРЯДКИ КАПЕЛЬ ПРИ КОРОННОМ РАЗРЯДЕ  
В КАМЕРЕ АЭРОИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**Аннотация.** Представлена в дрейфово-диффузионном приближении математическая модель, которая описывает перенос заряженных частиц в воздухе при действии коронного разряда, а также изменение поверхностного заряда капель в капельно-воздушной среде. Данная модель позволяет рассчитать динамику сообщения заряда каплям органических материалов при их аэроионной обработке с учетом неоднородности электрического поля коронного разряда. Неоднородное электрическое поле создается при приложении электрического напряжения между электродами типа игла и внутренней поверхностью камеры аэроионной обработки органических материалов. Экспериментально показано, что электрический заряд молекул питательной среды и дрожжевой клетки в капле влияет на диффузию питательных веществ внутрь клетки и, как следствие, на развитие и продуктивность дрожжей, которая увеличивается на 12–17 % по сравнению с применением способов, не связанных с аэроионной обработкой органических материалов. Проведенные экспериментальные исследования указывают на возможность применения модели для проектирования реальных камер аэроионной обработки с целью оптимизации их работы.

**Ключевые слова:** коронный разряд, заряд капли, аэроионная активация, дрейфово-диффузионное приближение

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** Янко Максим Валерьевич – магистр технических наук, старший преподаватель Белорусского государственного аграрного технического университета. <https://orcid.org/0000-0002-4723-4029>. E-mail: [umv.pps@bsatu.by](mailto:umv.pps@bsatu.by); Чорный Андрей Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>. E-mail: [anchor@hmti.ac.by](mailto:anchor@hmti.ac.by); Заяц Евгений Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор Белорусского государственного аграрного технического университета. <https://orcid.org/0000-0002-3431-7925>. E-mail: [zayatsem@mail.ru](mailto:zayatsem@mail.ru)

**Вклад авторов:** Янко Максим Валерьевич – проведение экспериментальных исследований, интерпретация данных, формулировка выводов, написание и оформление текста; Чорный Андрей Дмитриевич – постановка и проведение расчетов, обсуждение результатов и выводов, редактирование текста; Заяц Евгений Михайлович – постановка исследовательских целей и задач, анализ результатов, написание текста статьи.

**Для цитирования:** Янко, М. В. К расчету зарядки капель при коронном разряде в камере аэроионной обработки органических материалов / М. В. Янко, А. Д. Чорный, Е. М. Заяц // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 37–43. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-37-43>

Поступила в редакцию: 30.01.2025

Доработанный вариант: 27.02.2025

Утверждена к публикации: 06.03.2025

Подписана в печать: 12.03.2025

*Original article*Maxim V. Yanko<sup>1</sup>, Andrei D. Chorny<sup>2\*</sup>, Yauheni M. Zayats<sup>1</sup><sup>1</sup>Belarusian State Agrarian Technical University,  
99, Nezavisimosti Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus<sup>2</sup>A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus,  
15, P. Brovka St., 220072, Minsk, Republic of Belarus**ON THE CALCULATION OF DROPLET CHARGING DURING CORONA DISCHARGE  
IN THE CHAMBER OF AIR IONIC TREATMENT OF ORGANIC MATERIALS**

**Abstract.** A mathematical model is presented in the drift-diffusion approximation, which describes the transport of charged particles in the air under the action of a corona discharge, as well as a change in the surface charge of droplets in a droplet-air environment. This model allows us to calculate the dynamics of charge transmission to droplets of organic materials during their aeroion treatment, taking into account the heterogeneity of the electric field of the corona discharge. An inhomogeneous electric field is created when an electric voltage is applied between needle-type electrodes and the inner surface of the chamber for aeroion treatment of organic materials. It has been experimentally shown that the electric charge of nutrient medium and yeast cell molecules in a drop affects the diffusion of nutrients into the cell and, as a result, the development and productivity of yeast, which increases by 12–17 % compared with the use of methods not related to aeroion treatment of organic materials. The conducted experimental studies indicate the possibility of using the model to design real aeroion treatment chambers in order to optimize their operation.

**Keywords:** corona discharge, droplet charge, air ionic activation, drift-diffusion approximation

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**Information about authors:** Maxim V. Yanko – Master of Engineering Sciences, Senior Lecturer at Belarusian State Agrarian Technical University. <https://orcid.org/0000-0002-4723-4029>. E-mail: ymv.pps@bsatu.by; Andrei D. Chorny – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Laboratory at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>. E-mail: anchor@hmti.ac.by; Yauheni M. Zayats – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor at Belarusian State Agrarian Technical University. <https://orcid.org/0000-0002-3431-7925>. E-mail: zayatsem@mail.ru

**Contribution of the authors:** Maxim V. Yanko – conducting experimental studies, interpreting data, formulating conclusions, writing and formatting the text; Andrei D. Chorny – setting up and carrying out calculations, discussing results and conclusions, editing the text; Yauheni M. Zayats – setting research goals and objectives, analyzing results, writing the text of the article.

**For citation:** Yanko M. V., Chorny A. D., Zayats Ya. M. On the calculation of droplet charging during corona discharge in the chamber of air ionic treatment of organic materials. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 37–43 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-37-43>

Received: 30.01.2025

Modified: 27.02.2025

Approved for publication: 06.03.2025

Signed to the press: 12.03.2025

**Введение.** В ряде современных технологических процессов, например электрогазоочистке, электросепарации, пылеподавлении, электроокраске, применяют коронный разряд [1, 2]. Известны способы его использования для интенсификации процесса увеличения концентрации микроорганизмов при их выращивании на питательной среде [3–5].

Возникающий в газовой среде коронный разряд при подаче на электроды высокого напряжения позволяет создать зону ионизации около коронирующего электрода, где происходит размножение заряженных частиц, а во внешней зоне эти частицы дрейфуют вдоль силовых линий электрического поля [1, 6]. При возникновении коронного разряда импульс, передаваемый кулоновской силой заряженным частицам, посредством упругих соударений эффективно распространяется по нейтральным молекулам, что обуславливает движение ионизированного воздуха. Возникает течение, называемое электрическим ветром [6, 7]. При столкновении с частицами аэрозоля или каплями жидкости ионы оседают на них, сообщая им электрический заряд. Таким образом, в разрядном промежутке фактически происходит процесс аэроионизации и образуется движущаяся многокомпонентная среда: ионы, заряженные капли жидкости и нейтральный газ [1, 2, 6].

В настоящее время расчеты и проектирование электрогидродинамических установок, в которых реализуются такие электрогидродинамические течения, в значительной мере базируются на данных экспериментов [2, 8–10]. В теоретическом плане преимущественно рассматриваются одномерные модели течений [6, 7, 11], что не позволяет получить результаты, допускающие учет

сложного характера гидрогазодинамических процессов, неоднородности электрического поля, а также геометрических особенностей конструкции установок [10].

*Цель настоящей работы* – определить в дрейфово-диффузионном приближении исходные положения, необходимые для описания переноса заряженных частиц в воздухе при действии коронного разряда, а также изменение поверхностного заряда капель в капельно-воздушной среде.

**Дрейфово-диффузионное приближение для описания процессов переноса в камере аэроионной обработки органических материалов.** Рассмотрим аэроионизацию капельно-воздушных сред с точки зрения справедливости механизмов конвективного переноса в потоке многокомпонентной смеси при наложении электрического поля. Теоретически капельно-воздушная среда рассматривалась в электрогидродинамическом приближении [1, 2]. Учитывая данное приближение нами выполнен анализ аэроионизации с точки зрения справедливости механизмов конвективного переноса в потоке многокомпонентной смеси при наложении электрического поля.

В камере аэроионной обработки органических материалов при прохождении электрического тока движение ионов обеспечивается переносом как за счет конвекции и диффузии, так и миграции в электрическом поле. В связи с этим заряженные частицы могут быть представлены как отдельные компоненты смеси.

Для практического подтверждения теоретических результатов в ходе исследования нами использовалась камера аэроионной обработки органических материалов<sup>1</sup>, применяемая для повышения продуктивности микроорганизмов. Устройство представляет собой тройниковое соединение, в котором для коронного разряда реализуется система «игла – цилиндрическая поверхность». В рассматриваемом случае дисперсионной средой является воздух: процесс аэроионизации происходит в поле коронного разряда, через который перемещается дисперсная среда – капли жидкости с органическим материалом. Модель камеры аэроионной обработки представлена на рис. 1.

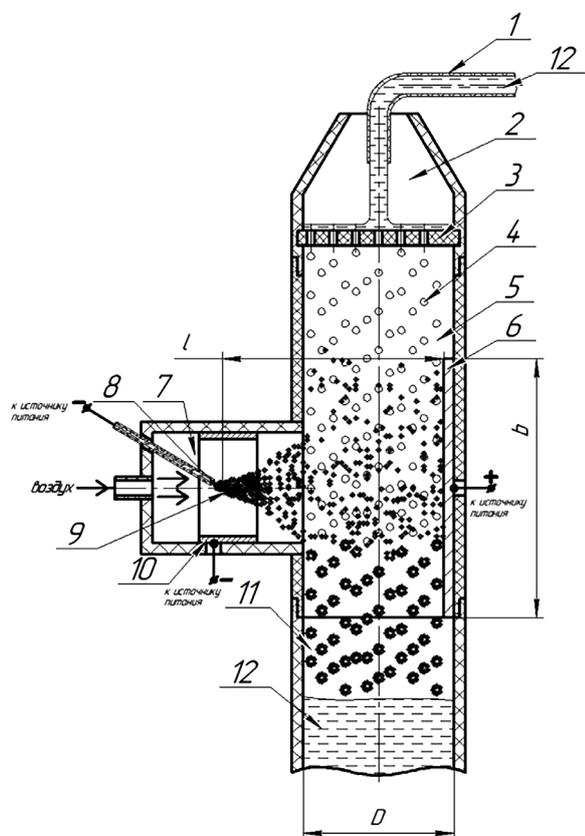


Рис. 1. Камера аэроионной обработки органических материалов: 1 – трубка; 2 – оросительное устройство; 3 – решетка; 4 – капли; 5 – камера аэроионной обработки; 6 – осадительный электрод; 7 – разрядная камера; 8 – коронирующий электрод; 9 – область ионизации; 10 – электрод для очистки воздуха от положительных ионов; 11 – объем обработанной среды; 12 – органический материал (жидкость)

Fig. 1. Aeroion treatment chamber for organic materials: 1 – tube; 2 – irrigation device; 3 – grate; 4 – droplets; 5 – aerosol treatment chamber; 6 – precipitation electrode; 7 – discharge chamber; 8 – corona electrode; 9 – ionization region; 10 – electrode for air purification from positive ions; 11 – volume of the treated medium; 12 – organic material (liquid)

<sup>1</sup> Способ культивирования хлебопекарных дрожжей: пат. 23635 Респ. Беларусь: МПК C12N13/00 / Е. М. Заяц, М. В. Янко, А. Д. Чорный; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет». № а 20190290; заявл. 10.10.2019; дата публ.: 30.06.2021.

При описании движения заряженных частиц обычно используют следующие рассуждения [1, 2, 6]. Пусть в смеси имеются частицы, концентрация которых равна  $N_k$ . При напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в смеси со стороны этого поля на частицу действует сила  $eN_k\vec{E}$ , где  $e$  – элементарный заряд электрона. Под воздействием этой силы частица приходит в движение в рассматриваемой среде. Такое движение получило название миграции заряженных частиц [1, 2].

Взаимодействие заряженных частиц при коронном разряде рассматривается на основе аналогии прохождения химических реакций посредством четырех процессов: ионизации, присоединения электронов к нейтральным молекулам, рекомбинации электронов с положительными ионами и рекомбинации положительных и отрицательных ионов [2, 6]. Для коронного разряда в воздухе математическая модель включает три уравнения переноса: для учета движения, генерации и убыли электронов ( $N_e$ ), положительных ( $N_p$ ) и отрицательных ( $N_n$ ) ионов, – в сочетании с уравнением Пуассона (для учета влияния пространственного заряда на электрическое поле):

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( N_k V_i^k - D_k \frac{\partial N_k}{\partial x_i} \right) = S_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\epsilon_r \epsilon_0 E_i) = \rho_c, \quad (2)$$

где  $i$  – повторяющийся индекс, по которому выполняется суммирование,  $i = 1, 2, 3$ ;  $k = \{e, p, n\}$  – индексы, указывающие на электрон, положительный и отрицательный ионы;  $\vec{E} = \{E_1, E_2, E_3\}$  – напряженность электрического поля, В/м, с  $\Phi$  – электрическим потенциалом, В;  $N_k$  – счетная плотность электронов, положительных и отрицательных ионов,  $1/\text{м}^3$ ;  $\vec{V}^k = \{V_1 + z_k \mu_k E_1, V_2 + z_k \mu_k E_2, V_3 + z_k \mu_k E_3\}$  – вектор конвективно-миграционной скорости электронов и ионов, м/с;  $z_k = \{-1, 1, -1\}$  – зарядовое число;  $\vec{V} = \{V_1, V_2, V_3\}$  – вектор конвективной скорости, м/с;  $\mu_k$  – подвижность электронов и ионов,  $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ;  $D_k$  – коэффициент диффузии электронов и ионов,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $S_k$  – источники членов электронов и ионов,  $1/\text{м}^3\cdot\text{с}$ ;  $\epsilon_0 = 8,854e - 12$  – диэлектрическая проницаемость, Кл/(В·м);  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха  $\epsilon_r = 1,006$ , для воды  $\epsilon_r = 80,1$  при  $20^\circ\text{C}$ );  $\rho_c = e(N_p - N_e - N_n)$  – объемный заряд, Кл/ $\text{м}^3$ ;  $e$  – заряд электрона, Кл;  $t$  – время, с;  $x_i$  – координаты, м.

Учет взаимодействия заряженных частиц при коронном разряде производится через определение членов  $S_k$  в уравнениях. Полная химико-кинетическая модель аэроионизации может содержать несколько сотен реакций и частиц, в частности нейтральные молекулы, электронно-возбужденные частицы и ионы [1, 2, 6, 7]. Включенные в рассматриваемую модель три заряженные частицы (электрон, положительный и отрицательный ионы) и четыре основные реакции хорошо описывают поведение коронного разряда [1, 2, 6]. Тогда, учитывая коэффициенты ионизации ( $\alpha$ ,  $1/\text{м}$ ), присоединения электронов к нейтральным молекулам ( $\eta$ ,  $1/\text{м}$ ), а также рекомбинации ( $k_{ep}$  и  $k_{np}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ), источники членов в уравнениях запишем следующим образом:

$$S_e = (\alpha - \eta)\mu_e N_e |\vec{E}| - k_{ep} N_e N_p, \quad S_n = \eta\mu_e N_e |\vec{E}| - k_{np} N_n N_p, \quad (3)$$

$$S_p = \alpha\mu_e N_e |\vec{E}| - k_{ep} N_e N_p - k_{np} N_n N_p.$$

В наших расчетах предполагается, что процессы проходят при комнатной температуре и нормальном давлении. В таблице указаны соответствующие этим условиям значения параметров, коэффициенты подвижности и диффузии электронов и ионов, а также коэффициенты реакций.

При реализации отрицательной короны на коронирующем электроде в расчетах камеры аэроионной обработки органических материалов следует учитывать источник вторичных электронов [2, 6]. Столкновение положительных ионов с поверхностью иглы вызывает вторичную эмиссию электронов в камеру, то есть  $q_e = \gamma\mu_p N_p |\vec{E}|$ . Помимо вторичных электронов, образующихся в результате столкновения положительных ионов с поверхностью коронирующего электрода, в воздушном потоке могут существовать электроны окружающей среды. Количество этих электронов при отрицательной короне пренебрежимо мало по сравнению с теми, которые возникают при вторичной эмиссии [6].

**Коэффициенты подвижности и диффузии электронов и ионов, коэффициенты реакций**  
**Coefficients of mobility and diffusion of electrons and ions, reaction coefficients**

Параметр, единица измерения Parameter, unit of measurement	Значение Value
Подвижность электронов, $\mu_e$ , $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ Electron mobility, $\mu_e$ , $\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	$1,9163 \cdot  \vec{E} ^{-0,25}$
Подвижность положительных ионов, $\mu_p$ , $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ Mobility of positive ions, $\mu_p$ , $\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	$2,43 \cdot 10^{-4}$
Подвижность отрицательных ионов, $\mu_n$ , $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ Mobility of negative ions, $\mu_n$ , $\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент диффузии электронов $D_e$ , $\text{м}^2/\text{с}$ Diffusion coefficient of electrons, $D_e$ , $\text{m}^2/\text{s}$	0,18
Коэффициент диффузии положительных ионов, $D_p$ , $\text{м}^2/\text{с}$ Diffusion coefficient of positive ions, $D_p$ , $\text{m}^2/\text{s}$	$0,028 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент диффузии отрицательных ионов, $D_n$ , $\text{м}^2/\text{с}$ Diffusion coefficient of negative ions, $D_n$ , $\text{m}^2/\text{s}$	$0,043 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент ионизации, $\alpha$ , $1/\text{м}$ Ionization coefficient, $\alpha$ , $1/\text{m}$	$3,5 \cdot 10^5 \exp(-1,65 \cdot 10^7 /  \vec{E} )$
Коэффициент присоединения электронов к нейтральным молекулам, $\eta$ , $1/\text{м}$ Coefficient of attachment of electrons to neutral molecules, $\eta$ , $1/\text{m}$	$1,5 \cdot 10^3 \exp(-2,5 \cdot 10^6 /  \vec{E} )$
Коэффициент рекомбинации положительных ионов и электронов, $k_{ep}$ , $\text{м}^3/\text{с}$ Coefficient of recombination of positive ions and electrons, $k_{ep}$ , $\text{m}^3/\text{s}$	$2 \cdot 10^{-13}$
Коэффициент рекомбинации положительных и отрицательных ионов, $k_{np}$ , $\text{м}^3/\text{с}$ Coefficient of recombination of positive and negative ions, $k_{np}$ , $\text{m}^3/\text{s}$	$2 \cdot 10^{-13}$
Коэффициент вторичной эмиссии электронов, $\gamma$ Coefficient of secondary electron emission, $\gamma$	0,01

Уравнения (1) дополняются уравнениями неразрывности и переноса импульса, где учитывается кулоновская сила:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_i}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial(\rho V_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_i V_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right) + F_{K,j} + F_{D,j}. \quad (4)$$

Здесь  $\rho$  – плотность среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $p$  – гидростатическое давление, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с. Сила Кулона, возникающая за счет наличия ионов и электронов в воздушном потоке, определяется согласно выражению  $\vec{F}_k = \rho_c \vec{E}$ . В свою очередь сила аэродинамического сопротивления капли, движущейся в воздушном потоке, равна  $\vec{F}_D = C_D \pi d_d^2 \rho |\vec{V} - \vec{V}_d| (\vec{V} - \vec{V}_d) / 8$  [1, 2, 7]. Движение капель (изменение скорости  $\vec{V}_d$  и положения  $\vec{x}_d$ ) и заряда капли описывается в лагранжевом представлении как

$$\frac{d\vec{x}_d}{dt} = \vec{V}_d, \quad m_d \frac{d\vec{V}_d}{dt} = \frac{1}{8} C_D \pi d_d^2 \rho |\vec{V} - \vec{V}_d| (\vec{V} - \vec{V}_d) + \frac{1}{6} \pi d_d^3 \vec{g} (\rho_d - \rho) + q_d \vec{E}, \quad (5)$$

$$\frac{dq_d}{dt} = e(\vec{J}_e + \vec{J}_n + \vec{J}_p)|_d, \quad \vec{J}_k = z_k \mu_k N_k \vec{E}.$$

Здесь  $m_d$ ,  $V_d$ ,  $d_d$ ,  $\rho_d$ ,  $q_d$ ,  $C_D$  – соответственно масса (кг), скорость (м/с), диаметр (м), плотность ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), заряд ( $\text{Кл}/\text{м}^3$ ) и коэффициент сопротивления капли в приближении сферической частицы. Также учитывается сила тяжести для капель.

Граничные условия для представленного набора математических уравнений ставятся для электрогидродинамических условий, реализующихся в камере аэроионной обработки определенной конструкции. Как указано выше, при коронном разряде в окрестности коронирующего электрода существует зона ионизации. Когда расстояние между коронирующим и осадительным электродами достаточно большое, то зона ионизации формирует однородную оболочку вокруг поверхности коронирующего электрода. Обычно при моделировании толщину этой оболочки достаточно малого размера оценивают и исключают из области расчета. С этой целью необходи-

мую для инициирования процесса ионизации критическую напряженность  $E_{th}$  на поверхности коронирующего электрода определяют с помощью эмпирической формулы Пика [1]. Однако исключение из расчета области ионизации может приводить к переоценке электрогидродинамического давления в окрестности коронирующего электрода [1, 2, 6]. Поэтому предпочтительнее проводить прямой расчет с учетом наличия зоны ионизации. Для твердых стенок камеры аэроионной обработки задаются условия электроизоляции и непротекания заряда, условия прилипания для скорости (компоненты скорости равны нулю) и условие теплоизоляции. На входной границе для воздуха задается расход воздуха и концентрация заряженных частиц, в свою очередь на входной границе капель – их расход. Нулевое напряжение устанавливается на осадительном электроде, а на коронирующем электроде – условие отрицательной короны, которое связано с условием для объемного заряда.

**Результаты и их обсуждение.** Теоретическая постановка задачи настоящего исследования позволяет получение результатов, учитывающих переменные свойства среды и геометрические особенности, для анализа неоднородности как самого электрического поля, так и обратного влияния его свойств на заряд и динамику капель жидкой среды. Это связано с применением модели для проектирования реальных камер аэроионной обработки с целью оптимизации их работы.

Экспериментально показано (рис. 2), что при аэрации среды продукт вместе с питательной средой в форме капель размером 5–6 мм пролетает через объем аэроионов в электрическом поле постоянного тока напряженностью до  $30 \cdot 10^3$  В/м расстояние, равное  $b = 0,2$  м, при этом капели получают электрический заряд до  $9 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>3</sup>. Электрический заряд молекул питательной среды и дрожжевой клетки в капле влияет на диффузию питательных веществ внутрь клетки и, как следствие, на развитие и продуктивность дрожжей, которая увеличивается на 12–17 % по сравнению с применением способов, не связанных с аэроионной обработкой органических материалов [12].

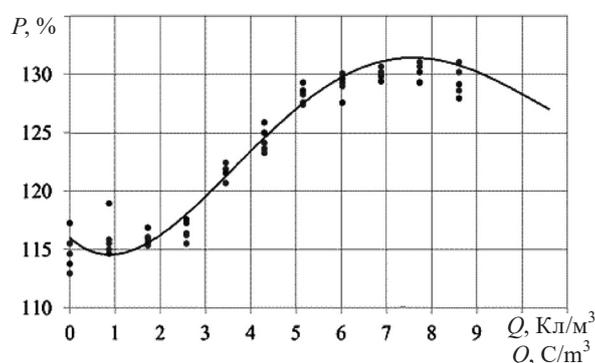


Рис. 2. Зависимость продуктивности ( $P$ , %) органической среды от приобретенного электрического заряда капель ( $Q$ , Кл/м<sup>3</sup>)

Fig. 2. Dependence of the productivity ( $P$ , %) of the organic medium on the acquired electric charge of droplets ( $Q$ , C/м<sup>3</sup>)

**Заклучение.** Таким образом, представлена в дрейфово-диффузионном приближении математическая модель, описывающая перенос заряженных частиц в воздухе при действии коронного разряда, а также изменение поверхностного заряда капель в капельно-воздушной среде. Данная модель позволяет рассчитывать динамику сообщения заряда каплям органических материалов при их аэроионной обработке с учетом неоднородности электрического поля коронного разряда.

Проведенные экспериментальные исследования указывают на возможность применения модели для проектирования реальных камер аэроионной обработки с целью оптимизации их работы.

#### Список использованных источников

1. Жакин, А. И. Электрогидродинамика / А. И. Жакин // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 5. – С. 495–520. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201205b.0495>

2. Electrohydrodynamics and its applications: Recent advances and future perspectives / K. Iranshahi, T. Defraeye, R. M. Rossi, U. C. Müller // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2024. – Vol. 232. – Art. ID 125895. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125895>
3. The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation / G. Beretta, A. F. Mastorgio, L. Pedrali [et al.] // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. – 2019. – Vol. 18. – P. 29–75. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-09491-9>
4. Palaniappan, S. Effects of Electricity on Microorganisms: A Review / S. Palaniappan, S. K. Sastry, E. R Richter // *Journal of Food Processing and Preservation*. – 1990. – Vol. 14, Iss. 5. – P. 393–414. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1990.tb00142.x>
5. Electric stimulation: a versatile manipulation technique mediated microbial applications / Manjila Adhikari, Li Wang, Dhurba Adhikari [et al.] // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. – 2024. – Vol. 48, Iss. 2. – P. 171–192. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-03107-z>
6. Стишков, Ю. К. Коронный разряд и электрогазодинамические течения в воздухе / Ю. К. Стишков, А. В. Самусенко, И. А. Ашихмин // *Успехи физических наук*. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1331–1345. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038358>
7. Asipuella, A. Study and Numerical Simulation of Negative and Positive Corona Discharge: A Review / A. Asipuella, T. Iváncsy // *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. – 2022. – Vol. 66, Iss. 3. – P. 294–300. <https://doi.org/10.3311/PPee.19952>
8. Ashutosh Singh. A Comprehensive Review on Electrohydrodynamic Drying and High-Voltage Electric Field in the Context of Food and Bioprocessing / Ashutosh Singh, V. Orsat, Vijaya Raghavan // *Drying Technology*. – 2012. – Vol. 30, Iss. 16: Special Issue to Celebrate the 60<sup>th</sup> Birthday of Prof. Soponronnarit. – P. 1812–1820. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.708912>
9. Бурак, Л. Ч. Использование озоновой технологии в пищевой промышленности / Л. Ч. Бурак. – Минск: СтройМедиаПроект, 2022. – 144 с.
10. Zayats, Ya. Practical Electrotechnology / Ya. Zayats, A. Chorny. – Cambridge Scholars Publishing, UK, 2023. – 334 p.
11. A review of modeling bioelectrochemical systems: engineering and statistical aspects / S. Luo, H. Sun, Q. Ping [et al.] // *Energies*. – 2016. – Vol. 9, Iss. 2. – P. 1–27. <https://doi.org/10.3390/en9020111>
12. Янко, М. В. Аэроионная активация некоторых микробиологических процессов / М. В. Янко, Е. М. Заяц // *Агропанорама*. – 2019. – № 1 (131) – С. 28–29.

## References

1. Zhakin A. I. Electrohydrodynamics. *Physics–Uspekhi*, 2012, vol. 55, iss. 5, pp. 465–488. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201205b.0495>
2. Iranshahi K., Defraeye T., Rossi R. M., Müller U. C. Electrohydrodynamics and its applications: Recent advances and future perspectives. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 232, art. ID 125895. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125895>
3. Beretta G., Mastorgio A. F., Pedrali L., Saponaro S., Sezenna E. The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2019, vol. 18, pp. 29–75. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-09491-9>
4. Palaniappan S., Sastry S. K., Richter E. R. Effects of Electricity on Microorganisms: A Review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1990, vol. 14, iss. 5, pp. 393–414. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1990.tb00142.x>
5. Manjila Adhikari, Li Wang, Dhurba Adhikari, Sujana Khadka, Mati Ullah, Bricard Mbituyimana, Clemence Futila Bukatuka, Zhijun Shi, Guang Yang. Electric stimulation: a versatile manipulation technique mediated microbial applications, *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2024, vol. 48, iss. 2, pp. 171–192. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-03107-z>
6. Stishkov Yu. K., Samusenko A. V., Ashikhmin I. A. Corona discharge and electrodynamic flows in the air. *Physics–Uspekhi*, 2018, vol. 61, iss. 12, pp. 1331–1345. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038358>
7. Asipuella A., Iváncsy T. Study and Numerical Simulation of Negative and Positive Corona Discharge: A Review. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2022, vol. 66, iss. 3, pp. 294–300. <https://doi.org/10.3311/PPee.19952>
8. Ashutosh Singh, Orsat V., Vijaya Raghavan. A Comprehensive Review on Electrohydrodynamic Drying and High-Voltage Electric Field in the Context of Food and Bioprocessing. *Drying Technology*, 2012, vol. 30, iss. 16: Special Issue to Celebrate the 60<sup>th</sup> Birthday of Prof. Soponronnarit, pp. 1812–1820. <http://doi.org/10.1080/07373937.2012.708912>
9. Бурак Л. Ч. *Using Ozone Technology in the Food Industry*. Минск, StroyMediaProekt Publ., 2022. 144 p. (in Russian).
10. Zayats Ya., Chorny A. *Practical Electrotechnology*. Cambridge Scholars Publishing, UK, 2023. 334 p.
11. Luo S., Sun H., Ping Q., Jin R., He Z. A review of modeling bioelectrochemical systems: engineering and statistical aspects. *Energies*, 2016, vol. 9, iss. 2, pp. 1–27. <https://doi.org/10.3390/en9020111>
12. Yanko M. V., Zayats Ya. M. Aeroionic activation of some microbiological processes. *Agropanorama*, 2019, no. 1 (131), pp. 28–29 (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-44-56>  
УДК 66.047.7



*Оригинальная статья*

**А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков\***

*Витебский государственный технологический университет,  
Московский пр., 72, 210038, Витебск, Республика Беларусь*

**КИНЕТИКА ВЛАГООБМЕНА И ТЕМПЕРАТУРА В ПРОЦЕССЕ  
КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ТОНКИХ ПЛОСКИХ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Аннотация.** Изложены основные закономерности кинетики сушки тонких плоских материалов в период падающей скорости сушки. Приведен метод расчета среднеинтегральной температуры влажного материала на основе относительного температурного коэффициента сушки. Выполнена обработка опытных данных на основе полученных значений относительной скорости сушки в процессах сушки керамики, асбеста, шерстяной ткани. Предложена формула для расчета средней температуры. Приводится решение дифференциального уравнения теплопроводности для влажной пластины в процессе сушки в период падающей скорости при краевых условиях, учитывающих условия сушки. Приводится расчет коэффициента теплоотдачи. На основе изучения источников и обработки результатов экспериментов представлены формулы для вычисления коэффициента теплопроводности влажных материалов. Аналитическое решение задачи подтвердило, что при конвективной сушке в малоинтенсивных процессах второго периода сушки изменение температуры с уменьшением влагосодержания с экспоненциальной зависимости плавно переходит в линейную, что полностью согласуется с экспериментом. Представлено сопоставление значений температуры, полученных по экспериментальной формуле, с результатами аналитических решений. Получено достаточно надежное совпадение экспериментальных и расчетных аналитических значений температуры для периода падающей скорости сушки керамики, асбеста, ткани. Результаты сопоставления экспериментальных значений температур с расчетными аналитическими значениями указывают на более широкое применение дифференциальных уравнений теплового переноса для практических задач сушки различных влажных материалов.

**Ключевые слова:** влагосодержание, температура, коэффициент сушки, скорость сушки, коэффициент теплообмена, температура мокрого термометра

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** *Ольшанский Анатолий Иосифович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплоэнергетика» Витебского государственного технологического университета. <https://orcid.org/0009-0009-0000-6799>; *Котов Алексей Анатольевич* – ассистент кафедры «Теплоэнергетика» Витебского государственного технологического университета. E-mail: [tm@vstu.by](mailto:tm@vstu.by); *Кузьменков Сергей Михайлович* – ассистент кафедры «Технология машиностроения» Витебского государственного технологического университета. E-mail: [tm@vstu.by](mailto:tm@vstu.by)

**Вклад авторов:** *Ольшанский Анатолий Иосифович* – сбор и анализ литературных данных, вывод зависимостей, проведение вычислений, написание текста рукописи, обсуждение результатов и выводов; *Котов Алексей Анатольевич* – работа с графическим материалом, оформление, редактирование текста рукописи, обсуждение результатов и выводов; *Кузьменков Сергей Михайлович* – перевод, редактирование текста рукописи, обсуждение результатов и выводов.

**Для цитирования:** Ольшанский, А. И. Кинетика влагообмена и температура в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 44–56. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-44-56>

*Поступила в редакцию: 14.03.2024*

*Доработанный вариант: 26.12.2024*

*Утверждена к публикации: 06.03.2025*

*Подписана в печать: 12.03.2025*

*Original article*

Anatoly I. Ol'shanskii, Alexej A. Kotow, Sergey M. Kuzmenkov\*

Vitebsk State Technological University,  
72, Moskovsky Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus

**MOISTURE EXCHANGE KINETICS AND TEMPERATURE DURING THE PROCESS  
OF CONVECTIVE DRYING OF THIN FLAT WET MATERIALS**

**Abstract.** The basic laws of drying kinetics of thin flat materials during the falling drying rate are outlined. A method for calculating the average integral temperature of wet material on the basis of the relative temperature coefficient of drying is presented. Experimental data were processed based on the obtained values of the relative drying rate in the drying processes of ceramics, asbestos, and woolen fabric. A formula for calculating the average temperature is proposed. The solution of the differential equation of heat conduction for a wet plate in the process of drying (falling velocity period) with boundary conditions taking into account drying conditions is given. The calculation of the heat transfer coefficient is presented. Based on the study of many sources and processing of experimental results, formulas for calculating the coefficient of thermal conductivity of wet materials are presented. The analytical solution of the problem confirmed that during convective drying in low-intensity processes of the second drying period, the temperature change with a decrease in moisture content changes from an exponential dependence to a linear one, which is in full agreement with the experiment. A comparison of the temperature calculation by the experimental formula with the results of analytical solutions is presented. The analytical solution confirmed the laws established experimentally. Quite reliable coincidence of experimental and calculated analytical values of temperature for the period of falling speed drying of ceramics, asbestos, and fabric is obtained. The results of comparing experimental temperature values with calculated analytical values indicate a wider application of differential heat transfer equations for practical tasks of drying various wet materials.

**Keywords:** moisture content, drying rate, drying coefficient, wet bulb temperature, heat transfer coefficient, body heating rate

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Anatoly I. Ol'shanskii* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering at Vitebsk State Technological University. <https://orcid.org/0009-0009-0000-6799>; *Alexej A. Kotow* – Assistant of the Department of Heat Power Engineering at Vitebsk State Technological University. E-mail: [tm@vstu.by](mailto:tm@vstu.by); *Sergey M. Kuzmenkov* – Assistant of the Department of Mechanical Engineering at Vitebsk State Technological University. E-mail: [tm@vstu.by](mailto:tm@vstu.by)

**Contribution of the authors:** *Anatoly I. Ol'shanskii* – collection and analysis of literature data, derivation of dependencies, carrying out calculations, writing the text of the manuscript, discussion of results and conclusions; *Alexej A. Kotow* – work with graphic material, design, editing of the text of the manuscript, discussion of results and conclusions; *Sergey M. Kuzmenkov* – translation, editing of the text of the manuscript, discussion of results and conclusions.

**For citation:** Ol'shanskii A. I., Kotow A. A., Kuzmenkov S. M. Moisture exchange kinetics and temperature during the process of convective drying of thin flat wet materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 44–56 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-44-56>

*Received:* 14.03.2024

*Modified:* 26.12.2024

*Approved for publication:* 06.03.2025

*Signed to the press:* 12.03.2025

**Введение.** Температура материала является важным параметром сушки, определяющим технологические качества готового продукта. Для ее определения в периоде падающей скорости сушки необходимо знать зависимость между влагосодержанием влажного тела и временем сушки. Зависимость для определения температуры можно получить решением дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, для чего необходимо знать достоверные зависимости коэффициентов теплопереноса от влагосодержания и температуры [1–4].

Однако в большинстве случаев задача получается достаточно сложной в аналитическом отношении, так как является существенно нелинейной. Поэтому для практики сушки представляют интерес приближенные экспериментальные уравнения, полученные на основе обработки большого числа опытных данных [1–4]. В связи с широким применением компьютерной техники и развитием численных методов решения дифференциальных уравнений становится возможным использовать результаты этих решений для расчета кинетики сушки [2, 3]. В малоинтенсивных процессах термической обработки влажных материалов, когда температура не претерпевает значительных изменений за малые промежутки времени, а коэффициенты теплопереноса являются функцией только влагосодержания, можно использовать результаты этих решений для расчета кинетики сушки конкретных влажных материалов [5–8].

**Постановка задачи.** Аналитические решения имеют большое значение в том случае, когда они согласуются с закономерностями, установленными экспериментальным путем.

**Цель работы** – провести анализ опытных данных и сопоставить итоговые значения с результатами аналитических решений.

**Кинетика сушки.** Конвективная сушка тонких материалов проводилась нагретым воздухом со следующими постоянными параметрами: температура ( $t_c$ , °C), скорость движения ( $v$ , м/с) и относительная влажность ( $\phi$ , %). Сушимые тонкие материалы имеют большую удельную поверхность, так что перепады влагосодержания внутри материала и градиенты температуры малы. Режимы сушки тонких плоских тел в интервале температур воздуха  $t_c = 90\text{--}120$  °C и скорости  $v = 3\text{--}5$  м/с относятся к достаточно «мягким» режимам без резких скачков температуры.

На основе обработки опытных данных для процессов сушки керамики, листового асбеста и шерстяной ткани были построены графические зависимости, изображенные на рис. 1 и 2.

Характер протекания процесса сушки керамики, асбеста принципиально отличается от характера сушки тканей, для которых этот процесс протекает только в периоде падающей скорости сушки и без периода постоянной температуры [1, 3, 9].

В процессе сушки влажных материалов влагосодержание вначале уменьшается линейно до гигроскопического  $\bar{u}_{кр}$ . Когда влагосодержание  $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ , начинается период падающей скорости сушки. Период постоянной скорости сушки принято называть первым, а период падающей скорости – вторым [2, 3]. Отличительной особенностью сушки капиллярно-пористых материалов (керамики и асбеста) является наличие и периода постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра  $t_m$  [1–4] (см. рис. 1). Кривая сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  во втором периоде представляет экспоненциальную зависимость [1, 2]. При сушке тканей (см. рис. 2) температура увеличивается с начала сушки по экспоненциальному закону и с уменьшением влагосодержания ( $\bar{u}$ ) плавно переходит в линейную зависимость. При сушке керамики и асбеста (см. рис. 1) к концу процесса температурные кривые  $\bar{t} = f(\bar{u})$  переходят в линейные зависимости.

Рассмотрим основные положения кинетики сушки, необходимые для расчета температуры в период падающей скорости сушки. Относительная скорость сушки ( $N^*$ ) устанавливается зависимостью [1–4]

$$N^* = \frac{1}{N} \cdot \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right|, \quad (1)$$

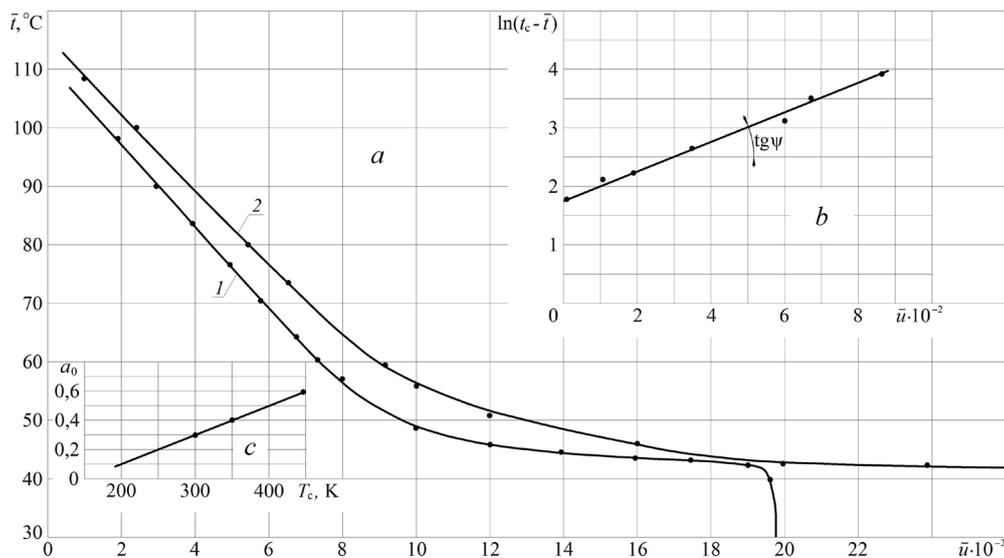


Рис. 1. Температурные кривые  $\bar{t} = f(\bar{u})$  (a) в процессе сушки керамической пластины (кривая 1) и листового асбеста (кривая 2) при режиме сушки:  $t_c = 120$  °C,  $v = 5$  м/с,  $\phi = 5$  % и зависимости  $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\bar{u})$  (b), коэффициента  $a_0 = f(T_c)$  (c) в процессе сушки керамической плитки (для режимов сушки:  $t_c = 90\text{--}120$  °C;  $v = 3\text{--}5$  м/с)

Fig. 1. Temperature curves  $\bar{t} = f(\bar{u})$  (a) during the drying of ceramic plate (curve 1) and asbestos sheet (curve 2) under the drying mode:  $t_c = 120$  °C,  $v = 5$  m/s,  $\phi = 5$  % and the dependences  $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\bar{u})$  (b), coefficient  $a_0 = f(T_c)$  (c) in the process of drying ceramic tiles (for drying modes:  $t_c = 90\text{--}120$  °C;  $v = 3\text{--}5$  m/s)

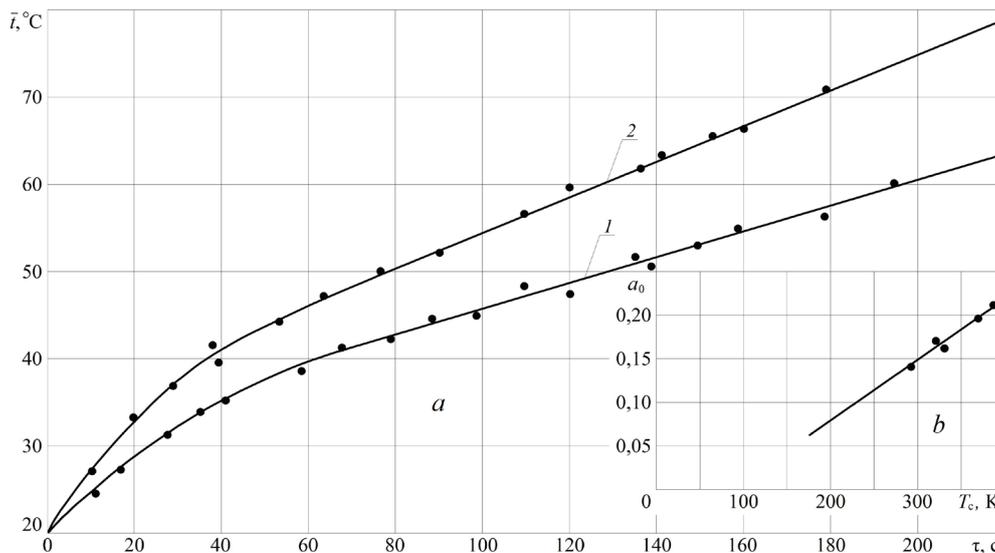


Рис. 2. Температурные кривые  $\bar{t} = f(\tau)$  (а) при сушке шерстяной ткани для двух режимов сушки:  $t_c = 65^\circ\text{C}$ ,  $v = 1$  м/с,  $\varphi = 10\%$  (кривая 1),  $t_c = 90^\circ\text{C}$ ,  $v = 5$  м/с,  $\varphi = 6\%$  (кривая 2); зависимость коэффициента  $a_0 = f(T_c)$  (b)  
 Fig. 2. Temperature curves  $\bar{t} = f(\tau)$  (a) when drying woolen fabric for two drying modes:  $t_c = 65^\circ\text{C}$ ,  $v = 1$  m/s,  $\varphi = 10\%$  (curve 1),  $t_c = 90^\circ\text{C}$ ,  $v = 5$  m/s,  $\varphi = 6\%$  (curve 2); the dependence of the coefficient  $a_0 = f(T_c)$  (b)

где  $N$  – скорость сушки в первом периоде. Скорость сушки во втором периоде определяется формулой [1–3]

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = K(\bar{u} - u_p), \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент сушки,  $u_p$  – равновесное влагосодержание материала. Величина  $N^*$  не зависит от режима сушки и является только функцией влагосодержания [1–3].

Для тканей при отсутствии периода постоянной скорости сушки скорость сушки равна максимальной [1, 9]:

$$N_{\text{макс}} = \left( \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{\text{макс}}.$$

Обработкой опытных данных по сушке значительного количества образцов разнородных влажных материалов различными методами сушки получена общая зависимость для относительной скорости сушки [5]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = N^{*0,57}, \quad (3)$$

где  $\bar{\alpha}_{\text{кр}}$ ,  $\bar{\alpha}$  – коэффициенты теплоотдачи в первом и втором периодах сушки.

П. Д. Лебедевым [1–4] было предложено изменение коэффициента теплоотдачи во втором периоде учитывать соотношением

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^n, \quad (4)$$

где  $n$  – постоянная, определяемая экспериментально. При сушке тканей соотношение (4) принимает вид

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{макс}}} = \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \right)^n, \quad (5)$$

здесь  $\bar{\alpha}_{\text{макс}}$  – максимальное значение коэффициента теплоотдачи,  $\bar{u}_0$  – начальное влагосодержание материала.

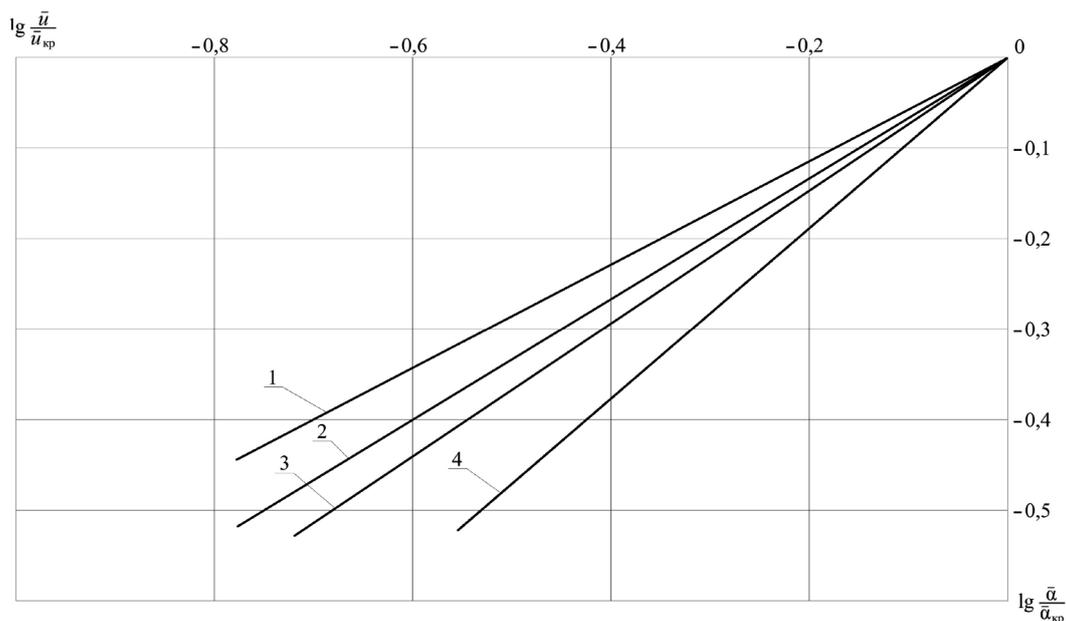


Рис. 3. Зависимость  $\lg \bar{u}/\bar{u}_{кр}$  от  $\lg \bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}$  для сушки асбеста (1), войлока (2), керамики (3) и глины (4)

Fig. 3. Dependence of  $\lg \bar{u}/\bar{u}_{кр}$  on  $\lg \bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}$  for drying asbestos (1), felt (2), ceramics (3) and clay (4)

На рис. 3 дана графічная залежнасць  $\lg \bar{u}/\bar{u}_{кр}$  ад  $\lg \bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}$  для працэсаў сушкі керамікі, лістовага асбеста, шерстянога войлока і гліны. Из графічнай залежнасці (рис. 3) вызначаюцца пастаянныя  $n$  в ураўненнях (4) і (5) па саотношэнню

$$n = \frac{\lg(\bar{\alpha} / \bar{\alpha}_{кр})}{\lg(\bar{u} / \bar{u}_{кр})}.$$

Для тканей  $\bar{u}_{кр} = \bar{u}_0$ .

Пастаянная  $n$  в ураўненні (4) прымае значэння: для асбеста  $n \approx 0,72$ , для войлока  $n \approx 0,71$ , для керамікі  $n \approx 0,74$ , для гліны  $n \approx 0,9$ . При сушцы тканей і сукна  $n \approx 0,42$  [1].

На аснове (4) і (5) для адноснай скорасці сушкі  $N^*$  можна запісаць

$$N^* \approx \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,57}. \quad (6)$$

Для упрощения расчетов сушки керамики, асбеста и войлока с погрешностью в 2 % принимаем для этих материалов среднее значение постоянной  $n = 0,695$ . Подставляя принятую величину  $n = 0,695$  в уравнение (6), получим

$$N^* \approx \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,22}. \quad (7)$$

При сушке глины показатель степени в (7) принимает значение 1,58, тканей и сукна – 0,74.

Для проверки достоверности формулы (7) была проведена обработка опытных кривых сушки и кривых скорости сушки керамики, асбеста и войлока в широком диапазоне режимов. В результате получена зависимость, которая аппроксимируется приближенной формулой

$$N^* \approx \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,3}. \quad (8)$$

Сопоставление формул (7) и (8), полученных разными методами обработки опытных данных, дает погрешность в 4 %, что находится в области погрешности эксперимента.

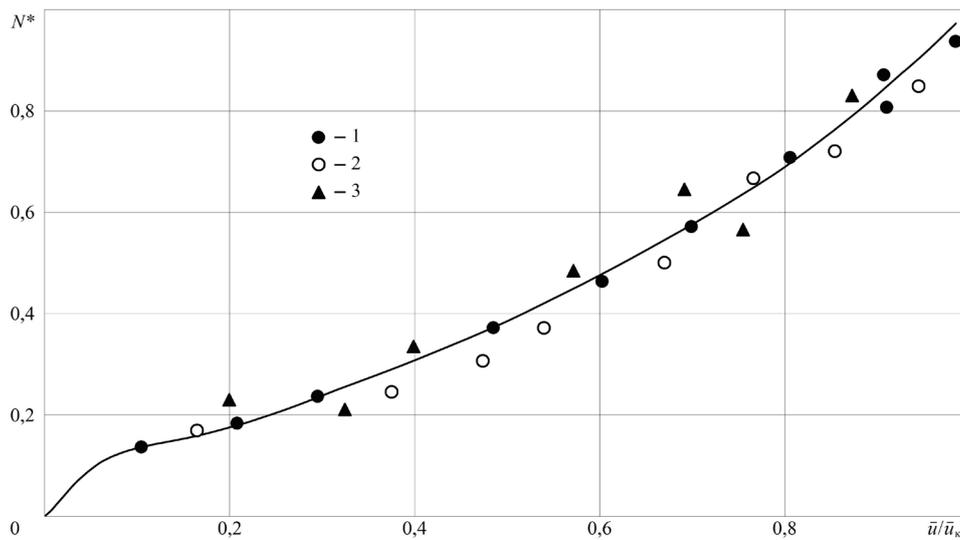


Рис. 4. Зависимость относительной скорости сушки  $N^*$  от относительного влагосодержания  $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$  для сушки керамики (1), листового асбеста (2) и шерстяного войлока (3)

Fig. 4. The dependence of the relative drying rate  $N^*$  on the relative moisture content  $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$  for drying ceramics (1), asbestos sheets (2) and wool felt (3)

На рис. 4 даны результаты обработки эксперимента для зависимости  $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ .

На основе анализа обобщенных кривых сушки и скорости сушки В. В. Красников получил уравнение для скорости сушки [2]

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = N \cdot N^*, \quad (9)$$

из которого следует, что скорость сушки в период падающей скорости можно определить по величинам  $N$  и  $N^*$  для заданного влагосодержания  $\bar{u}$  [1–6].

Исходя из выражений (2) и (8) коэффициент сушки  $K$  равен

$$K = \frac{N \cdot N^*}{\bar{u} - u_p} = \frac{N \cdot (\bar{u}/\bar{u}_{кр})^{1,22}}{\bar{u} - u_p}. \quad (10)$$

Следовательно, коэффициент сушки  $K$  во втором периоде величина переменная.

Для расчета средней температуры материала во втором периоде сушки А. В. Лыковым [1, 5, 6–8] был введен в кинетику сушки относительный температурный коэффициент сушки:

$$B = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \frac{\Delta\bar{u}}{\Delta t}; \quad \frac{d\bar{t}}{T_c} = -B \frac{d\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}, \quad (11)$$

где  $\Delta\bar{u}$  и  $\Delta t$  – фиксированные значения влагосодержания и температуры;  $d\bar{t}/d\bar{u} = b$  – температурный коэффициент сушки, определяемый графическим дифференцированием температурной кривой  $\bar{t} = f(\bar{u})$ .

В свою очередь относительный температурный коэффициент сушки  $B$  является наиболее общей характеристикой процесса, определяющей закономерности изменения температуры во втором периоде [1, 5, 6, 8]. Для большого ряда капиллярно-пористых материалов зависимость  $B = f(\bar{u})$  выражается эмпирической формулой [1, 2, 5–7]

$$B = a_0 \exp(-m(\bar{u} - u_p)). \quad (12)$$

Постоянные  $a_0$  и  $m$  определяются экспериментально.

Для случая конвективной сушки за фиксированные значения  $\Delta\bar{u}$  и  $\Delta t$  удобно принять  $\Delta\bar{u} = \bar{u}_{кр}$ ,  $\Delta t = T_c$ , где  $T_c$  – абсолютная температура среды [1, 2, 5, 7, 8]. Подставляя в (11) уравнение (12) и интегрируя, получим уравнение температурной кривой

$$\bar{t} = t_c - \frac{a_0 T_c}{m \bar{u}_{кр}} \left( 1 - \exp(-m(\bar{u} - u_p)) \right). \quad (13)$$

Для материалов, сушка которых протекает в периоде падающей скорости и без периода постоянной температуры с непрерывным повышением температуры, постоянная  $m$  меняет свой знак на противоположный и уравнение принимает вид [7–9]

$$\bar{t} = t_c - \frac{a_0 T_c}{m \bar{u}_0} \left( \exp(m(\bar{u} - u_p)) - 1 \right). \quad (14)$$

Коэффициент  $a_0$  является линейной функцией абсолютной температуры. Постоянная  $m$  находится построением графической зависимости  $\ln(t_c - \bar{t}_1) = f(\bar{u})$ . Если отложить по оси ординат величину  $\ln(t_c - \bar{t}_1)$ , а по оси абсцисс – влагосодержание  $\bar{u}$ , то получим прямую, тангенс угла наклона которой к оси  $\bar{u}$  равен величине постоянной  $m$  [1, 11]:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\ln(t_c - \bar{t}_1) - \ln(t_c - \bar{t}_2)}{\bar{u}_1 - \bar{u}_2} = m.$$

На рис. 1, *b* изображена такая зависимость для процесса сушки керамической пластины, а на рис. 1, *c* и 2, *b* даны линейные зависимости для коэффициента  $a_0$  в процессах сушки керамики и тканей. Значения  $m$  и  $a_0$  для некоторых материалов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Значения постоянных  $m$  и  $a_0$  при влагосодержаниях  $\bar{u}_0$ ,  $\bar{u}_{кр}$  и режимов сушки керамики, асбеста, войлока, картона и шерстяной ткани

Table 1. The values of constants  $m$  and  $a_0$  at moisture contents of  $\bar{u}_0$ ,  $\bar{u}_{кр}$  and drying modes of ceramics, asbestos, felt, cardboard and woolen fabric

Материал Material	$\bar{u}_0$	$\bar{u}_{кр}$	Параметры режимов сушки Parameters of drying modes			$m$	$a_0$
			$t_c, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м/с}$ $v, \text{m/s}$	$\varphi, \%$		
Керамическая плитка, $\delta = 5 \text{ мм}$ Ceramic tiles, $\delta = 5 \text{ мм}$	0,2–0,24	0,1–0,12	90–120	3–5	4	35	$3,9 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 1$
Листовой асбест, $\delta = 6 \text{ мм}$ Sheet asbestos, $\delta = 6 \text{ мм}$	0,46–0,48	0,2–0,22	90–120	3–5	5	22	$6,4 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 1,8$
Шерстяной войлок, $\delta = 8 \text{ мм}$ Wool felt, $\delta = 8 \text{ мм}$	1,14–1,16	0,71–0,75	90–150	3–5	5	12	$2,85 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 0,7$
Технический картон, $\delta = 4,5 \text{ мм}$ Technical cardboard, $\delta = 4,5 \text{ мм}$	0,75–0,78	0,5–0,55	90–110	3–5	6	–1,8	$0,415 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 0,1$
Шерстяная ткань, $\delta = 0,6–0,8 \text{ мм}$ Woolen fabric, $\delta = 0,6–0,8 \text{ мм}$	1,12–1,14	–	65–90	2–5	6	–0,2	$1,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 0,17$

Из уравнений (13) и (14) следует, что средняя температура материала от влагосодержания изменяется по закону экспоненты. Если разложить в ряд  $\exp(-m(\bar{u} - u_p))$  и ограничиться первыми членами ряда, то с уменьшением влагосодержания экспоненциальная зависимость переходит в линейную [1]. При этом температурные коэффициенты сушки  $b = d\bar{t}/d\bar{u} = \text{const}$  и  $B = b \cdot \bar{u}_{кр}/T_c = \text{const}$ , а коэффициент  $a_0 = B$  [1, 2]. Тогда линейное уравнение температурной кривой будет иметь вид [10, 11, 17, 18]

$$\bar{t} = t_c - \frac{BT_c}{\bar{u}_{кр}} (\bar{u} - u_p). \quad (15)$$

Обозначим комплекс  $BT_c/\bar{u}_{кр}$  через  $b_0$  и запишем [11]

$$\bar{t} = t_c - b_0(\bar{u} - u_p). \quad (16)$$

На основе изучения многих процессов сушки различных капиллярно-пористых материалов А. В. Лыков полагал, что зависимость между средней температурой  $\bar{t}$  и влагосодержанием  $\bar{u}$  может быть линейной [1, 10–12] и выражаться формулой (16). Например, для такого типичного капиллярно-пористого тела, как пористая керамика, при сушке в режимах  $t_c = 60$  °С,  $\varphi = 10$  % и  $t_c = 80$  °С,  $\varphi = 6$  % и скорости воздуха  $v \approx 0,5–0,8$  м/с В. П. Журавлева показала, что в периоде падающей скорости сушки зависимости между средней температурой и влагосодержанием являются линейными [1, 13], а температурный коэффициент сушки  $b = d\bar{t}/d\bar{u} = \text{const}$ .

Из рис. 1 и 2 видно, что зависимости  $\bar{t} = f(\bar{u})$  и  $\bar{t} = f(\tau)$  с уменьшением  $\bar{u}$  становятся линейными.

Сушка тканей имеет свои особенности. В отличие от большинства других тонких материалов, сушка происходит сразу в период падающей скорости от начального влагосодержания  $\bar{u}_0$  и без периода постоянной температуры [8]. Ткани на сушку подаются после механического отжима с влагосодержанием  $\bar{u}_0 \approx 1,1–1,3$ . При сушке тканей как очень тонких материалов (толщина  $\delta \approx 0,4–1,6$  мм) расход тепла на нагревание влажного тела значительно ниже расхода тепла на испарение из него влаги [1, 9, 11].

Для использования формулы (15) при расчете средней температуры необходимо знать относительный температурный коэффициент сушки  $B$ . В области линейной зависимости  $\bar{t} = f(\bar{u})$  коэффициент  $B = \text{const}$ . Коэффициент  $B$  в процессе сушки керамической пластины ( $t_c = 120$  °С,  $v = 5$  м/с) для области влагосодержаний  $\bar{u} \approx 0,06–0,025$  по формуле (12) дает значение  $B \approx 0,21$ , по экспериментальным данным [7, 8]  $B = 0,214$ . Коэффициент  $b_0$  уравнения (16) зависит от температурного коэффициента сушки  $b = d\bar{t}/d\bar{u}$ , точность определения которого задается погрешностью графического дифференцирования температурной кривой  $\bar{t} = f(\bar{u})$ . Экспериментальное значение  $b_0 \approx 590$  °С ( $\bar{u} = 0,08$ ) по уравнению (16) хорошо согласуется со значением (597 °С), полученным из решения аналитического уравнения (22) при  $\bar{u} = 0,08$ .

При сушке керамической плитки толщиной  $\delta \approx 6$  мм В. П. Журавлевой [13] получены следующие значения для  $B$  при скорости воздуха  $v = 4$  м/с:

- 1)  $t_c = 100$  °С,  $B \approx 0,08$ ;
- 2)  $t_c = 150$  °С,  $B \approx 0,11$ ;
- 3)  $t_c = 200$  °С,  $B \approx 0,23$ .

Эти значения коэффициента  $B$  согласуются со значениями опытных данных в [14, 15].

Из решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для неограниченной пластины А. В. Лыковым получено уравнение для параметра  $b_0$  [11, 12, 16].

Для аналитического определения средней температуры воспользуемся дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности А. В. Лыкова [10–12]. Уравнение теплопроводности при  $\tau = 0$ ,  $t = t_m$  принимает следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \quad (17)$$

при  $x = \pm R$ :

$$\frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{вл}}(t_c - t) - \frac{\rho r R}{\lambda_{вл}} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau} = 0, \quad (18)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\bar{\alpha}$  – коэффициент теплоотдачи,  $\lambda_{вл}$  – коэффициент теплопроводности влажного тела,  $R$  – половина толщины пластины,  $\rho$  – плотность материала,  $r$  – теплота парообразования,  $t$  – текущая температура материала.

Для тонких материалов скорость сушки – экспоненциальная функция времени, определяемая по выражению

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = K(\bar{u} - u_p). \quad (19)$$

Интегрирование (19) для периода падающей скорости сушки рассчитывается следующим образом:

$$\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} = \exp(-K\tau_{II}), \quad (20)$$

где  $\bar{u}_{кр}$  – критическое влагосодержание при переходе первого периода сушки во второй;  $\tau_{II}$  – время сушки во втором периоде, отсчитываемое от нуля.

Решением дифференциального уравнения с заданными краевыми условиями, которые учитывают скорость сушки в периоде падающей скорости, получено уравнение

$$\bar{t} = t_c - \frac{rRK\rho}{\bar{\alpha} - Kc_{вл}\rho R} (\bar{u} - u_p), \quad (21)$$

где  $c_{вл}$  – удельная теплоемкость влажного тела, Дж/(кг·°C).

Обозначим через  $b_0$  часть уравнения (21):

$$b_0 = \frac{rRK\rho}{\bar{\alpha} - Kc_{вл}\rho R}. \quad (22)$$

Выражение для параметра  $b_0$  можно упростить, если знаменатель в (22) умножим и разделим на  $c_{вл}\rho R$ . В результате получаем

$$b_0 = \frac{rK}{c_{вл}(Z - K)}. \quad (23)$$

Комплекс  $Z$  [11] определяет интенсивность теплообмена при взаимодействии поверхности пластины с окружающей средой:

$$Z = \frac{\bar{\alpha}}{c_{вл}\rho R}. \quad (24)$$

Решение справедливо, если  $Z > K$ . Подставляя (23) в (21), получим уравнение температурной кривой

$$\bar{t} = t_c - \frac{rK}{c_{вл}(Z - K)} (\bar{u} - u_p). \quad (25)$$

Из уравнений (15), (16) и (23) следует

$$b_0 \approx \frac{rK}{c_{вл}(Z - K)} \approx \frac{BT_c}{\bar{u}_{кр}}.$$

Коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  рассчитывается по формуле для теплообменного критерия Нуссельта [1, 3, 7]

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \left(\frac{T_c}{T_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^n, \quad (26)$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $T_m$  – абсолютная температура мокрого термометра;  $C$  – коэффициент, который принимает значения: для керамики  $C = 0,75$ , для асбеста  $C = 0,70$ , для тканей  $C = 0,89$ ; коэффициент  $n = 0,74$  для керамики,  $n = 0,72$  для асбеста,  $n = 0,71$  для войлока,  $n = 0,42$  для тканей.

Коэффициент теплоотдачи определяется выражением

$$\bar{\alpha} \approx \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{воз}}{l}, \quad (27)$$

где  $\lambda_{воз}$  – коэффициент теплопроводности воздуха по таблицам [3], Вт/(м·°C);  $l$  – длина образца материала по направлению набегания потока воздуха, м.

При сушке влажных материалов влагосодержание уменьшается, а температура увеличивается, поэтому все теплофизические коэффициенты изменяются. Наибольшее изменение претерпе-

вает коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{вл}}$ . Коэффициент температуропроводности  $a$  изменяется мало, так как со снижением  $\lambda_{\text{вл}}$  одновременно уменьшается произведение  $c_{\text{вл}} \cdot \rho$  приблизительно с такой же скоростью [10, 11]. Средняя удельная теплоемкость  $c_{\text{вл}}$  зависит от влагосодержания материала и незначительно – от температуры [1, 3]

$$c_{\text{вл}} \approx c_0 + c_{\text{в}} \cdot \bar{u},$$

где  $c_0$  – удельная теплоемкость сухого тела, Дж/(кг·°C);  $c_{\text{в}}$  – теплоемкость воды, Дж/(кг·°C). Коэффициенты теплопроводности сухих материалов  $\lambda_0$  почти не зависят от температуры в области от 30 до 90 °C [1–3].

Коэффициенты теплоотдачи  $\bar{a}$  в периоде падающей скорости сушки, определяемые по формуле (26), полученной из теории подобия на основе эксперимента, отражают приближенные значения  $\bar{a}$ . Поэтому и очень важный параметр  $Z$  также определяется приближенно.

Обработкой опытных данных по коэффициенту  $\lambda_{\text{вл}}$  для керамики и асбеста по формуле В. И. Дубницкова на основе изучения источников [1, 10, 13, 19–22] получена формула

$$\lambda_{\text{вл}} = \lambda_0 + A_0 \bar{t} \cdot \bar{u} \exp(-B_0 \bar{u}), \quad (28)$$

где коэффициенты  $A_0, B_0$  определяются опытным путем: для керамики  $A_0 = 0,075, B_0 = 2, \lambda_0 = 0,8$  Вт/(м·°C); для асбеста  $A_0 = 0,03, B_0 = 2, \lambda_0 = 0,12$  Вт/(м·°C).

Коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{вл}}$  для шерстяных тканей и шерстяного строительного войлока практически не зависит от температуры до  $t \approx 90$  °C. Зависимость  $\lambda_{\text{вл}}$  для шерстяных тканей и войлока от влагосодержания хорошо изучена [19–22] и приближенно выражается соотношением

$$\lambda_{\text{вл}} \approx \lambda_0 + \left( \frac{d\lambda}{dW} \right) W,$$

где  $W$  – влагосодержание, %.

Отношение  $d\lambda/dW$  характеризует прирост коэффициента теплопроводности на каждый 1 % прироста влажности. В сушильной практике принята связь  $\bar{u} = 0,01W$ . Для шерстяных тканей и войлока ( $\rho = 150\text{--}350$  кг/м<sup>3</sup>) величина  $d\lambda/dW$  приближенно составляет 0,0029–0,0046 и с погрешностью не более чем в 5 % определяется по формуле [22]

$$\lambda_{\text{вл}} = \lambda_0 + 0,004W. \quad (29)$$

Значения средних температур для процессов сушки керамической плитки, листового асбеста и шерстяной ткани, вычисленные по экспериментальным формулам (13), (15) и по аналитической (25), даны в табл. 2. По формуле (15) расчет температуры был проведен при  $\bar{u} < \bar{u}_{\text{кр}}$ , принимая линейную зависимость средней температуры  $\bar{t}$  от влагосодержания  $\bar{u}$ . Анализ полученных расчетных значений температур по всем формулам дает погрешность в 5–8 %. Следовательно, температурную кривую  $\bar{t} = f(\bar{u})$  во втором периоде нет необходимости делить на две зоны. В общем случае для капиллярно-пористых материалов температурная кривая представляет пологую экспоненту, плавно переходящую при уменьшении влагосодержания в линейную зависимость.

Т а б л и ц а 2. Значения средних температур, вычисленных по формулам (13), (15), (25) и комплекса в уравнении (25) для сушки керамики, листового асбеста и шерстяной ткани  
 T a b l e 2. The values of average temperatures calculated by the formulas (13), (15), (25) and the complex in equation (25) for drying ceramics, asbestos sheets and woolen fabric

Керамическая плитка: 120 × 80 × 5 мм; $\rho = 1840$ кг/м <sup>3</sup> ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/(м·°C); $c_0 = 860$ Дж/(кг·°C); $\bar{u}_0 = 0,2$ ; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,1$ ; $u_p = 0$ . Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $t_m = 50$ °C; $N = 0,0185$ мин <sup>-1</sup> Ceramic tiles: 120 × 80 × 5 mm; $\rho = 1840$ kg/m <sup>3</sup> ; $\lambda_0 = 0.8$ W/(m·°C); $c_0 = 860$ J/(kg·°C); $\bar{u}_0 = 0.2$ ; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0.1$ ; $u_p = 0$ . Drying mode: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ m/s; $\varphi = 5$ %; $t_m = 50$ °C; $N = 0.0185$ min <sup>-1</sup>											
$\bar{u}$	$\bar{a},$ Вт/(м <sup>2</sup> ·°C) (26)	$\lambda_{\text{вл}},$ Вт/(м·°C) (28)	$N^*$ (7)	$Z,$ мин <sup>-1</sup> (24)	$K,$ мин <sup>-1</sup> (10)	$b_0,$ °C экс (16)	$b_0,$ °C (23)	$\bar{t},$ °C экс (13)	$\bar{t},$ °C (15)	$\bar{t},$ °C (25)	
0,08	63,5	0,79	0,82	0,69	0,184	750	870	60	62	55	53
0,07	55,4	0,75	0,73	0,62	0,185	785	860	65	65	62	60
0,06	46,4	0,72	0,64	0,67	0,192	800	870	72	69	70	69

Окончание табл. 2

$\bar{u}$	$\bar{a}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) (26)	$\lambda_{\text{вл.}}$ Вт/(м·°С) (28)	$N^*$ (7)	$Z$ , мин <sup>-1</sup> (24)	$K$ , мин <sup>-1</sup> (10)	$b_0$ , °С экс (16)	$b_0$ , °С (23)	$\bar{t}$ , °С экс (13)	$\bar{t}$ , °С (15)	$\bar{t}$ , °С (25)	
0,05	41,6	0,68	0,54	0,65	0,200	770	870	80	77	78	77
0,04	38,4	0,64	0,45	0,68	0,210	870	880	85	82	87	85
0,03	30,8	0,60	0,36	0,67	0,215	867	880	98	94	96	95
0,02	23,6	0,57	0,24	0,68	0,220	960	890	100	100	103	102
Листовой асбест: 120 × 80 × 6 мм; $\rho = 770 \text{ кг/м}^3$ ; $\lambda_0 = 0,123 \text{ Вт/(м·°С)}$ ; $c_0 = 825 \text{ Дж/(кг·°С)}$ ; $\bar{u}_0 = 0,46$ ; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,20$ ; $u_p = 0$ . Режим сушки: $t_c = 120 \text{ °С}$ ; $v = 5 \text{ м/с}$ ; $\varphi = 5 \%$ ; $t_m = 42 \text{ °С}$ ; $N = 0,028 \text{ мин}^{-1}$ Sheet asbestos: 120 × 80 × 6 mm; $\rho = 770 \text{ kg/m}^3$ ; $\lambda_0 = 0.123 \text{ W/(m·°C)}$ ; $c_0 = 825 \text{ J/(kg·°C)}$ ; $\bar{u}_0 = 0.46$ ; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0.20$ ; $u_p = 0$ . Drying mode: $t_c = 120 \text{ °C}$ ; $v = 5 \text{ m/s}$ ; $\varphi = 5 \%$ ; $t_m = 42 \text{ °C}$ ; $N = 0.028 \text{ min}^{-1}$											
$\bar{u}$	$\bar{a}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) (26)	$\lambda_{\text{вл.}}$ Вт/(м·°С) (28)	$N^*$ (7)	$Z$ , мин <sup>-1</sup> (24)	$K$ , мин <sup>-1</sup> (10)	$b_0$ , °С экс (16)	$b_0$ , °С (23)	$\bar{t}$ , °С экс (13)	$\bar{t}$ , °С (15)	$\bar{t}$ , °С (25)	
0,16	36,2	0,328	0,82	0,61	0,140	430	450	52	54	54	54
0,14	33,3	0,289	0,73	0,60	0,140	455	470	57	57	57	55
0,10	31,6	0,252	0,54	0,71	0,150	550	510	65	62	65	64
0,08	28,4	0,212	0,45	0,69	0,155	580	550	72	70	78	72
0,04	20,8	0,174	0,24	0,78	0,165	610	600	86	84	–	89
0,02	18,6	0,135	0,14	0,80	0,180	660	680	100	99	–	104
Шерстяная ткань: $\delta = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; $\rho = 200 \text{ кг/м}^3$ ; $\lambda_0 = 0,046 \text{ Вт/(м·°С)}$ ; $c_0 = 1300 \text{ Дж/(кг·°С)}$ ; $\bar{u}_0 = 1,12$ ; $u_p = 0,002$ . Режим сушки: $t_c = 90 \text{ °С}$ ; $v = 5 \text{ м/с}$ ; $\varphi = 6 \%$ ; $N_{\text{макс}} = 0,016 \text{ с}^{-1}$ Woolen fabric: $\delta = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ; $\rho = 200 \text{ kg/m}^3$ ; $\lambda_0 = 0.046 \text{ W/(m·°C)}$ ; $c_0 = 1300 \text{ J/(kg·°C)}$ ; $\bar{u}_0 = 1.12$ ; $u_p = 0.002$ . Drying mode: $t_c = 90 \text{ °C}$ ; $v = 5 \text{ m/s}$ ; $\varphi = 6 \%$ ; $N_{\text{макс}} = 0.016 \text{ s}^{-1}$											
$\bar{u}$	$\bar{a}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) (26)	$\lambda_{\text{вл.}}$ Вт/(м·°С) (28)	$N^*$ (7)	$Z$ , с <sup>-1</sup> (24)	$K$ , с <sup>-1</sup> (10)	$b_0$ , °С экс (16)	$b_0$ , °С (23)	$\bar{t}$ , °С экс (14)	$\bar{t}$ , °С (16)	$\bar{t}$ , °С (25)	
0,7	32,7	0,328	0,72	0,120	0,016	85	90	34	34	32	30
0,6	30,8	0,289	0,65	0,131	0,017	89	94	38	37	36	35
0,5	26,4	0,252	0,57	0,127	0,018	92	96	45	44	42	42
0,4	25,4	0,212	0,50	0,168	0,020	102	98	48	52	49	51
0,3	23,5	0,175	0,39	0,220	0,021	105	99	56	61	58	59
0,2	22,4	0,142	0,29	0,260	0,022	115	110	67	71	68	67

**Заключение.** Рассмотренные закономерности изменения температуры в периоде падающей скорости сушки показали, что температурная кривая в этом периоде представляет сложную экспоненциальную зависимость, переходящую при уменьшении влагосодержания в пологую экспоненту, близкую к линейной. Аналитическое решение задачи подтверждает закономерности изменения температуры, установленные опытным путем.

Анализ проведенного исследования характера закономерности изменения температуры в процессах сушки влажных материалов и сопоставление полученных экспериментальных значений температуры с аналитическими указывает на необходимость более широкого использования аналитических решений дифференциальных уравнений в процессах сушки различных материалов, что имеет практическое значение.

### Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
2. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
3. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
4. Рудобашта, С. П. Массотеплоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
5. Лыков А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 1972. – Т. 23, № 3. – С. 401–406.
6. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. – СПб.: ГИОРД, 2013. – 224 с.
7. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 3. – С. 584–594.

8. Куц, П. С. К вопросу приближенной методики расчета кинетики конвективной сушки плоских материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 1975. – Т. 28, № 4. – С. 594–598.
9. Ольшанский, А. И. Кинетика тепловлагоденоса и температура в процессе сушки тканей / А. И. Ольшанский, А. С. Марущак // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 449–457. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-449-457>
10. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 519 с.
11. Лыков, А. В. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности / А. В. Лыков, Л. Я. Ауэрман. – М.: Пищепромиздат, 1946. – 286 с.
12. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
13. Журавлева, В. П. Массотеплоперенос при термообработке и сушке капиллярно-пористых строительных материалов / В. П. Журавлева. – Минск: Наука и техника, 1972. – 192 с.
14. Ольшанский, А. И. Аналитический расчет температуры в процессе сушки тонких капиллярно-пористых плоских материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>
15. Ольшанский, А. И. Температура материала в процессе конвективной сушки тонких материалов в периоде падающей скорости сушки / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 2. – С. 378–383.
16. Рудобашта, С. П. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 705–714.
17. Натареев, О. С. Теплоперенос в процессе конвективной сушки влажного материала / О. С. Натареев, Н. Р. Коккина, С. В. Натареев // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, вып. 2. – С. 67–72.
18. Кошелева, М. К. Особенности процесса сушки нетканых текстильных материалов / М. К. Кошелева, С. П. Рудобашта // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Первых Междунар. Лыковских науч. чтений (22–23 сент. 2015 г.) / РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева. – М.: Университет. книга, 2015. – С. 205–210.
19. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. – М.: НИИ строительной физики, 1969. – 143 с.
20. Блази, В. Строительная физика: справ. проектировщика. – М.: Техносфера, 2005. – 536 с.
21. Физические величины / под ред. И. С. Григорьева, Е. Х. Меймехова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
22. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды / П. А. Колесников. – М.: Легкая индустрия, 1965. – 337 с.

## References

1. Lykov A. V. *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (in Russian).
2. Krasnikov V. V. *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 288 p. (in Russian).
3. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
4. Rudobashta S. P. *Mass-Heat Transfer in Solid-Phase Systems*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 248 p. (in Russian).
5. Lykov A. V., Kuts P. S., Olshansky A. I. Kinetics of heat transfer during the desiccation of moist materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1972, vol. 23, iss. 3, pp. 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/BF00832214>
6. Vasilyev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. *Drying Technology. Basics of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, GIORD Publ., 2013. 224 p. (in Russian).
7. Ol'shanskii A. I. Heat transfer kinetics and experimental methods for calculating the material temperature in the drying process. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, iss. 3, pp. 622–633. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0876-1>
8. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. Approximate method of calculating the kinetics of convective drying of flat materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1975, vol. 28, iss. 4, pp. 419–422. <https://doi.org/10.1007/BF00878212>
9. Ol'shanskii A. I., Marushchak A. S. Heat and moisture transfer kinetics and temperature during drying of fabrics. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 449–457 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-449-457>
10. Lykov A. V. *Theoretical Foundations of Construction Thermophysics*. Minsk, Academy of Sciences of the Belarusian SSR, Publ., 1961. 519 p. (in Russian).
11. Lykov A. V. *Theory of Drying Capillary-Porous Colloidal Materials of the Food Industry*. Moscow, Pishhepromizdat Publ., 1946. 286 p. (in Russian).
12. Lykov A. V. *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1967. 600 p. (in Russian).
13. Zhuravleva V. P. *Mass Transfer in the Course of Heat Treatment and Drying of Capillary-Porous Building Materials*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972. 192 p. (in Russian).
14. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. Calculation of the kinetics of heat transfer using the experimental data of moisture exchange in the process of convective drying of thin flat materials. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 333–341 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>

15. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. Temperature of material in the process of convective drying of thin materials in the falling rate period of drying. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, vol. 93, iss. 2, pp. 364–368. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02129-0>
16. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, iss. 4, pp. 753–763. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0394-3>
17. Natareev O. S., Kokina N. R., Natareev S. V. Heat transfer in the process convective drying of wet material. *Izvestija vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija = ChemChemTech*, 2015, vol. 58, iss. 2, pp. 67–72 (in Russian).
18. Kosheleva M. K., Rudobashta S. P. The features of the drying process of nonwoven textile materials. *Actual Problems of Drying and Thermal-Humidification Processing of Materials in Various Industries and Agricultural Complex: Collection of Scientific Articles of the First International Lykov Scientific Readings (September 22–23, 2015)*. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2015, pp. 205–210 (in Russian).
19. Franchuk A. U. *Tables of Thermal Performance of Construction Materials*. Moscow, Research Institute of Construction Physics Publ., 1969. 143 p. (in Russian).
20. Blazi V. *Construction Physics: Designer's Handbook*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 536 p. (in Russian).
21. Grigoriev I. S., Meimekhov E. Kh. (eds.). *Physical Quantities*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p. (in Russian).
22. Kolesnikov P. A. *Thermal Protection Properties of Clothing*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1965. 337 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**  
**RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING**

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-57-68>  
UDC 620.179



Original article

**Sviatlana O. Abetkovskaia<sup>1\*</sup>, Sergei A. Chizhik<sup>1</sup>, Guangbin Yu<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,  
15, P. Brovka St., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology,  
92, Xida St., Nangang, 150001, Harbin, China*

**TAPPING MODE OF AN ATOMIC FORCE MICROSCOPE WITH A PROBE  
CANTILEVER OF A LOW SPRING CONSTANT**

**Abstract.** The work presents mathematical simulation results of tapping interaction of an atomic force microscope (AFM) probe with low (0.1 N/m) spring constant of its cantilever with samples of materials with the Young moduli of 0.01; 0.1; 1; 10 GPa under varying the characterizing samples surface energy Hamaker constant, oscillation amplitude of a piezoelectric element, and also the quality factor of the probe. The Johnson–Kendall–Roberts model was used to describe contact between the probe and a sample. Non-contact interaction was taken into account using the Lennard–Jones potential. It was defined that at lower values of the Hamaker constant, higher quality factor of the AFM probe, and higher oscillation amplitude of the piezoelectric generator, conditions for transition from mixed mode of probe–sample interaction, which is undesirable for obtaining AFM images, to purely elastic mode occur. However, for materials with the Young moduli of 1 and 10 GPa abrupt changes in probe characteristics occur, which are associated not with influence of surface adhesion, but with late onset steady-state mode of probe oscillation. In order to avoid non-steady state oscillation of the probe in tapping AFM mode, it is proposed to use probes with higher spring constant to obtain high-quality AFM images of material surfaces with the Young modulus of 1 GPa and higher.

**Keywords:** atomic force microscopy, AFM, tapping mode, probe, probe spring constant, Young modulus, Hamaker constant

**Acknowledgments:** the work is performed within the framework of the project 3.03.3 of the State Program of Scientific Research “Convergence-2025” for 2021–2025 and the grant of Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research no. T17KIG-009.

**Conflict of interest:** the team of authors includes the Editor-in-Chief of the Journal, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor S. A. Chizhik.

**Information about the authors:** *Sviatlana O. Abetkovskaia* – Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0009-0008-8806-0230>. E-mail: [abetkovskaia@mail.ru](mailto:abetkovskaia@mail.ru); *Sergei A. Chizhik* – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Heat Transfer and Mechanics of Micro- and Nanoscale Systems at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-5301-0195>. E-mail: [chizhik\\_sa@tut.by](mailto:chizhik_sa@tut.by); *Guangbin Yu* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology. E-mail: [yugb@hit.edu.cn](mailto:yugb@hit.edu.cn)

**Contribution of the authors:** *Sviatlana O. Abetkovskaia* – search and analysis of literature data, setting up and conducting computational experiment, adjusting software, analyzing and interpreting results, formulating conclusions, writing and editing the manuscript; *Sergei A. Chizhik* – formulation a research problem, development research methodology, critical revision of the manuscript text, discussion the conclusions; *Guangbin Yu* – discussion the results and verification of their reproducibility.

**For citation:** Abetkovskaia S. O., Chizhik S. A., Guangbin Yu. Tapping mode of an atomic force microscope with a probe cantilever of a low spring constant. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 57–68. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-57-68>

*Received: 06.01.2025*

*Approved for publication: 06.03.2025*

*Signed to the press: 12.03.2025*

Оригинальная статьяС. О. Абетковская<sup>1\*</sup>, С. А. Чижик<sup>1</sup>, Гуанбин Ю<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,  
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>Факультет мехатроники, Харбинский технологический институт,  
92, ул. Сиды, Наньган, 150001, Харбин, Китай**ПОЛУКОНТАКТНЫЙ РЕЖИМ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА  
ПРИ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ КОНСОЛИ ЗОНДА**

**Аннотация.** Методами математического моделирования исследовано полуконтактное взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) малой (0,1 Н/м) жесткости его консоли с образцами материалов с модулем Юнга 0,01; 0,1; 1; 10 ГПа при варьировании постоянной Гамакера образца, характеризующей его поверхностную энергию, а также амплитуды колебаний пьезоэлемента и добротности зонда. Для описания контакта зонда и образца использовалась модель Джонсона–Кенделла–Робертса. Внеконтактное взаимодействие учтено с помощью потенциала Леннард–Джонса. Установлено, что при меньших значениях постоянной Гамакера, больших добротности АСМ-зонда и амплитуды колебаний пьезогенератора наступают условия перехода от нежелательного для получения АСМ-изображений смешанного режима взаимодействия зонда и образца к чисто упругому режиму. Однако для материалов с модулем Юнга 1 и 10 ГПа возникают скачкообразные изменения характеристик зонда, связанные не с влиянием поверхностной адгезии образца, а с поздним наступлением стационарного режима колебаний зонда. Во избежание неустойчивых колебаний зонда в полуконтактном режиме работы АСМ предложено использование более жестких зондов с целью получения высококачественных АСМ-изображений поверхностей материалов с модулем Юнга 1 ГПа и выше.

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия (АСМ), полуконтактный режим, жесткость консоли микрозонда, модуль Юнга, постоянная Гамакера

**Благодарности:** работа выполнена в рамках задания 3.03.3 Государственной программы научных исследований «Конвергенция–2025» на 2021–2025 годы и проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т17КІГ-009.

**Конфликт интересов:** в составе авторского коллектива – главный редактор журнала академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор С. А. Чижик.

**Информация об авторах:** Абетковская Светлана Олеговна – научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0009-0008-8806-0230>. E-mail: abetkovskaia@mail.ru; Чижик Сергей Антонович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий отделением теплообмена и механики микро- и наноразмерных систем Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-5301-0195>. E-mail: chizhik\_sa@tut.by; Гуанбин Ю – доктор технических наук, профессор, факультет мехатроники, Харбинский технологический институт. E-mail: yugb@hit.edu.cn

**Вклад авторов:** Абетковская Светлана Олеговна – поиск и анализ литературных данных, постановка и проведение вычислительного эксперимента, корректировка программного обеспечения, анализ и интерпретация результатов, формулирование выводов, написание и редактирование рукописи; Чижик Сергей Антонович – постановка задачи исследования, разработка методологии исследования, критический пересмотр текста рукописи, обсуждение выводов; Гуанбин Ю – обсуждение результатов и проверка их воспроизводимости.

**Для цитирования:** Абетковская, С. О. Полуконтактный режим атомно-силового микроскопа при малой жесткости консоли зонда (на англ. яз.) / С. О. Абетковская, С. А. Чижик, Гуанбин Ю // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 57–68. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-57-68>

Поступила в редакцию: 06.01.2025

Утверждена к публикации: 06.03.2025

Подписана в печать: 12.03.2025

**Introduction.** Tapping mode of atomic force microscopy is a widespread and fairly well-studied method for research material surfaces. In [1], a general solution of an equation for motion of a probe tip near a surface at amplitude and frequency modulations of an AFM was obtained, analytical expressions for average even force, average gradient of interaction force between a probe and a sample, and average damping constant during their interaction were given. However, behavior of a microprobe is so diverse when interacting with surfaces of various materials that, despite complex of knowledge about tapping mode, there remains a need to understand what kind of situation an AFM operator is dealing with. That allows choosing probe parameters and amplitude of the piezoelectric generator in order to obtain high-quality AFM images.

In the overwhelming majority of works, the Deryagin–Muller–Toporov (DMT) model is used for modeling tapping AFM mode [2–11]. Some studies consider viscoelastic probe–sample interaction in tapping mode of an AFM [8, 12–14]. In [15], simple analytical expressions were derived for direct calculation the reduced Hamaker constant, the Young modulus, the viscosity coefficient and relaxation time, but the solution is also based on the DMT model and doesn't take into account contact adhesion.

In this investigation, not only non-contact attractive probe–sample interaction is taken into account, but also contact adhesion using the Johnson–Kendall–Roberts model for contact of a sphere and a plane [16], which is more accurate approximation to their real interaction than the DMT model. It is especially important to take into account the non-contact and contact attractions of a probe and a sample when studying conditions for onset mixed mode of probe operating. In mixed (transient) mode, spontaneous switching between the modes of attractive and repulsive interaction with a sample occurs, due to which defects appears in the AFM images of material surfaces, so it should be avoided. When performing such study using mathematical modeling methods, we revealed a situation that does not fit into a general scheme. In this regard, there was a need for separate study interaction of the microprobe cantilever, which has a low spring constant, with materials characterized by different values of the Young modulus and the surface energy, and this is the subject of this work. Typically, probes with cantilevers as low as 0.1 N/m are intended for contact AFM mode, but some manufacturers offer to use its in tapping mode.

**Mathematical model.** An equation of probe oscillation in tapping (intermittent-contact) mode of interaction with a sample was solved using mathematical simulation methods. Model (1), which has been tested many times previously and is in good agreement with experimental data [17], was taken as base. An expression for probe–sample interaction  $F_{ts}(z)$  takes into account both non-contact attractive interaction according to Lennard–Jones and elastic-adhesive probe–sample contact. The latter occurs in the lower part of a probe oscillation cycle and is described using the Johnson–Kendall–Roberts model.

The equation of probe tip oscillation is

$$mz'' + \frac{m\omega_0}{Q}z' + k(z - z_{\text{pos}}) = a_{\text{bm}}k\sin(\omega t) + F_{ts}(z), \quad (1)$$

where  $m$  is mass of the microprobe, kg;  $z''$  is the second derivative of vertical displacement of the tip probe, nm/s<sup>2</sup>;  $\omega_0$  is the natural angular frequency of the probe, Hz;  $z'$  is derivative of vertical displacement of the tip probe, nm/s;  $Q$  is the quality factor of the cantilever;  $k$  is the spring constant of the probe cantilever, N/m;  $z$  is vertical displacement of the tip probe, nm;  $z_{\text{pos}}$  is a position of a cantilever fixing point above a sample surface, nm;  $a_{\text{bm}}$  is the oscillation amplitude of the piezoelement, on which the cantilever is fixed, nm;  $\omega$  is operating angular frequency of the probe, Hz;  $t$  is time, s;  $F_{ts}$  is the interaction force between the probe and a sample surface, nN. Here the force of probe–sample interaction is

$$F_{ts}(z) = \begin{cases} F_{\text{LJ}}(z), & z > z_{F_0} \\ F_{\text{JKR}}(z), & z \leq z_{F_0} \end{cases}, \quad F_{\text{LJ}}(z) = -\frac{HR}{6} \left( \frac{1}{z^2} - \frac{\sigma^6}{4z^8} \right), \quad F_{\text{JKR}} \left( \frac{z}{z_c} \right) = \left( \frac{z}{z_c} \left( \frac{F_{\text{JKR}}}{P_c} \right) \right)^{-1},$$

$$\frac{z}{z_c} = \begin{cases} -\left( 3\sqrt{\frac{F_{\text{JKR}}}{P_c} + 1} - 1 \right) \left[ \frac{1}{9} \left( \sqrt{\frac{F_{\text{JKR}}}{P_c} + 1} + 1 \right) \right]^{1/3}, & \frac{z}{z_c} \leq 3^{-2/3}, \\ \left( 3\sqrt{\frac{F_{\text{JKR}}}{P_c} + 1} + 1 \right) \left[ \frac{1}{9} \left( 1 - \sqrt{\frac{F_{\text{JKR}}}{P_c} + 1} \right) \right]^{1/3}, & 3^{-2/3} \leq \frac{z}{z_c} \leq 1, \end{cases}, \quad z_c = \frac{1}{3R} \left( \frac{3RP_c}{k_s} \right)^{2/3}, \quad P_c = \frac{3}{2} \pi R \Delta\gamma,$$

$$\Delta\gamma = \frac{H}{16\pi\sigma^2}, \quad k_s = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1}{\kappa_1 + \kappa_2}; \quad \kappa_i = \frac{1 - \nu_i^2}{\pi E_i}, \quad i = \overline{1, 2}.$$

Here  $F_{\text{LJ}}$  is the non-contact interaction force, nN;  $F_{\text{JKR}}$  is the contact interaction force according to the Johnson–Kendall–Roberts model, nN;  $z_{F_0}$  is a distance, at which the contact and non-contact interaction forces are balanced, nm;  $H$  is the Hamaker constant of a sample, aJ;  $R$  is radius of probe tip curvature, nm;

$\sigma$  is the interatomic distance, nm;  $P_c$  is the maximum force of adhesion, nN;  $\Delta\gamma$  is specific surface energy of a sample,  $J/m^2$ ;  $k_s$  is a reduced modulus of elasticity of sample and tip materials, GPa;  $\nu_1, \nu_2$  are the Poisson's ratios of tip and sample materials, respectively;  $E_1, E_2$  are the Young modulus of tip and sample materials, respectively, GPa;  $aJ = 10^{-18} J$  – attojoule.

Initial conditions are:  $z(0) = z_{\text{pos}}, z'(0) = 0$ .

In order to reproduce a situation of the probe–sample interaction during AFM scanning, mathematical simulation was performed for distances  $z_{\text{pos}}$  between the attachment point of the cantilever and a sample from zero to values close to values of free oscillation amplitude of the probe tip. It is necessary to vary the distance  $z_{\text{pos}}$  during simulation, since it changes during scanning. Height of the tip was neglected.

As a result of the simulation, sets of dependences of the amplitude, phase shift of probe tip oscillation, depth of deformation of a sample by the probe, the probe–sample interaction force at the bottom point of a tip oscillation cycle (at the maximum penetration of the probe into a sample) on the distance  $z_{\text{pos}}$  were obtained. Herewith, following parameters were varied: the Young modulus of sample material (from 0.01 to 10 GPa); the Hamaker constant characterizing surface energy of a sample (from 0.1 to 0.3 aJ); the oscillation amplitude of the piezoelectric element forcing vibration of the microcantilever (from 0.5 to 2 nm); the quality factor of the probe cantilever (from 20 to 200). The quality factor was changed because in practice, when an operator chooses the probe, its  $Q$ -factor is unknown in advance. It can be determined using amplitude-frequency characteristics of the probe. The microcantilever with a spring constant of 0.1 N/m was investigated. Radius of curvature of the probe tip was set equal to 10 nm, the Young modulus of probe material was 179 GPa (corresponds to silicon), and the natural frequency of probe oscillation was 38.9 kHz. Oscillation was excited at resonance.

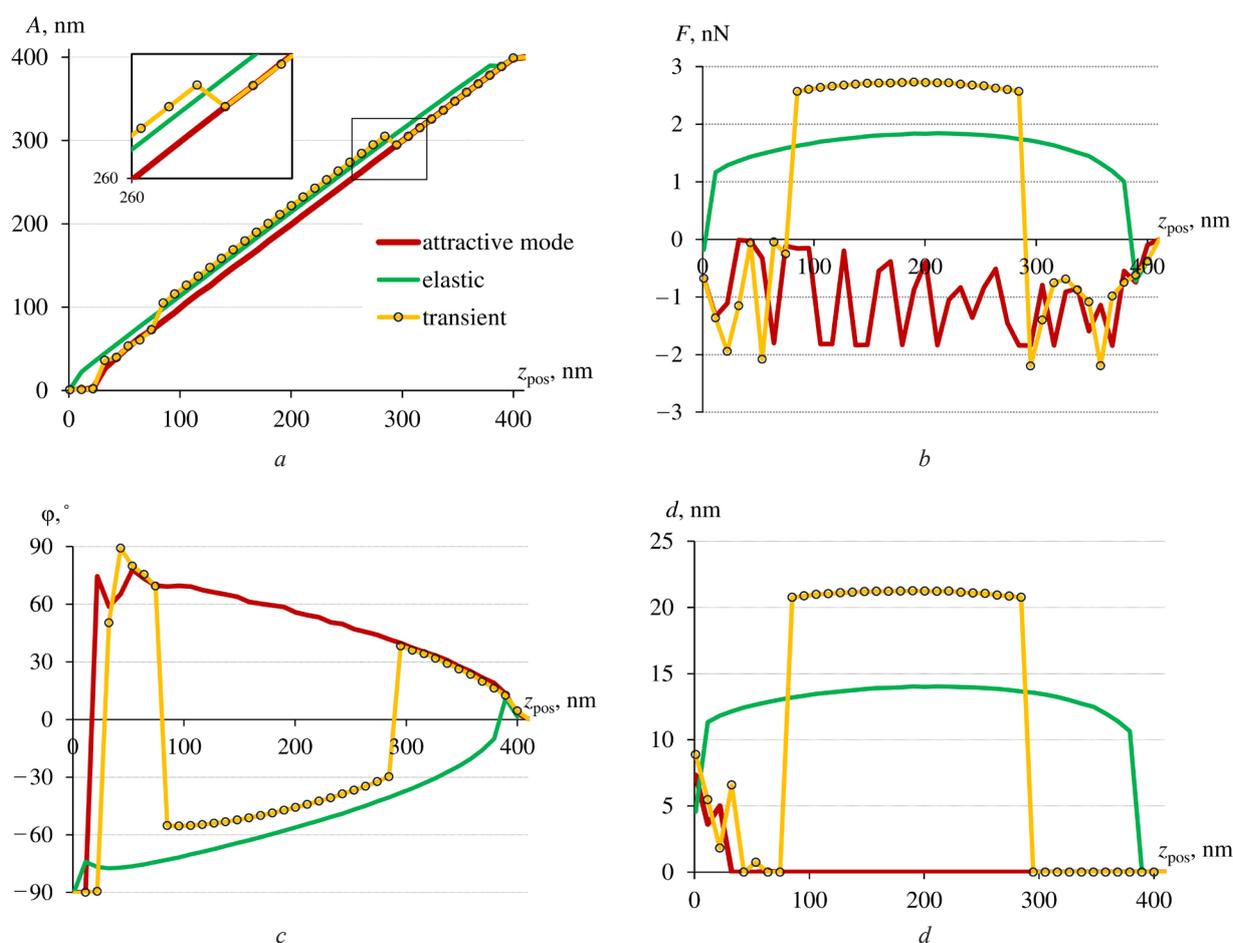


Figure 1. Characteristics of the elastic, attractive and mixed modes of probe–sample interaction:  $a$  – the oscillation amplitude of probe tip vibration;  $b$  – the probe–sample interaction force at the bottom point of its oscillation cycle;  $c$  – phase shift of tip oscillation;  $d$  – the maximum deformation depth of the sample by the probe

The obtained dependences were analyzed for presence of switches between the repulsive and attractive modes of probe–sample interaction. Interaction mode was recognized as purely elastic (repulsive) for a certain set of input parameters ( $E, H, a_{bm}, Q$ ) if a curve of the probe oscillation amplitude versus the distance  $z_{pos}$  was monotonic over an entire interval  $0.05 \leq A/A_0 \leq 0.95$  and the probe–sample interaction force at the bottom point of a probe oscillation cycle was positive (Figure 1).

Here,  $A_0$  and  $A$  are the amplitude of probe free oscillation and its operating amplitude, respectively. Attractive mode of probe–sample interaction was recognized as mode in which the probe oscillation amplitude curve was monotonic and the probe–sample interaction force was negative over the same interval of a relative amplitude of probe oscillation. All other cases are attributed to mixed (transient) interaction mode, when switching occurs between the modes of attraction and repulsion of the probe and a sample, accompanied by abrupt changes in the dependence of the probe oscillation amplitude on the distance  $z_{pos}$ .

**Data representation structure.** The results of simulation of the probe–sample interaction modes are presented in form of diagrams (Figure 2). In them the values of the Young modulus and the Hamaker constant are marked on the  $X$  and  $Y$  axes respectively, for which the simulation was performed. Circles, triangles, and crosses indicate, respectively, the elastic, attractive, and mixed modes of probe–sample interaction, realized with certain combinations of simulation input parameters indicated in the diagrams. Each point in the diagram corresponds to a set of four curves: the dependences of the amplitude, phase shift of probe oscillation, the maximum deformation depth of a sample by the probe, and the probe–sample interaction force at the lower point of a probe oscillation cycle on the  $z_{pos}$  distance, similar to those shown in Figure 1.

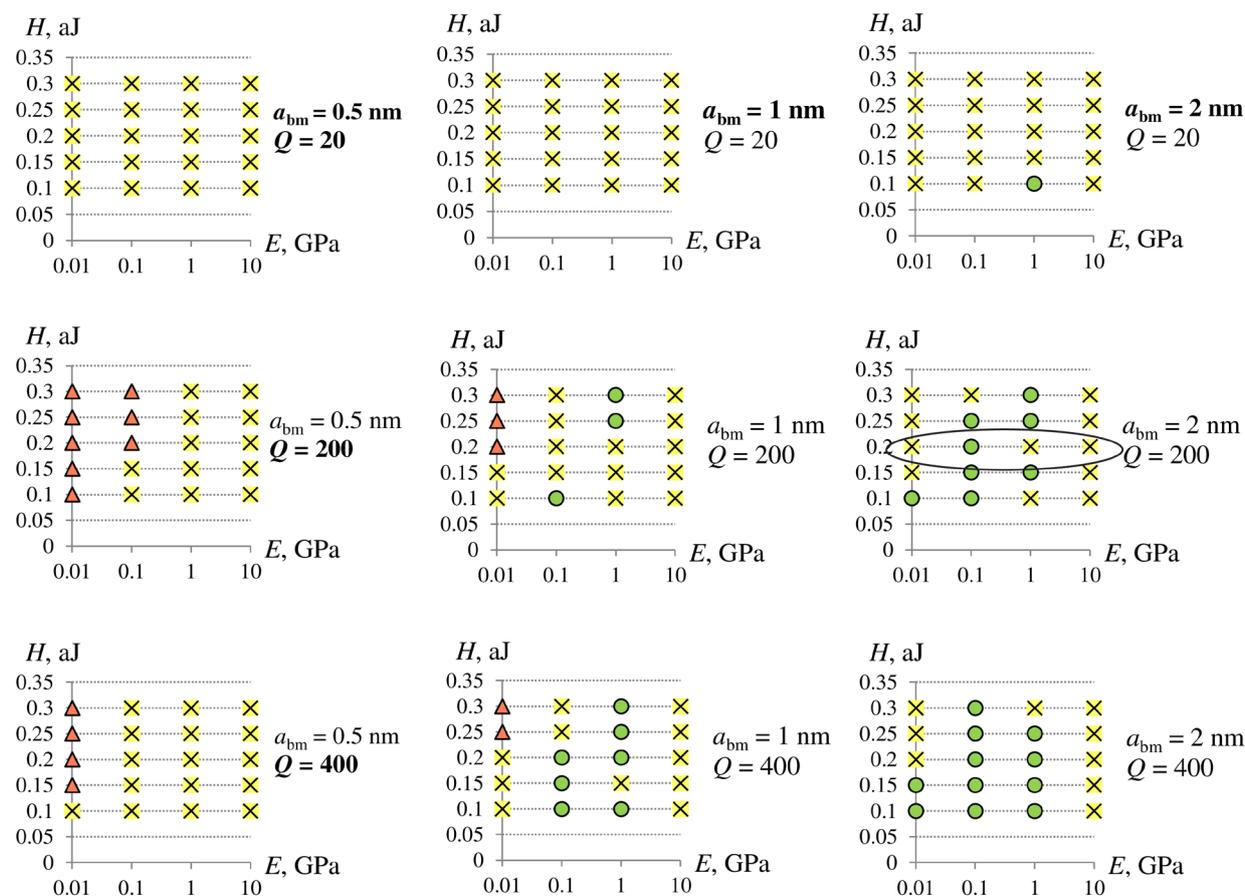


Figure 2. Diagrams of the interaction modes of the probe with a spring constant of 0.1 N/m with samples, realized at different values of the Young modulus and the Hamaker constant of samples, the oscillation amplitude of the piezoelectric generator and the probe quality factor:

▲ – attractive interaction mode; ● – elastic mode; ✕ – transient mode

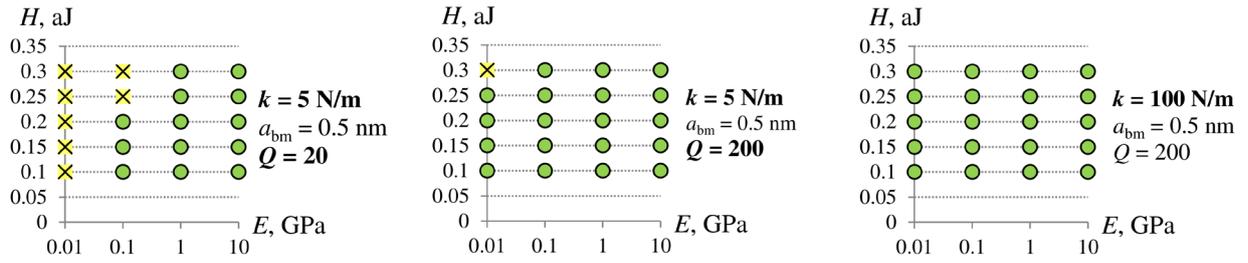


Figure 3. Diagrams of the interaction modes of probes with a spring constant of 5 and 100 N/m with samples, realized at different values of the Young modulus and the Hamaker constant of samples, the oscillation amplitude of the piezoelectric generator of 0.5 nm and the probe quality factors of 20 and 200:  
● – elastic interaction mode; ✕ – transient mode

**Results and discussion.** For materials with the Young modulus of 0.01 and 0.1 GPa, a following regularity is observed. Increase in the oscillation amplitude of the piezoelectric element and the probe quality factor, as well as lower values of the Hamaker constant lead to transition from the mixed mode of probe–sample interaction to the elastic mode. However, for the Young modulus of sample material of 10 GPa, only the mixed mode of interaction is realized. For the sample Young modulus of 1 GPa, the mixed and elastic modes appear chaotically and unsystematically in the diagrams. This fact requires explanation, especially since calculations performed for higher cantilever spring constants (5 and 100 N/m) fit into the pattern of achieving the purely elastic mode of probe–sample interaction by increasing  $a_{\text{bm}}$ ,  $Q$  and decreasing  $H$  for the samples Young modulus of 0.01; 0.1; 1; 10 GPa. Examples of the diagrams for a spring constant of 5 and 100 N/m are shown in Figure 3.

In order to study this fact, we will consider curves of the probe–sample interaction force at the bottom point of a probe oscillation cycle (Figure 4). We take  $a_{\text{bm}} = 2 \text{ nm}$ ,  $Q = 200$ , and vary the Young modulus and the Hamaker constant of a sample. For the Young modulus of a sample of 0.1 GPa, the dependence of the force on  $z_{\text{pos}}$  undergoes a jump twice: from attraction (negative force values) to repulsion (positive values) and vice versa (see Figure 4, *a*). In this case, for the Hamaker constant values of 0.10–0.25 aJ, the jumps on the force curves are located outside the interval  $0.05 \leq A/A_0 \leq 0.95$ , therefore these curves are attributed to the elastic interaction mode. The force curve at  $H = 0.3 \text{ aJ}$  has jumps shifted inside the significant interval, therefore it is attributed to the transient interaction mode.

At the Young modulus of 1 GPa, in addition to one switching outside the considered interval of the relative amplitude of probe oscillation (in a region of  $z_{\text{pos}}$  near 400 nm), several force curves also have chaotic switchings in a  $z_{\text{pos}}$  interval from 0 to 30 nm (see Figure 4, *c*). Such switchings become even more numerous at the sample Young modulus of 10 GPa, and the interval in which they are observed expands to 85 nm (see Figure 4, *e*).

As shown by dependences of the interaction force on a coordinate of the tip at the bottom point of its oscillation cycle  $Z_{\text{min}}$ , at  $E = 0.1 \text{ GPa}$  the tip probe deforms sample material by the maximum of 5 nm, and force values are up to 4 nN (see Figure 4, *b*). At  $E = 1 \text{ GPa}$  the maximum probe deepening is only 2 nm, and the elastic force already reaches 14 nN (see Figure 4, *d*). At  $E = 10 \text{ GPa}$  the deformation depth of the samples is less than 1 nm, i.e. they are practically not deformed, while the elastic reaction force of the samples increases to 36 nN (see Figure 4, *f*). Thus, with increase in the Young modulus of sample material, its semi-contact interaction with the probe becomes increasingly rigid.

Further, we fix the Hamaker constant ( $H = 0.2 \text{ aJ}$ ) and consider energy losses of the probe per oscillation cycle (power dissipation) during interaction with materials of different Young modulus (Figure 5). Power dissipation of the probe were calculated using a formula

$$P_{\text{tip}} = \frac{kA\pi\omega_0}{Q}(A_0 \cos\varphi - A),$$

proposed in [18], with a difference that the sine was replaced by the cosine, since in our case a driving force was specified as  $a_{\text{bm}}k\sin(\omega t)$  (see (1)). The calculation was performed for  $a_{\text{bm}} = 2 \text{ nm}$ ,  $Q = 200$ ,  $E$  from 0.01 to 10 GPa (indicated by an ellipse in the interaction mode diagram in Figure 2).

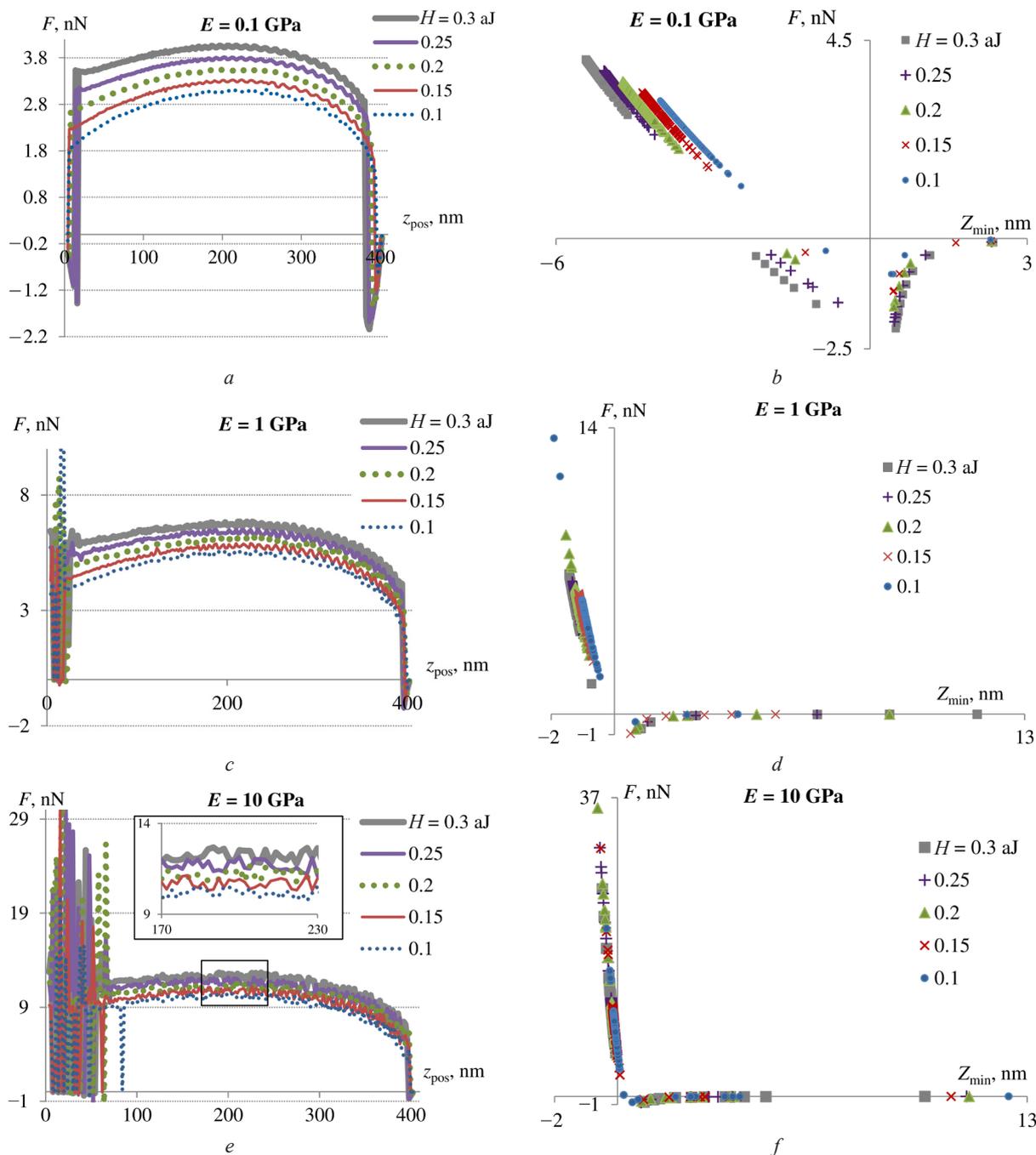


Figure 4. Dependences of the interaction force of the probe with material samples: *a, c, e* – on the distance  $z_{\text{pos}}$ ; *b, d, f* – on the position  $Z_{\text{min}}$  of the probe tip at the bottom point of its oscillation cycle

Curves of a dependence of the energy losses by the probe show a fundamental difference in interaction processes of the probe with a spring constant of 0.1 N/m with low-modulus and higher-modulus samples. Power dissipated by the probe during interaction with materials of the Young modulus of 0.1 and 0.01 GPa are about 0.25 and 2.4 pW, respectively. During interaction with samples of the Young modulus of 1 and 10 GPa, no energy losses by the probe occur, except for some points on the curves at small values of the  $z_{\text{pos}}$  distance, corresponding to points of chaotic behavior on curves of the probe–sample interaction force (Figure 5, *b*). For comparison, dependences of the probe–sample interaction forces and the energy losses by the probe for purely elastic semi-contact interaction of the probe and a sample were calculated according to the Hertz model. These curves of the energy losses by the probe also demonstrate absence of the energy losses by the probe (due to a fact that elastic forces are conservative) and sharp energy drops at some points  $z_{\text{pos}}$  for samples with the Young

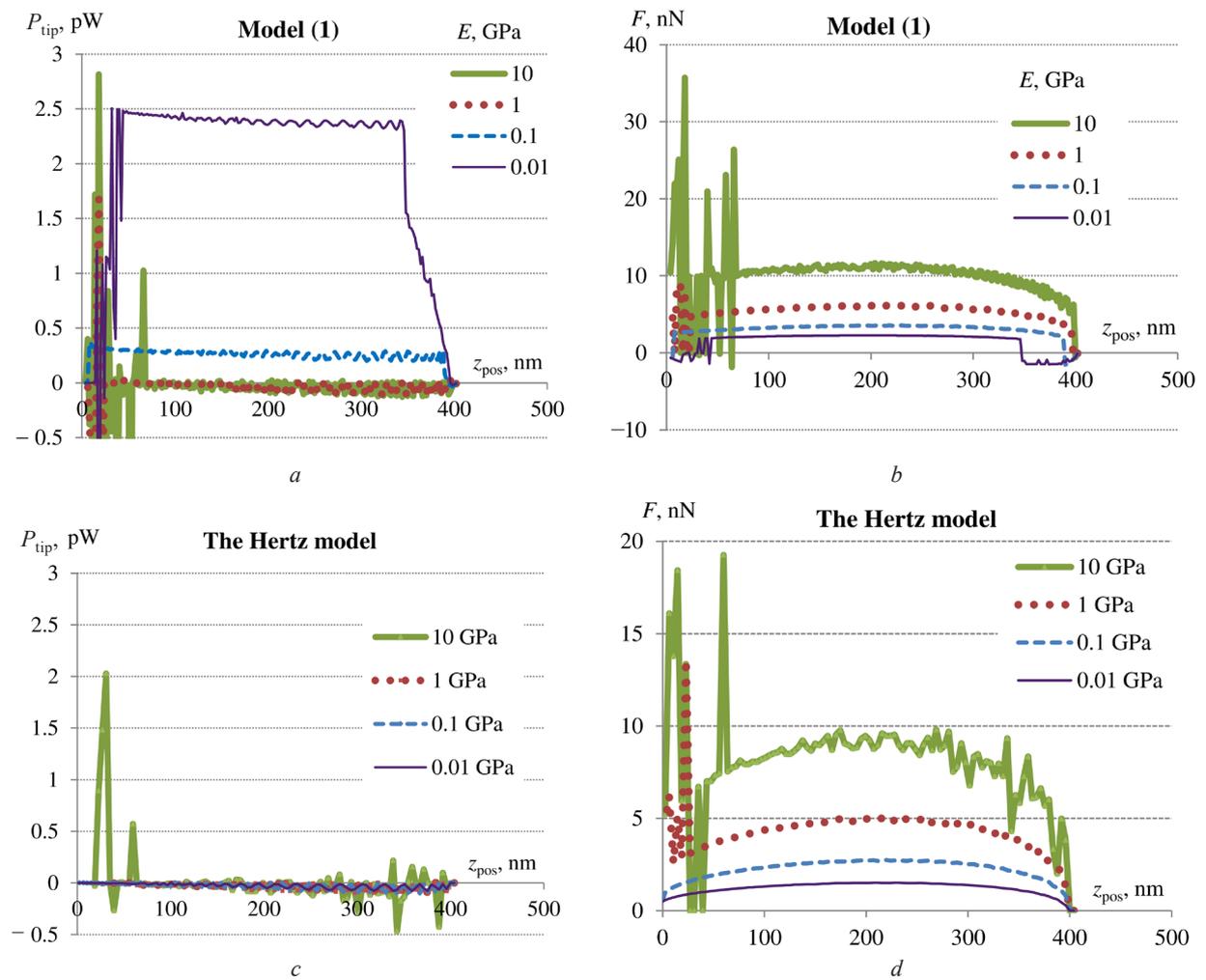


Figure 5. Dependences of characteristics of probe–sample interaction on the distance  $z_{\text{pos}}$ , calculated using model (1) (*a*, *b*) and using the Hertz model (*c*, *d*): *a*, *c* – the energy losses by the probe per oscillation cycle; *b*, *d* – the interaction forces

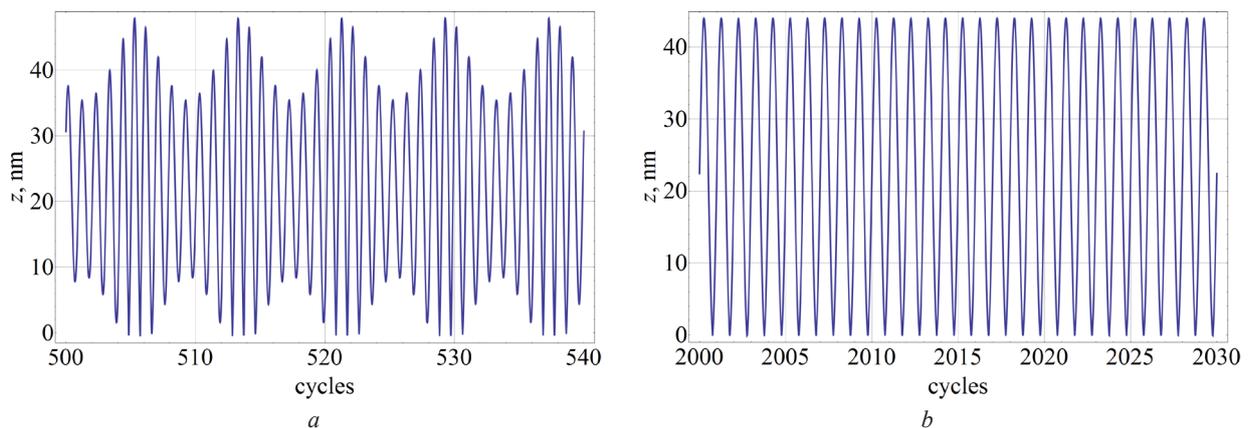


Figure 6. Motion of the probe tip during interaction with a sample surface, characterized by the Young modulus of 10 GPa and the Hamaker constant of 0.2 aJ, with the oscillation amplitude of the piezoelectric element of 2 nm, the probe quality factor of 200, and the distance between the probe attachment point and sample  $z_{\text{pos}} = 22$  nm:  
*a* – the non-steady-state mode of tip oscillation (the graph is shown starting with  $2.5Q$  oscillation cycles);  
*b* – the steady-state mode (starting with  $10Q$  oscillation cycles)

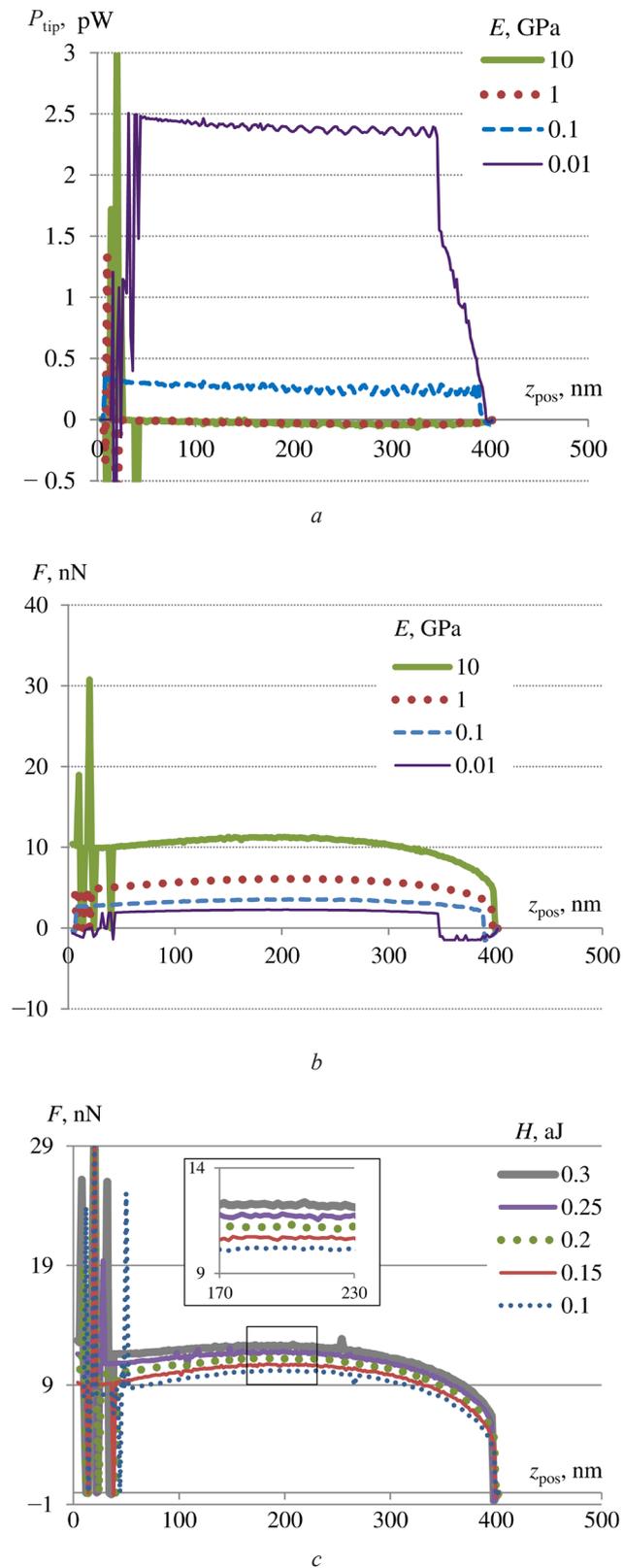


Figure 7. Dependences of the characteristics of probe–sample interaction on the distance  $z_{\text{pos}}$  after  $20Q$  cycles of probe oscillation ( $a_{\text{bm}} = 2$  nm,  $Q = 200$ ):  
 a – the energy losses by the probe per oscillation cycle ( $H = 0.2$  aJ); b – the interaction forces ( $H = 0.2$  aJ);  
 c – the interaction forces ( $E = 10$  GPa)

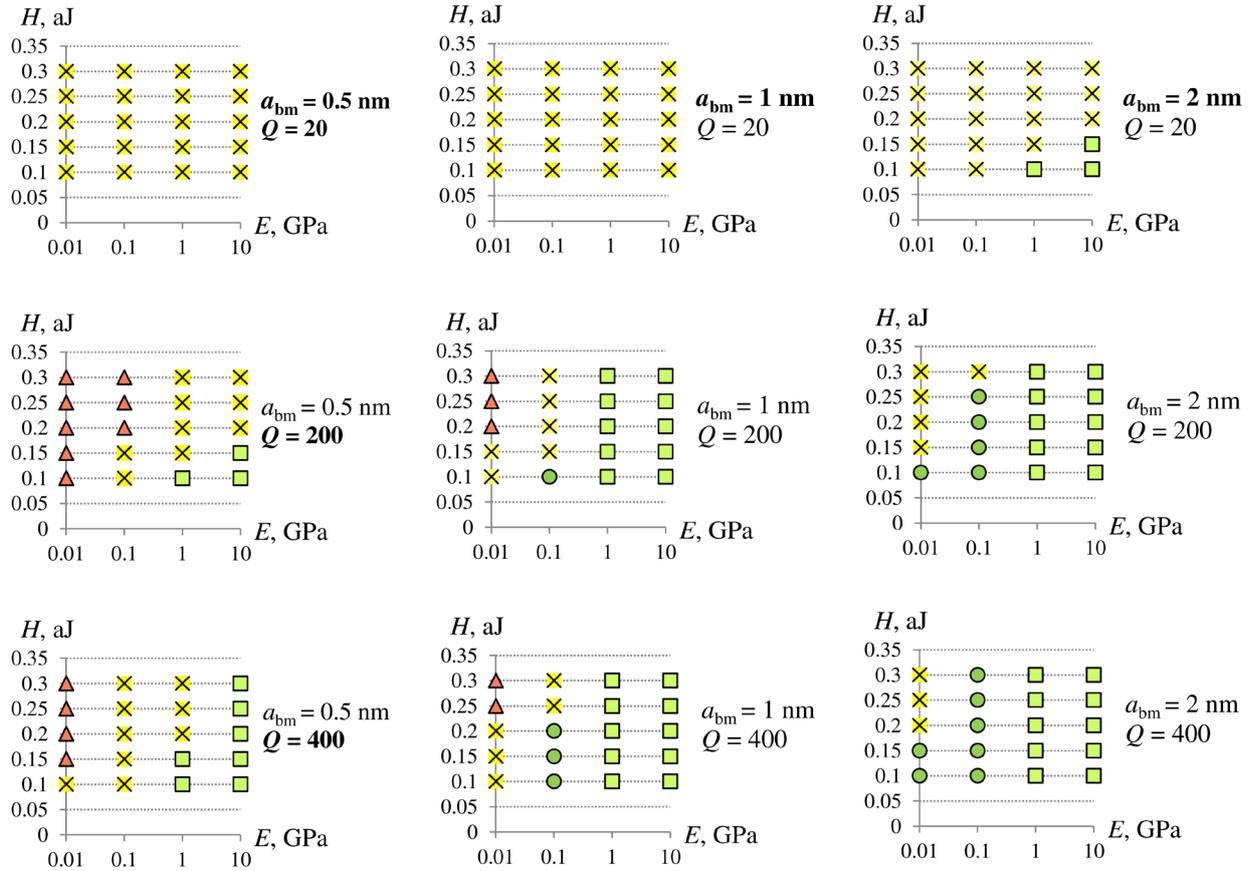


Figure 8. Diagrams of the interaction modes of the probe with a spring constant of 0.1 N/m with samples, realized at different values of the Young modulus and the Hamaker constant of samples, the oscillation amplitude of the piezoelectric generator and the probe quality factor:  $\blacktriangle$  – attractive interaction mode;  $\bullet$  – elastic mode;  $\times$  – transient mode;  $\blacksquare$  – conditionally elastic mode

modulus of 1 and 10 GPa (Figure 5, *c*), which are also presented in the force curves (Figure 5, *d*). Consequently, the sharp switches in the force curves, and hence the amplitude of probe oscillation and its phase shift, occurring during interaction of the probe with a spring constant of 0.1 N/m with samples of the Young modulus of 1 and 10 GPa, are no way related to surface adhesion of the samples for interaction model (1) too.

A reason for such chaotic behavior of the probe during interacting with materials of the Young modulus of 1 and 10 GPa is instability of the probe oscillation mode (Figure 6, *a*). Usually, the steady-state mode is achieved after  $2Q$  cycles of probe oscillation, but when a soft probe interacts with such material samples, the steady-state mode at some distances  $z_{\text{pos}}$  occurs much later (Figure 6, *b*), and in some cases, as modeling shows, does not occur even after  $50Q$  oscillation cycles. Figure 7 shows curves of the probe–sample interaction forces and the probe energy losses, modeled after  $20Q$  cycles of probe oscillation (compare Figures 7, *a, b* with Figures 5, *a, b*; Figure 7, *c* with Figure 4, *e*).

Thus, it is possible to reduce a number of the switches between the attractive and repulsive modes by increasing probe oscillation time at each point over a sample surface (Figure 7). However, this is not always feasible in practice, since it will increase scanning time several times/tens of times. Therefore, it is better to choose probes with higher spring constant for samples with the Young modulus of 1 and 10 GPa. Another recommendation can be to use not too high values of the feedback parameter *set-point*. For a sample of 1 GPa, this will avoid the  $z_{\text{pos}}$  distances at which the attractive/repulsive modes are switched.

Appearance of the jumps on the curves of the interaction force and the energy losses during interaction of the probe with a sample of the Young modulus of 0.01 GPa (see Figures 5, *a, b* and 6, *a, b*) is associated with confrontation of the repulsive and attractive forces, since similar curves constructed

using the Hertz model for this sample do not have jumps (see Figures 5, *c*, *d*). Although it should be noted that in this case there is also the non-steady-state mode of probe oscillations at some distances  $z_{\text{pos}}$ .

Thus, taking into account specificity of the chaotic jumps, which appeared on the curves of the interaction characteristics of the probe with a spring constant of 0.1 N/m with materials of the Young modulus of 1 and 10 GPa, which are not associated with surface adhesion of samples, the interaction mode can be conditionally classified as purely elastic (Figure 8). However, corresponding sets of the input parameters of such probe–sample interaction are not suitable for AFM scanning.

**Conclusion.** The article studies dynamic semi-contact interaction of the probe of low spring constant (0.1 N/m) with material samples having the Young modulus of 0.01; 0.1; 1; 10 GPa, the Hamaker constant of 0.1–0.3 aJ at piezoelectric element oscillation amplitudes of 0.5; 1; 2 nm and the probe quality factor of 20, 200, 400. It is found that increase in the oscillation amplitude of the piezoelectric generator, higher values of the probe quality factor and, as well as lower values of the Hamaker constant, allow switching from the transient mode of probe–sample interaction, which occurs due to confrontation between elastic repulsion and adhesive attraction of the probe and a sample and is unsuitable for obtaining high-quality AFM images of materials, to the purely elastic interaction mode. However, for samples with the Young modulus of 1 and 10 GPa, the abrupt changes in the interaction characteristics occur that are in no way related to surface adhesion of a sample, but only with onset of the steady-state probe vibration mode much later than after  $2Q$  cycles of its oscillations. In practice, this means that obtaining high-quality AFM images with a low-rigidity probe can be achieved by repeatedly reducing a scanning speed, which is not always acceptable. Therefore, it is possible to recommend using probe cantilevers that are more rigid than 0.1 N/m for materials of the Young modulus of 1 GPa and higher.

## References

1. Songen H., Bechstein R., Kuhnle A. Quantitative atomic force microscopy. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2017, vol. 29, no. 27, pp. 274001–1–17. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa6f8b>
2. Garcia R., San Paulo A. Attractive and repulsive tip-sample interaction regimes in tapping-mode atomic force microscopy. *Physical Review B*, 1999, vol. 60, no. 7, pp. 4961–4967. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.60.4961>
3. Stark M., Stark R. W., Heckl W. M., Guckenberger R. Inverting dynamic force microscopy: From signals to time-resolved interaction forces. *The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 2002, vol. 99, no. 13, pp. 8473–8478. <https://doi.org/10.1073/pnas.122040599>
4. Lee S. I., Howell S. W., Raman A., Reifenberger R. Nonlinear dynamics of microcantilevers in tapping mode atomic force microscopy: A comparison between theory and experiment. *Physical Review B*, 2002, vol. 66, pp. 115409–1–10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.115409>
5. Lee S. I., Howell S. W., Raman A., Reifenberger R. Nonlinear dynamic perspectives on dynamic force microscopy. *Ultramicroscopy*, 2003, vol. 97, no. 1/4, 25 p. [https://doi.org/10.1016/s0304-3991\(03\)00043-3](https://doi.org/10.1016/s0304-3991(03)00043-3)
6. Hu Sh., Raman A. Analytical formulas and scaling laws for peak interaction forces in dynamic atomic force microscopy. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91, pp. 123106–1–3. <https://doi.org/10.1063/1.2783226>
7. Kiracofe D., Melcher J., Raman A. Gaining insight into the physics of dynamic atomic force microscopy in complex environments using the VEDA simulator. *Review of Scientific Instruments*, 2012, vol. 83, no. 1, pp. 013702–1–17. <https://doi.org/10.1063/1.3669638>
8. Guzman H. V., Garcia P. D., Garcia R. Dynamic force microscopy simulator (dForce): A tool for planning and understanding tapping and bimodal AFM experiments. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2015, vol. 6, pp. 369–379. <https://doi.org/10.3762/bjnano.6.36>
9. Wagner T. Steady-state and transient behavior in dynamic atomic force microscopy. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 125, no. 4, pp. 044301–1–13. <https://doi.org/10.1063/1.5078954>
10. Bahrami M. R. Dynamic analysis of atomic force microscope in tapping mode. *Vibroengineering Procedia*, 2020, vol. 32, 7 p. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21488>
11. Chandrashekar A., Belardinelli P., Lenci S., Stauffer U., Alijani F. Mode coupling in dynamic atomic force microscopy. *Physical Review Applied*, 2021, vol. 15, no. 2, pp. 024013–1–11. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.024013>
12. Melcher J., Hu Sh., Raman A. Invited Article: VEDA: A web-based virtual environment for dynamic atomic force microscopy. *Review of Scientific Instruments*, 2008, vol. 79, no. 6, pp. 061301–1–11. <https://doi.org/10.1063/1.2938864>
13. Thorén P.-A., Borgani R., Forchheimer D., Dobryden I., Claesson P. M., Kassa H. G., Leclère Ph. [et al.]. Modeling and measuring viscoelasticity with dynamic atomic force microscopy. *Physical Review Applied*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 024017–1–13. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.024017>
14. Keyvani A., Tamer M. S., Wingerden J.-W. van, Goosen J. F. L., Keulen F. van. A comprehensive model for transient behavior of tapping mode atomic force microscope. *Nonlinear Dynamics*, 2019, vol. 97, pp. 1601–1617. <https://doi.org/10.1007/s11071-019-05079-2>

15. Farokh Payam A., Morelli A., Lemoine P. Multiparametric analytical quantification of materials at nanoscale in tapping force microscopy. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 536, pp. 147698-1–15. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147698>
16. Johnson K. L. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1987. 452 p.
17. Abetkovskaia S. O., Chizhik S. A. Dynamic force spectroscopy of «soft» materials. *Тепло- и массоперенос – 2007: сборник научных трудов* [Heat and Mass Transfer – 2007: Scientific Papers]. Minsk, A. V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, 2007, pp. 323–330 (in Russian).
18. Garcia R., Gómez C. J., Martinez N. F., Patil S., Dietz C., Magerle R. Identification of nanoscale dissipation processes by dynamic atomic force microscopy. *Physical Review Letters*, 2006, vol. 97, no. 1, pp. 016103-1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.016103>

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-69-78>  
УДК 621.383.92



*Оригинальная статья*

**И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина\***

*Белорусская государственная академия связи,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь*

## **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ФОНОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПЛОСКИЙ УГОЛ ЗРЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ**

**Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния внешнего фонового оптического излучения на плоский угол зрения кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiФЭУ). Актуальность исследования обусловлена развитием открытых оптических систем, в которых оптическое излучение подвергается воздействию внешнего фонового оптического излучения, что может привести к ухудшению качества регистрируемого сигнала. При перемещении объекта в пространстве может меняться угол падения оптического излучения на фоточувствительную поверхность фотоприемника, поэтому одной из его наиболее важных характеристик, применяемых в открытых оптических системах связи, является плоский угол зрения. Для проведения исследования были выбраны кремниевые фотоэлектронные умножители трех моделей, имеющие схожую структуру и параметры, а именно КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035. Установлено, что с увеличением уровня освещенности внешнего фонового оптического излучения диаграмма направленности фотоприемника сужается, что связано с уменьшением плоского угла зрения. Наиболее сильная зависимость величины плоского угла зрения от уровня освещенности наблюдалась для КОФ5-1035, а наиболее слабая – для Ketek PM 3325. Показано, что восстановить плоский угол зрения до первоначального значения можно путем повышения перенапряжения и использования светофильтра с полосой пропускания  $470 \pm 20$  нм. Максимальное значение освещенности, при котором существовала возможность восстановить величину плоского угла зрения до первоначального значения, составляла 3000 лк для всех исследуемых SiФЭУ. Полученные результаты представляют собой потенциально ценный ресурс для разработки и совершенствования оптических систем связи общего доступа.

**Ключевые слова:** кремниевый фотоэлектронный умножитель, внешнее фоновое оптическое излучение, угол падения оптического излучения, плоский угол зрения, ослепление

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** *Гулаков Иван Романович* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики Белорусской государственной академии связи. <https://orcid.org/0000-0002-7330-9928>. E-mail: [gulakov@bsu.by](mailto:gulakov@bsu.by); *Зеневич Андрей Олегович* – доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи. <https://orcid.org/0000-0002-3534-3885>. E-mail: [a.zenevich@bsac.by](mailto:a.zenevich@bsac.by); *Кочергина Ольга Викторовна* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой радио и информационных технологий Белорусской государственной академии связи. <https://orcid.org/0000-0002-3597-0395>. E-mail: [o.kochergina@bsac.by](mailto:o.kochergina@bsac.by)

**Вклад авторов:** *Гулаков Иван Романович* – обоснование актуальности и цели исследования, разработка методологии исследования, формулирование выводов на основании результатов исследования, редактирование текста рукописи; *Зеневич Андрей Олегович* – обоснование концепции исследования, анализ и обобщение экспериментальных данных исследования; *Кочергина Ольга Викторовна* – анализ и обобщение литературных данных для постановки цели исследований, создание экспериментальной установки, проведение эксперимента, сбор, анализ и обобщение полученных результатов, подготовка текста рукописи, включая графический материал и ее оформление.

**Для цитирования:** Гулаков, И. Р. Влияние внешнего фонового оптического излучения на плоский угол зрения кремниевых фотоэлектронных умножителей / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 69–78. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-69-78>

*Поступила в редакцию: 13.11.2024*

*Доработанный вариант: 04.02.2025*

*Утверждена к публикации: 06.03.2025*

*Подписана в печать: 12.03.2025*

Original article

Ivan R. Gulakov, Andrey O. Zenevich, Olga V. Kochergina\*

*Belarusian State Academy of Communications,  
8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus***INFLUENCE OF EXTERNAL BACKGROUND OPTICAL RADIATION  
ON THE FLAT VIEW ANGLE OF SILICON PHOTOMULTIPLIER**

**Abstract.** The article presents the results of a study of the influence of external background optical radiation on the flat angle of view of silicon photomultiplier tubes (SiPMs). The relevance of the study is due to the development of open optical systems in which optical radiation is exposed to external background optical radiation, which can lead to deterioration in the quality of the recorded signal. When an object moves in space, the angle of incidence of optical radiation on the photosensitive surface of the photodetector can change, so one of its most important characteristics used in open optical communication systems is a flat angle of view. For the study, three models of silicon photomultipliers with similar structure and parameters were selected, namely KOF5-1035, Ketek RM 3325 and ON Semi FC 30035. It was found that with an increase in the illumination level of external background optical radiation, the directivity pattern of the photodetector narrows, which is associated with a decrease in the flat viewing angle. The strongest dependence of the flat viewing angle on the illumination level was observed for KOF5-1035, and the weakest – for Ketek RM 3325. It is shown that the flat viewing angle can be restored to the original value by increasing the overvoltage and using a light filter with a passband of  $470 \pm 20$  nm. The maximum illumination value at which it was possible to restore the flat viewing angle to the original value was 3000 lux for all the SiPMs studied. The results obtained are potentially valuable resource for development and improvement of shared access optical communication lines.

**Keywords:** silicon photomultiplier tube, external background optical radiation, angle of incidence of optical radiation, flat viewing angle, glare

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Ivan R. Gulakov* – Dr. Sci (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Mathematics and Physics at Belarusian State Academy of Communications. <https://orcid.org/0000-0002-7330-9928>. E-mail: [gulakov@bsu.by](mailto:gulakov@bsu.by); *Andrey O. Zenevich* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector at Belarusian State Academy of Communications. <https://orcid.org/0000-0002-3534-3885>. E-mail: [a.zenevich@bsac.by](mailto:a.zenevich@bsac.by); *Olga V. Kochergina* – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Radio and Information Technologies at Belarusian State Academy of Communications. <https://orcid.org/0000-0002-3597-0395>. E-mail: [o.kochergina@bsac.by](mailto:o.kochergina@bsac.by)

**Contribution of the authors:** *Ivan R. Gulakov* – justification of the relevance and purpose of the study, development of research methodology, formulation of conclusions based on the results of the study, editing the text of the manuscript; *Andrey O. Zenevich* – substantiation of the research concept, analysis and generalization of experimental research data; *Olga V. Kochergina* – analysis and synthesis of literary data to set the purpose of the research, creation of an experimental setup, conducting an experiment, collecting, analyzing and summarizing the results obtained, preparing the text of the manuscript including graphic material and its design.

**For citation:** Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Influence of external background optical radiation on the flat view angle of silicon photomultiplier. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 69–78 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-69-78>

*Received:* 13.11.2024

*Modified:* 04.02.2025

*Approved for publication:* 06.03.2025

*Signed to the press:* 12.03.2025

**Введение.** В настоящее время широко используются системы инфокоммуникаций, построенные на использовании оптического излучения видимого диапазона спектра. Основанные на волоконно-оптических линиях связи проводные системы обеспечивают высокоскоростной доступ в интернет и качественную коммуникацию для значительной части населения.

Открытые оптические системы только начинают развиваться. Основным достоинством таких систем перед проводными является мобильность и большие скорости передачи данных, что позволяет создавать на их основе умные города, контролировать наземные, водные и воздушные транспортные потоки, управлять потоками данных [1–3].

При реализации открытых оптических систем источник оптического излучения может располагаться в любой точке пространства относительно фотоприемника. Кроме того, при обеспечении связи между движущимися объектами угол падения оптического излучения на фотоприемник изменяется. Поэтому одной из наиболее важных характеристик, применяемых в открытых оптических системах связи, является плоский угол зрения фотоприемника.

В открытых системах связи вместе с информационным сигналом на фотоприемник поступает внешнее фоновое оптическое излучения. Это приводит к появлению помех, вследствие чего уменьшается отношение сигнал/шум, а также изменяется плоский угол зрения [4–6].

Для использования в качестве фотоприемников в открытых системах связи наиболее перспективными являются кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ), обладающие низкими напряжениями питания и хорошей чувствительностью в видимом диапазоне спектра [7–9].

Однако в настоящее время не установлено влияние внешнего фонового оптического излучения на плоский угол зрения кремниевых фотоэлектронных умножителей, что и явилось целью исследования.

**Экспериментальная установка и методика измерений.** Для проведения исследований были отобраны SiФЭУ трех моделей, имеющие схожую структуру и параметры, а именно КОФ5-1035 (холдинг ОАО «Интеграл», Беларусь), Ketek PM 3325 (Ketek, Германия) и ON Semi FC 30035 (Onsemi, США).

Структурная схема экспериментальной установки для проведения исследований представлена на рис. 1.

В экспериментальной установке сигнальный импульс оптического излучения, направляемый на SiФЭУ, формируется системой, состоящей из источника постоянного напряжения (ИП<sub>1</sub>), светодиода (С<sub>1</sub>), модулятора (М), генератора (Г) и аттенюатора (АТ). Наличие или отсутствие оптического сигнала, подаваемого на SiФЭУ, регулируется диафрагмой (Д<sub>1</sub>).

Длина волны оптического излучения С<sub>1</sub> равна  $\lambda = 470$  нм. Такая длина волны соответствует максимуму спектральной чувствительности всех исследуемых SiФЭУ [10] и относится к рабочему диапазону открытых систем связи, который находится в интервале от 380 до 760 нм [11].

Генератор (Г) формирует электрические импульсы длительностью 1 мкс и частотой следования 10 кГц. Выбранное значение частоты и длительности импульса позволяет избежать влияния явлений, возникающих в SiФЭУ после окончания регистрации одного импульса оптического излучения, на процесс регистрации следующего за ним импульса излучения и зарегистрировать каждый из сформированных импульсов. Аттенюатор позволяет ослабить оптическое излучение в диапазоне энергетической экспозиции от 10 до 0,01 нДж/м<sup>2</sup>, что дает возможность обеспечить работу исследуемых SiФЭУ в пределах их динамического диапазона [12]. Таким образом форми-

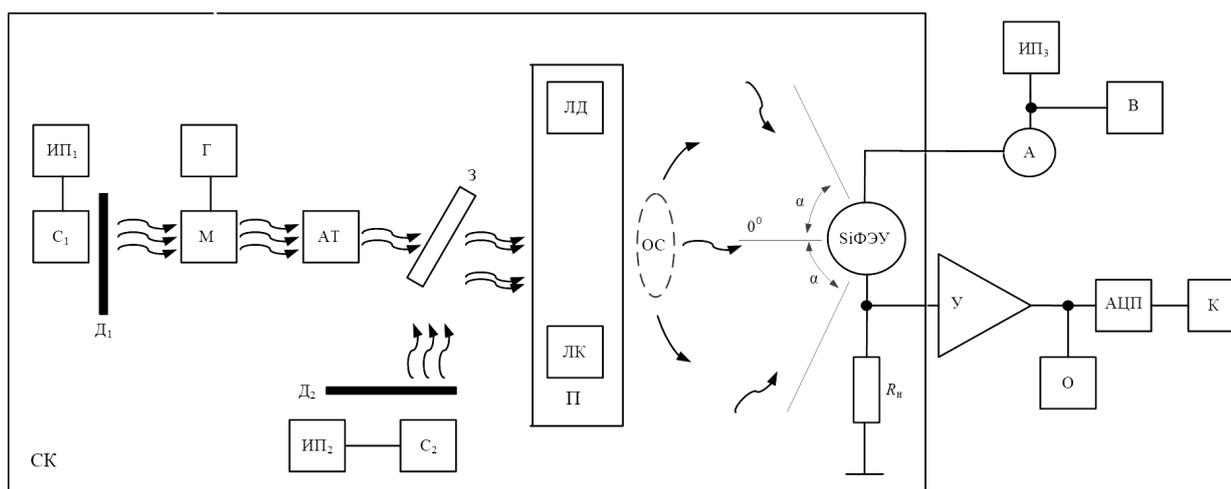


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: ИП<sub>1</sub>, ИП<sub>2</sub> и ИП<sub>3</sub> – источники постоянного напряжения; С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub> – светодиоды; М – модулятор; Г – генератор; АТ – аттенюатор; З – зеркало; Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub> – диафрагмы; П – подвижная платформа; ЛК – люксметр; ЛД – лазерный дозиметр; ОС – оптическая система; R<sub>n</sub> – нагрузка; SiФЭУ – кремниевый фотоэлектронный умножитель; У – усилитель; О – осциллограф; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; К – компьютер; А – амперметр; В – вольтметр; СК – светонепроницаемая камера

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup: ИП<sub>1</sub>, ИП<sub>2</sub> и ИП<sub>3</sub> – constant voltage sources; С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub> – LEDs; М – modulator; Г – generator; АТ – attenuator; З – mirror; Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub> – diaphragms; П – movable platform; ЛК – lux meter; ЛД – laser dosimeter; ОС – optical system; R<sub>n</sub> – load; SiФЭУ – silicon photomultiplier tube; У – amplifier; О – oscilloscope; АЦП – analog-to-digital converter; К – computer; А – ammeter; В – voltmeter; СК – lightproof chamber

руется сигнальный импульс оптического излучения с заданной длиной волны, длительностью и энергетической экспозицией.

Измерение энергетической экспозиции оптического излучения сигнального импульса выполняется лазерным дозиметром (ЛД) при закрытой диафрагме  $D_2$ . Для этого ЛД устанавливается на пути распространения импульсного оптического излучения при помощи механической платформы (П).

Светодиод белого света ( $C_2$ ) применяется для имитации внешнего фонового оптического излучения. Питание этого светодиода осуществляется от источника постоянного напряжения (ИП<sub>2</sub>). Диафрагма ( $D_2$ ) применяется для перекрывания оптического излучения от  $C_2$ , поступающего на SiФЭУ.

Величина внешнего фонового оптического излучения определяется по создаваемой освещенности. Для определения освещенности, формируемой светодиодом  $C_2$ , используется люксметр (ЛК). Для этого люксметр с помощью платформы помещается на пути отраженного от полупрозрачного зеркала оптического излучения светодиода  $C_2$ .

Оптическая система (ОС) позволяет направлять оптическое излучение под разными углами относительно нормальной плоскости к фоточувствительной поверхности SiФЭУ в диапазоне от  $90^\circ$  до  $-90^\circ$ . Диаметр пучка полностью перекрывает фоточувствительную поверхность фотоприемника.

Для ограничения тока, протекающего через SiФЭУ, к нему последовательно подключается сопротивление нагрузки ( $R_n$ ), равное  $R_n = 1$  кОм. Выбранное значение сопротивления нагрузки обеспечивает формирование электрических импульсов, амплитуда которых превышает уровень шума усилителя (У).

Экспериментальная установка помещается в светонепроницаемую камеру (СК). Это необходимо для исключения воздействия на SiФЭУ излучения, создаваемого внешними источниками искусственного и естественного освещения.

При воздействии на SiФЭУ импульсов оптического излучения на сопротивлении нагрузки формируются электрические импульсы. Эти импульсы усиливаются в усилителе (У) и поступают для оцифровки на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Осциллограф (О) позволяет контролировать внешний вид электрических импульсов и определять их амплитуду. Оцифрованные значения электрических импульсов передаются в компьютер (К), где формируется массив данных об амплитудах этих импульсов. Программное обеспечение компьютера позволяет вычислять среднюю амплитуду электрических импульсов ( $U_{cp}$ ).

Питание SiФЭУ осуществляется от источника постоянного напряжения (ИП<sub>3</sub>). Напряжение питания SiФЭУ ( $U_{пит}$ ) контролируется вольтметром (В). Величина электрического тока, протекающего через SiФЭУ, измеряется амперметром (А).

Если обе диафрагмы ( $D_1$  и  $D_2$ ) закрыты, то на SiФЭУ не поступает оптическое излучение сигнальных импульсов и амперметр регистрирует темновой ток  $I_t$ . Если открыта только диафрагма  $D_1$ , то амперметр регистрирует общий ток  $I_0$ . Если  $D_1$  и  $D_2$  открыты, то амперметр регистрирует ток, обусловленный оптическим излучением сигнальных импульсов и внешним фоновым оптическим излучением ( $I_{об}$ ). Контроль этого тока проводится в целях предотвращения теплового пробоя исследуемых SiФЭУ.

Поскольку исследуемые SiФЭУ имеют различные напряжения пробоя ( $U_{пр}$ ), то для сравнения их характеристик между собой используется величина перенапряжения:  $\Delta U = U_{пит} - U_{пр}$ . Исследования выполнены в диапазоне перенапряжений от  $-0,5$  до  $1,0$  В. Для больших значений перенапряжений наблюдалось значительное увеличение темнового тока, что могло привести к тепловому пробоя SiФЭУ. При меньших значениях перенапряжения коэффициент умножения SiФЭУ приблизительно равен единице. Напряжение пробоя определяется по вольт-амперной характеристике SiФЭУ [13].

Согласно ГОСТ 21934–83<sup>1</sup>, плоский угол зрения ( $\beta$ ) определяется как сумма двух углов, лежащих в нормальной плоскости к фоточувствительной поверхности SiФЭУ и отложенных со-

<sup>1</sup> ГОСТ 21934–83. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294831/4294831821.pdf> (дата обращения 09.10.2024).

ответственно с правой и левой сторон от оси, проведенной под углом  $\alpha = 0^\circ$  к такой плоскости. Углы соответствуют направлению пучков оптического излучения, при которых чувствительность становится равной нулю [14].

Если освещенность внешнего фонового оптического излучения превышает некоторое значение  $E_{\text{осл}}$ , то кремниевый фотоэлектронный умножитель перестает реагировать на какие-либо поступающие на него импульсы оптического излучения [4–6]. В этом случае считают, что фотоприемник ослеплен.

Все измерения выполнены при комнатной температуре  $T = 293$  К. Также при измерении плоского угла зрения удовлетворялись все требования по расходимости пучка оптического излучения и погрешности измерений, определенные ГОСТ Р 59607–2021<sup>1</sup>.

**Результаты измерений и их обсуждение.** При разных уровнях освещенности внешнего фонового оптического излучения  $E$  получены диаграммы направленности исследуемых фотоэлектронных умножителей в полярной системе координат для энергетической экспозиции, соответствующей максимальному значению  $H_{\text{max}}$  из их динамического диапазона (рис. 2). Для построения зависимости были выбраны три контрольные точки внешнего фонового оптического излучения в пределах от 0 до 40 лк, так как при 40 лк для КОФ5-1035 наступает ослепление фотоприемника [6]. Во время проведения измерений выбрана величина перенапряжения  $\Delta U = 0$  В, так как, согласно исследованиям [15], для такой величины перенапряжения отношение сигнал/шум исследуемых SiФЭУ принимает максимальное значение.

Диаграммы направленности, полученные для других исследуемых SiФЭУ при перенапряжении  $\Delta U = 0$  В и максимальном значении энергетической экспозиции  $H_{\text{max}}$  из их динамического диапазона, имели аналогичный вид. Исследование проводилось при значениях  $H_{\text{max}} = 1 \cdot 10^{-9}$ ;  $1,7 \cdot 10^{-9}$ ;  $3 \cdot 10^{-9}$  Дж/м<sup>2</sup> для Ketek PM 3325, ON Semi FC 30035 и КОФ5-1035 соответственно. Если оптическое излучение подавалось в нормальной плоскости к фоточувствительной поверх-

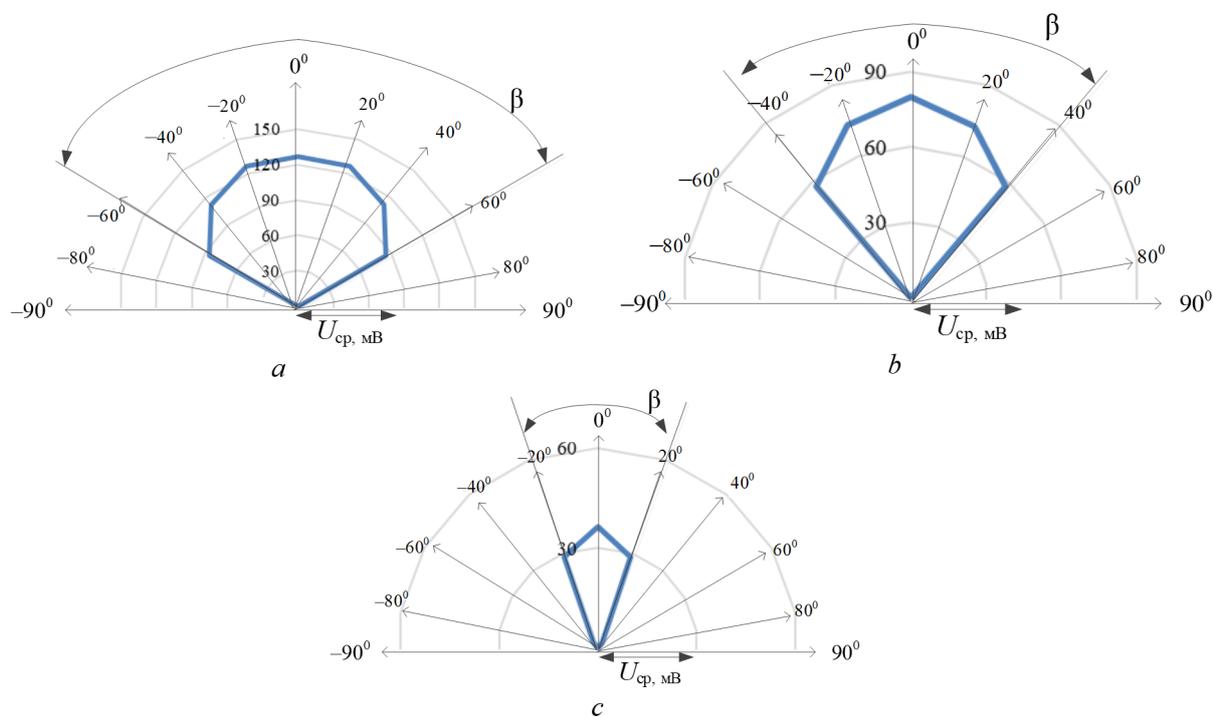


Рис. 2. Диаграмма направленности в полярной системе координат для КОФ5-1035:  
*a* – при  $E = 0$  лк; *b* –  $E = 12$  лк; *c* –  $E = 32$  лк

Fig. 2. Radiation pattern in the polar coordinate system for KOF5-1035: *a* – at  $E = 0$  lux; *b* –  $E = 12$  lux; *c* –  $E = 32$  lux

<sup>1</sup> ГОСТ Р 59607–2021. Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. 53 с.

ности, то увеличение уровня внешнего фонового оптического излучения  $E$  приводило к снижению амплитуд импульсов. Так, для КОФ5-1035  $U_{cp} = 127; 80$  и  $36$  мВ при  $E = 0; 12$  и  $32$  лк соответственно. Для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 при тех же условиях  $U_{cp} = 376; 301$  и  $226$  мВ и  $U_{cp} = 303; 212$  и  $152$  мВ соответственно.

С увеличением уровня внешнего фонового оптического излучения  $E$  диаграмма направленности сужалась и уменьшался плоский угол зрения  $\beta$  (см. таблицу).

**Плоский угол зрения SiФЭУ при изменении внешнего фонового оптического излучения**  
**The flat angle of view of the SiPMs when changing the external background optical radiation**

Модель кремниевого фотозлектронного умножителя Silicon Photomultiplier Model	Плоский угол зрения $\beta$ при заданном уровне освещенности $E$ Flat angle of view $\beta$ at a given light level $E$			$E_{осл},$ лк $E_{осл},$ lux
	$E = 0$ лк $E = 0$ lux	$E = 12$ лк $E = 12$ lux	$E = 32$ лк $E = 32$ lux	
КОФ5-1035	120°	80°	40°	40
Ketek PM 3325	160°	140°	100°	100
ON Semi FC 30035	160°	120°	80°	80

Таким образом, наибольшее значение плоского угла зрения было получено для Ketek PM 3325, а наименьшее – для КОФ5-1035, что связано с конструкцией корпуса второй модели (корпус содержит бортик вокруг фоточувствительной площадки в отличие от других исследуемых SiФЭУ).

Отличие величины  $\beta$  для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 с увеличением внешнего фонового оптического излучения обусловлено тем, что ослепление фотозлектронных умножителей первой модели наступает при более высоких значениях  $E$ .

Уменьшение амплитуды импульсов при наличии внешнего фонового оптического излучения объясняется тем, что увеличение уровня внешнего фонового оптического излучения инициирует рост количества неосновных носителей в областях пространственного заряда и умножения SiФЭУ [16]. Это приводит к понижению величины электрического поля в этих областях и, как следствие, к уменьшению коэффициента умножения носителей заряда, а значит, и средней амплитуды электрических импульсов  $U_{cp}$ .

Среднее значение амплитуды импульсов при максимальном угле отклонения пучка оптического излучения от нормали, проведенной к поверхности SiФЭУ, снижается на 39 % для КОФ5-1035, на 20 % – для Ketek PM 3325 и на 18 % – для ON Semi FC 30035 [17]. Уменьшение энергетической экспозиции в пределах динамического диапазона приводит к пропорциональному уменьшению амплитуды импульсов. Плоский угол зрения  $\beta$  при снижении энергетической экспозиции оставался неизменным до значений  $0,39H_{max}$ ,  $0,20H_{max}$  и  $0,22H_{max}$  для КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 соответственно. При более низких значениях энергетической экспозиции плоский угол зрения  $\beta$  уменьшался с понижением энергетической экспозиции практически до нуля.

На рис. 3 представлены зависимости плоского угла зрения для исследуемых SiФЭУ от внешнего фонового оптического излучения. Данные зависимости получены при перенапряжении  $\Delta U = 0$  В и энергетической экспозиции оптического излучения импульса, соответствующей максимальному значению из динамического диапазона исследуемых SiФЭУ. Видно, что при отсутствии внешнего фонового оптического излучения ( $E = 0$  лк) плоский угол зрения  $\beta = 120^\circ$  для КОФ5-1035 и  $\beta = 160^\circ$  для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 [14]. Значение  $\beta$  уменьшается до нуля в диапазоне изменения  $E$  от 0 до 40 лк для КОФ5-1035, от 0 до 80 лк – для ON Semi FC 30035 и от 0 до 100 лк – для Ketek PM 3325. В указанном диапазоне внешнего фонового оптического излучения зависимость  $\beta(E)$  имеет характер, близкий к линейному. Для ее количественной характеристики используем величину  $\Delta\beta/\Delta E$ , где  $\Delta\beta$  – изменение плоского угла зрения при изменении внешнего фонового оптического излучения  $\Delta E$ . Тогда оценка этой величины  $\Delta\beta/\Delta E = 3,0; 2,0$  и  $1,6$  градус/лк для КОФ5-1035, ON Semi FC 30035 и Ketek PM 3325. Таким образом, зависимость  $\beta(E)$  для КОФ5-1035 проявляется сильнее, чем для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035. Это можно объяснить различием их конструктивных особенностей.

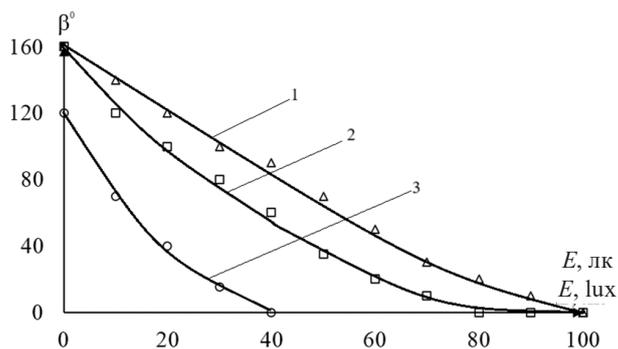


Рис. 3. Зависимость плоского угла зрения от внешнего фонового оптического излучения: кривая 1 – Ketek PM 3325; кривая 2 – ON Semi FC 30035; кривая 3 – КОФ5-1035

Fig. 3. Dependence of the plane viewing angle on external background optical radiation: curve 1 – Ketek PM 3325; curve 2 – ON Semi FC 30035; curve 3 – КОФ5-1035

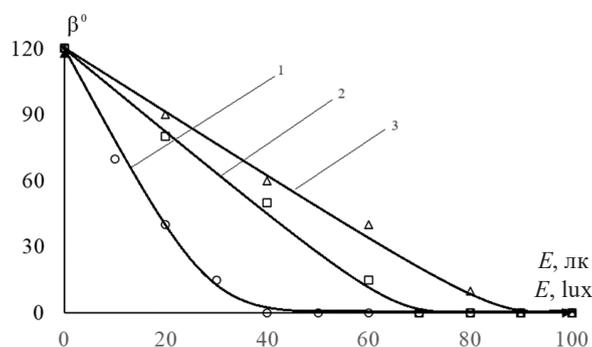


Рис. 4. Зависимость плоского угла зрения от внешнего фонового оптического излучения для КОФ5-1035: кривая 1 – при  $\Delta U = 0$  В; кривая 2 – при  $\Delta U = 0,5$  В; кривая 3 – при  $\Delta U = 1,0$  В

Fig. 4. Dependence of the plane viewing angle on external background optical radiation for КОФ5-1035: curve 1 – at  $\Delta U = 0$  V; curve 2 – at  $\Delta U = 0.5$  V; curve 3 – at  $\Delta U = 1.0$  V

На рис. 4 представлена типичная зависимость плоского угла зрения от внешнего фонового оптического излучения для фотозлектронного умножителя КОФ5-1035 при различных перенапряжениях. Для других исследуемых SiФЭУ эта зависимость аналогична. Из рис. 4 видно, что возрастание перенапряжения приводит к увеличению внешнего фонового оптического излучения  $E$ , при котором угол  $\beta$  становится равным нулю. Поскольку представленная зависимость также близка к линейной, то для КОФ5-1035 оценка величины  $\Delta\beta/\Delta E = 3,0; 1,7$  и  $1,3$  градус/лк для  $\Delta U = 0; 0,5$  и  $1,0$  В соответственно. Для ON Semi FC 30035 и Ketek PM 3325 значение  $\Delta\beta/\Delta E = 2,0; 1,1; 0,9$  градус/лк и  $\Delta\beta/\Delta E = 1,6; 0,9$  и  $0,7$  градус/лк при  $\Delta U = 0; 0,5$  и  $1,0$  В соответственно. Таким образом, изменение внешнего фонового оптического излучения оказывает меньшее влияние на изменение плоского угла зрения при больших перенапряжениях.

Как следует из зависимостей, представленных на рис. 5, при ослеплении SiФЭУ восстановить величину плоского угла зрения можно путем увеличения перенапряжения. В частности, видно, что для КОФ5-1035 при условии полного ослепления при  $\Delta U = 0$  В и  $E = 40$  лк путем повышения перенапряжения до  $\Delta U = 1,0$  В можно обеспечить частичное восстановление плоского угла зрения до  $100^\circ$ , то есть до 83 % его первоначального значения при  $\Delta U = 0$  В и  $E = 0$  лк. Для ON Semi FC 30035 и Ketek PM 3325 при таком же перенапряжении значение плоского угла зрения можно восстановить до  $150^\circ$  и  $160^\circ$ , или до 94 % и 100 % его значения, полученного при  $\Delta U = 0$  В и  $E = 0$  лк, соответственно. Полностью восстановить воздействие внешнего фонового оптического излучения в 40 лк для КОФ5-1035 удастся при  $\Delta U = 1,6$  В, а для ON Semi FC 30035 – при  $\Delta U = 1,1$  В. Следует отметить, что соответствующее увеличение перенапряжения приводит

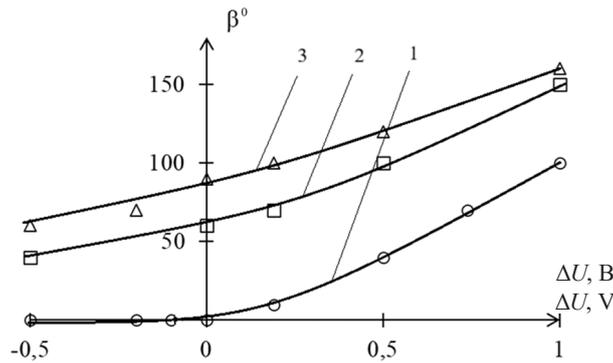


Рис. 5. Зависимость плоского угла зрения от перенапряжения при уровне внешнего фонового оптического излучения, равном 40 лк: кривая 1 – КОФ5-1035; кривая 2 – ON Semi FC 30035; кривая 3 – Ketek PM 3325

Fig. 5. Dependence of the plane angle of view on overvoltage at a level of external background optical radiation of 40 lux: curve 1 – KOF5-1035; curve 2 – ON Semi FC 30035; curve 3 – Ketek RM 3325

к повышению тока  $I_{\text{ов}}$  до значений 250 мкА для КОФ5-1035, 300 мкА – для ON Semi FC 30035, что при долгой эксплуатации может привести к тепловому пробую этих фотоприемников.

Восстановить величину плоского угла зрения можно также при использовании светофильтра с полосой пропускания  $470 \pm 20$  нм. Полностью восстановить значение плоского угла зрения до  $160^\circ$  для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 и до  $120^\circ$  для КОФ5-1035 можно при  $\Delta U = 0$  В и уровне внешнего фонового оптического излучения в 100 лк.

Восстановить плоский угол зрения при значении освещенности внешнего фонового оптического излучения 500 лк удастся при сочетании наличия светофильтра и повышения перенапряжения до  $\Delta U = 0,8$  В для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 и до  $\Delta U = 1,0$  В – для КОФ5-1035. При этом величина фототока составила 97 мкА для ON Semi FC 30035, 120 мкА – для Ketek PM 3325 и 86 мкА – для КОФ5-1035.

Нами определено, что максимальное значение освещенности, при котором существовала возможность восстановить величину плоского угла зрения до первоначального значения, составило 3000 лк. Этого удалось достигнуть при использовании светофильтра с полосой пропускания  $470 \pm 20$  нм и перенапряжениях  $\Delta U = 1,6; 1,8; 2,1$  В для Ketek PM 3325, ON Semi FC 30035 и КОФ5-1035 соответственно. Однако при таких условиях эксплуатация SiФЭУ сопровождается высокими токами для всех исследуемых фотоприемников:  $I_{\text{ов}} = 300; 350$  и 410 мкА для КОФ5-1035, ON Semi FC 30035 и Ketek PM 3325 соответственно, что может привести к их тепловому пробую и дальнейшей непригодности для работы.

**Заключение.** Установлено, что с увеличением уровня освещенности внешнего фонового оптического излучения диаграмма направленности SiФЭУ сужается. Это связано с уменьшением плоского угла зрения. Зависимость величины плоского угла зрения от уровня освещенности для КОФ5-1035 проявляется сильнее чем для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035.

Показано, что восстановить плоский угол зрения до первоначального значения при  $\Delta U = 0$  В и  $E = 0$  лк возможно путем повышения перенапряжения и использованием светофильтра с полосой пропускания  $470 \pm 20$  нм.

Максимальное значение освещенности, при котором существовала возможность восстановить величину плоского угла зрения до первоначального значения, составляла 3000 лк для всех исследуемых SiФЭУ.

Полученные результаты представляют собой потенциально ценный ресурс для разработки и совершенствования оптических систем связи общего доступа.

#### Список использованных источников

1. Open optical communication systems at a hyperscale operator / M. Newland, R. Schmogrow, M. Cantono [et al.] // Journal of Optical Communications and Networking. – 2020. – Vol. 12, № 6. – P. 50–58. <https://doi.org/10.1364/JOCN.381897>
2. Perwej, Y. The Next Generation of Wireless Communication Using Li-Fi (Light Fidelity) Technology / Y. Perwej // Journal of Computer Networks. – 2017. – Vol. 4, № 1. – P. 20–29. <https://doi.org/10.12691/jcn-4-1-3>

3. Abisayo, A. *Optically Amplified Free-space Optical Communication Systems* / A. Abisayo. – University of Nottingham, 2013. – 209 p. – URL: <https://eprints.nottingham.ac.uk/13304/1/AladelobaAbisayoThesis.pdf> (date of access 25.09.2024)
4. *Quantum Communications and Cryptography* / ed. A. V. Sergienko. – CRC press, 2019. – 248 p. <https://doi.org/10.1201/9781315221120>
5. Secure quantum key distribution with realistic devices / Feihu Xu, Xiongfeng Ma, Qiang Zhang [et al.] // *Reviews of Modern Physics*. – 2020. – Vol. 92. – Art. ID 025002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.025002>
6. Регистрация оптического излучения переменной интенсивности в режиме счета фотонов лавинным фотодиодом / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина [и др.] // *Оптический журнал*. – 2021. – Т. 88, № 11. – С. 9–15. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-11-09-15>
7. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics / M. Stagliano, L. Abegão, A. Chiericia, F. d'Erricoa // *EPH – International Journal of Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 4, Iss. 10. – P. 10–29. <https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143>
8. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности / С. Клемин, Ю. Кузнецов, Л. Филатов [и др.] // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. – 2007. – № 8. – С. 80–86.
9. Special Issue on: Optical Wireless Communications for Emerging Connectivity Requirements / Mohammad Ali Khalighi, Zabih Ghassemloooy, M.-S. Alouini [et al.] // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. – 2021. – Vol. 2. – P. 82–86. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3045818>
10. Гулаков, И. Р. Спектральные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // *Успехи прикладной физики*. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 164–171. <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-2-164-171>
11. Ландсберг, Г. С. Оптика: учеб. пособие для вузов / Г. С. Ландсберг. – 6-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.
12. Зеневич, А. О. Исследование динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 30–39. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-1-30-39>
13. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
14. Гулаков И. Р. Плоский угол зрения / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // *Известия вузов. Электроника*. – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 360–367. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-360-367>
15. Асаёнок, М. А. Работа кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой  $p^+p-n^+$  в режиме одно-квантовой регистрации / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина [и др.] // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 349–356. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>
16. Асаёнок, М. А. Исследование характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич // *Прикладная физика*. – 2018. – № 6. – С. 49–53.
17. Гулаков, И. Р. Влияние угла освещения на выходные параметры кремниевого фотоумножителя / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 344–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-344-352>

## References

1. Newland M., Schmogrow R., Cantono M., Vusirikala V., Hofmeister T. Open optical communication systems at a hyperscale operator. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 50–58. <https://doi.org/10.1364/JOCN.381897>
2. Perwej Y. The Next Generation of Wireless Communication Using Li-Fi (Light Fidelity) Technology. *Journal of Computer Networks*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 20–29. <https://doi.org/10.12691/jcn-4-1-3>
3. Abisayo A. *Optically Amplified Free-space optical Communication Systems*. University of Nottingham, 2013. 209 p. Available at: <https://eprints.nottingham.ac.uk/13304/1/AladelobaAbisayoThesis.pdf> (accessed 25.09.2024).
4. Sergienko A. V., ed. *Quantum Communications and Cryptography*. CRC press, 2019. 248 p. <https://doi.org/10.1201/9781315221120>
5. Feihu Xu, Xiongfeng Ma, Qiang Zhang, Hoi-Kwong Lo, Jian-Wei Pan. Secure quantum key distribution with realistic devices. *Reviews of Modern Physics*, 2020, vol. 92, art. ID 025002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.025002>
6. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Novikov E. V., Goibov S. A. Detection of variable-intensity optical emission using an avalanche photodiode in photon-counting mode. *Journal of Optical Technology*, 2021, vol. 88, no. 11, pp. 620–624. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000620>
7. Stagliano M., Abegão L., Chiericia A., d'Errico F. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics. *EPH – International Journal of Science and Engineering*, 2018, vol. 4, iss.10, pp. 10–29. <https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143>
8. Klemin S., Kuznetsov Yu., Filatov L., Buzhan P., Dolgoshein B., Il'in A., Popova E. Silicon photomultiplier. New opportunities. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2007, no. 8, pp. 80–86 (in Russian).
9. Khalighi M. A., Zabih G., Alouini M.-S., Hranilovic S., Zvanovec S. Special Issue on: Optical Wireless Communications for Emerging Connectivity Requirements. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, vol. 2, pp. 82–86. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3045818>

10. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Investigation of the spectral characteristics of silicon photomultiplier tubes. *Uspekhi prikladnoi fiziki* [Advances in Applied Physics], 2021, vol. 9, no. 2, pp. 164–171 (in Russian). <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-2-164-171>
11. Landsberg G. S. *Optics*. 6<sup>th</sup> ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 848 p. (in Russian).
12. Zenevich A. O., Kochergina O. V. Study of the dynamic range of silicon photomultipliers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 30–39 (in Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-1-30-39>
13. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, Higher State College of Communications Publ., 2012. 276 p. (in Russian).
14. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Flat angle of view. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 360–367 (in Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-360-367>
15. Asayonok M. A., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Novikov E. V., Soroka S. A. Operation of silicon photomultipliers with  $p^+p-n^+$  structure in single-quantum registration mode. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 349–356 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>
16. Asayonok M. A., Zenevich A. O. Study of the characteristics of silicon photomultipliers. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2018, no. 6, pp. 49–53 (in Russian).
17. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Influence of illumination angle on the output parameters of a silicon photomultiplier. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 344–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-344-352>

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ**  
**INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS**

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-79-88>  
УДК 528.88:550.388.2



Оригинальная статья

**В. М. Артемьев, А. О. Наумов, П. А. Хмарский\***

*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ТРЕХМЕРНОГО  
РАДИОТОМОГРАФИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ  
ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ЕВРОПЕЙСКОЙ СЕТИ  
НЕПРЕРЫВНО ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ ОПОРНЫХ СТАНЦИЙ EPN**

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований и верификации программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере над территорией Европы. В качестве входных данных использовались результаты измерений 100 станций (из них 10 на территории Беларуси) Европейской сети непрерывно функционирующих опорных станций EPN (EUREF Permanent Network) и навигационные данные высокоорбитальных навигационных спутников в формате RINEX. Разработанные программные средства реализуют полный цикл обработки данных, включая структурирование первичной информации, предварительную обработку с отбраковкой аномальных значений, вычисление полного электронного содержания и трехмерную реконструкцию ионосферы. Продемонстрированы примеры вычисления полного электронного содержания над Республикой Беларусь от различных наземных станций (Брест, Новополоцк, Витебск) в разные моменты времени для 11 мая 2024 г., когда магнитосфера Земли пережила сильнейшее возмущение в текущем столетии. Приведены результаты трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере с временным разрешением 15 мин, включая визуализацию сечений реконструируемой области в плоскости с постоянной широтой 50°, в плоскости с постоянной долготой 19°, а также суммарное вертикальное полное электронное содержание, полученное суммированием реконструированного поля по вертикальным столбцам. Экспериментально подтверждена эффективность разработанных алгоритмов в условиях сильных геомагнитных возмущений. Полученные результаты целесообразно использовать при мониторинге ионосферы с целью обеспечения надежной работы радиосистем, обнаружения ионосферных аномалий естественного и искусственного происхождения, а также прогнозирования природных явлений на их основе.

**Ключевые слова:** ионосфера, радиотомография, полное электронное содержание, вертикальное электронное содержание, глобальная спутниковая навигационная система, EPN, EUREF, навигационный сигнал

**Благодарности:** работа выполнена в рамках Программы Союзного государства «Разработка базовых элементов орбитальных и наземных средств в интересах создания многоспутниковых группировок малоразмерных космических аппаратов наблюдения земной поверхности и околоземного космического пространства «Комплекс-СГ»» на 2023–2026 годы, мероприятие 3.3.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** *Артемьев Валентин Михайлович* – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0009-0007-6246-992X>. E-mail: [artemiev@iaph.bas-net.by](mailto:artemiev@iaph.bas-net.by); *Наумов Александр Олегович* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-4624-9261>. E-mail: [naumov@iaph.bas-net.by](mailto:naumov@iaph.bas-net.by); *Хмарский Петр Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, докторант Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: [pierre2009@mail.ru](mailto:pierre2009@mail.ru)

**Вклад авторов:** *Артемьев Валентин Михайлович* – обоснование концепции исследования, формулирование идеи, исследовательских целей и задач, разработка методологии и модели исследования; *Наумов Александр Олегович* – сбор и систематизация данных, компьютерное и математическое моделирование, проведение сравнительного анализа, написание текста рукописи; *Хмарский Петр Александрович* – обобщение и интерпретация результатов исследования, редактирования текста рукописи, работа с графическими материалами.

**Для цитирования:** Артемьев, В. М. Верификация программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным Европейской сети непрерывно функционирующих опорных станций EPN / В. М. Артемьев, А. О. Наумов, П. А. Хмарский // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 79–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-79-88>

Поступила в редакцию: 30.01.2025

Утверждена к публикации: 06.03.2025

Подписана в печать: 12.03.2025

### Original article

**Valentin M. Artemiev, Alexander O. Naumov, Petr A. Khmarskiy\***

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,  
16, Akademicheskaya St., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

## **VERIFICATION OF SOFTWARE FOR THREE-DIMENSIONAL RADIO TOMOGRAPHIC MONITORING OF ELECTRON DENSITY IN THE IONOSPHERE BASED ON DATA FROM THE EUREF PERMANENT NETWORK**

**Abstract.** This paper presents the results of experimental studies and verification of software tools for three-dimensional radiotomographic monitoring of electron concentration fields in the ionosphere over Europe. The input data comprised measurements from 100 stations (including 10 in Belarus) of the EUREF Permanent Network (EPN) and navigation data from high-orbit navigation satellites in RINEX format. The developed software implements a complete data processing cycle, including primary information structuring, preliminary processing with anomalous value filtering, total electron content calculation, and three-dimensional ionosphere reconstruction. Examples of total electron content calculations over the Republic of Belarus from various ground stations (Brest, Novopolotsk, Vitebsk) are demonstrated for different time points on May 11, 2024, when Earth's magnetosphere experienced the strongest disturbance of the current century. The results of three-dimensional radiotomographic monitoring of electron concentration fields in the ionosphere with 15-minute temporal resolution are presented, including visualization of reconstructed region cross-sections at constant latitude  $50^\circ$ , constant longitude  $19^\circ$ , and the total vertical electron content obtained by summing the reconstructed field along vertical columns. The effectiveness of the developed algorithms under strong geomagnetic disturbance conditions has been experimentally confirmed. The obtained results are suitable for ionospheric monitoring to ensure reliable radio system operation, detection of natural and artificial ionospheric anomalies, and prediction of natural phenomena based on these observations.

**Keywords:** ionosphere, radio tomography, total electron content, vertical electron content, global satellite navigation system, EPN, EUREF, navigation signal

**Acknowledgements:** this work was carried out within the framework of Activity 3.3 of the Union State Program “Development of basic elements of orbital and ground facilities for creating multi-satellite constellations of small spacecraft for Earth surface and near-Earth space observation «Complex-SG»” for 2023–2026.

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Valentin M. Artemiev* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0009-0007-6246-992X>. E-mail: [artemiev@iaph.bas-net.by](mailto:artemiev@iaph.bas-net.by); *Alexander O. Naumov* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-4624-9261>. E-mail: [naumov@iaph.bas-net.by](mailto:naumov@iaph.bas-net.by); *Petr A. Khmarskiy* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Doctoral Candidate at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: [pierre2009@mail.ru](mailto:pierre2009@mail.ru)

**Contribution of the authors:** *Valentin M. Artemiev* – substantiation of the research concept, formulation of the idea, research goals and objectives, development of research methodology and model; *Alexander O. Naumov* – data collection and systematization, computer and mathematical modeling, comparative analysis, manuscript writing; *Petr A. Khmarskiy* – generalization and interpretation of research results, manuscript editing, work with graphic materials.

**For citation:** Artemiev V. M., Naumov A. O., Khmarskiy P. A. Verification of software for three-dimensional radio tomographic monitoring of electron density in the ionosphere based on data from the EUREF Permanent Network. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 68, no. 3, pp. 79–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-79-88>

Received: 30.01.2025

Approved for publication: 06.03.2025

Signed to the press: 12.03.2025

**Введение.** В современных условиях развития космических и наземных радиотехнических систем критически важной становится задача оперативного мониторинга состояния ионосферы Земли [1]. Это обусловлено тем, что ионосферные возмущения оказывают существенное влияние на распространение радиоволн, что напрямую затрагивает работу систем спутниковой навигации, радиосвязи и радиолокации [2]. Особую значимость данная проблема приобретает в текущий период максимума солнечной активности, характеризующийся повышенной частотой возникновения геомагнитных бурь и ионосферных возмущений [3–5]. Разработка эффективных методов и инструментов для непрерывного контроля параметров ионосферы позволяет не только своевременно выявлять аномалии различного происхождения, но и обеспечивать необходимую точность и надежность работы современных радиотехнических систем [2]. При этом использование данных существующих сетей наземных станций глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) открывает новые возможности для создания систем оперативного мониторинга состояния ионосферы с высоким пространственно-временным разрешением [2, 6–10].

Одним из наиболее эффективных методов исследования ионосферы в настоящее время является радиотомография с использованием сигналов ГНСС [1, 4, 6–11]. Особую роль в изучении ионосферы играет Европейская сеть непрерывно функционирующих опорных станций (EUREF Permanent Network, EPN), которая включает более 300 постоянно действующих ГНСС-станций, распределенных по всей территории Европы [12]. Каждая станция EPN оснащена высокоточным геодезическим оборудованием и работает в непрерывном режиме, гарантируя круглосуточный сбор данных в течение всего года. Высокая плотность размещения на местности станций EPN обеспечивает отличное пространственное покрытие, которое позволяет строить детальные карты ионосферных параметров с хорошим разрешением, а непрерывные измерения с высокой частотой сбора данных дают возможность отслеживать быстропротекающие ионосферные процессы.

В рамках проводимых исследований авторами были разработаны программные средства трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по радиосигналам от высокоорбитальных навигационных спутниковых систем [2, 11, 13–15].

Настоящая статья посвящена верификации разработанных программных средств и представлению результатов экспериментальных исследований трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным наземной системы EPN, в том числе в условиях сильных геомагнитных возмущений.

**Описание входных данных и общие сведения о системе EPN.** Система EPN представляет собой европейскую наземную референсную структуру и сеть постоянно действующих ГНСС-станций [12]. Она является реализацией европейской системы координат ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) и играет ключевую роль в геодезических измерениях на территории Европы. Вся информация со всех действующих станций собирается и обрабатывается централизованной системой, что обеспечивает единый стандарт качества данных. Важным преимуществом EPN является открытый доступ к данным ее станций с возможностью проведения научных исследований и верификации разработанных программных средств.

В контексте радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере сеть EPN предоставляет первичные данные, к которым относятся фазовые измерения на частотах L1 и L2, кодовые измерения P1 и P2, доплеровские измерения и показатели отношения сигнал/шум [12]. На основе этих данных можно вычислять производные параметры, включающие полное электронное содержание (Total Electron Content, TEC), вертикальное электронное содержание (Vertical Total Electron Content, VTEC), градиенты электронной концентрации и сцинтилляционные индексы.

Использование данных EPN для исследования ионосферы обладает значительными преимуществами. Высокая плотность размещения станций в Европе обеспечивает отличное пространственное покрытие, что позволяет строить детальные карты ионосферных параметров с хорошим разрешением. Непрерывные измерения с высокой частотой сбора данных (до 1 Гц) дают возможность отслеживать быстропротекающие ионосферные процессы [12]. Качество получаемых данных гарантируется использованием стандартизированного оборудования, едиными протоколами измерений и постоянным контролем качества, включая регулярную калибровку приемников.

В области исследований ионосферы данные EPN активно применяются для изучения различных явлений [12, 16, 17]: регулярных вариаций, включающих суточные изменения, сезонных вариаций и широтных зависимостей параметров ионосферы. Особое внимание уделяется анализу возмущений, таких как ионосферные бури, перемещающиеся ионосферные возмущения и локальные аномалии. Практическое применение этих исследований включает прогнозирование состояния ионосферы, коррекцию навигационных решений и оценку влияния ионосферных условий на качество радиосвязи. Данные EPN в открытом доступе представлены в нескольких стандартных форматах RINEX (Receiver Independent Exchange Format) и SINEX (Solution Independent Exchange Format) [18]. Доступ к данным осуществляется через FTP-серверы, веб-порталы и специализированные центры обработки данных, что обеспечивает удобство работы для исследователей.

**Методика обработки данных мониторинга ионосферы по данным сети EPN.** В ходе экспериментальных исследований разработанных программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным космических аппаратов использовались данные 100 (из них 10 непосредственно на территории Республики Беларусь) станций сети EPN (рис. 1).



Рис. 1. Схема размещения станций сети EPN, данные которых использовались для экспериментальных исследований и верификации программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере

Fig. 1. Layout of EPN stations whose data were used for experimental studies and verification of software for three-dimensional radio tomographic monitoring of electron concentration fields in the ionosphere

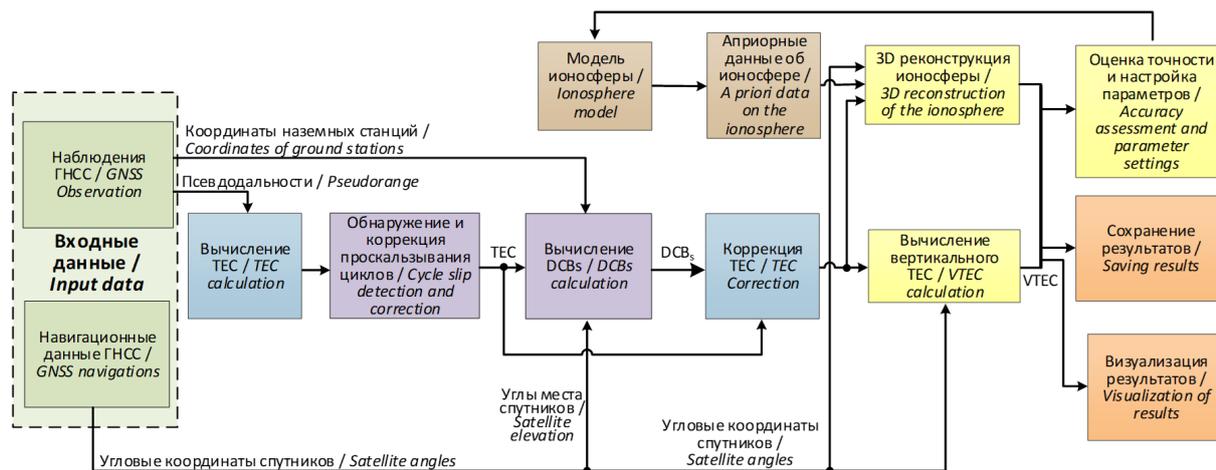


Рис. 2. Структура радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере

Fig. 2. Structure of radio tomographic monitoring of electron concentration fields in the ionosphere

Обработка данных программными средствами включала в себя следующие основные этапы: чтение и структурирование данных; предварительная обработка данных; вычисление полного электронного содержания в ионосфере; трехмерная реконструкция ионосферы; отображение и анализ полученных результатов обработки.

Структурная схема радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере, реализующая перечисленные этапы, приведена на рис. 2.

В ходе *первого этапа* обрабатывались данные GPS в формате RINEX, для которого был реализован соответствующий алгоритм для извлечения, преобразования и структурирования необходимой информации. На *втором этапе* (предварительной обработки) выполнялась отбраковка аномальных значений. Для некоторых приемных станций наблюдались аномальные значения и существенные пропуски в данных ГНСС. Такие зашумленные и искаженные данные исключались из последующей обработки. Для обнаружения аномалий данных использовалось скользящее окно с вычислением математического ожидания и линейной интерполяцией удаленных аномальных значений. При обнаружении аномалий крайне важно исключить только аппаратные и искусственно созданные помехи, к которым не относят геомагнитные бури и ионосферные штормы. Поэтому на этапе предварительной обработки привлекались экспертные оценки специалистов.

Вычисление полного электронного содержания в ионосфере (TEC) в ходе *третьего этапа* проводилось согласно алгоритмам и методикам, описанным в [6, 3, 11, 14, 15]. Особенности данных алгоритмов: использование двухчастотных сигналов ГНСС; комбинация измерений по фазовым и кодовым задержкам; решение задач коррекции проскальзывания цикла навигационного сигнала и определения дифференциальных кодовых задержек радионавигационных сигналов для последующей корректировки значений TEC. *Этапы 4 и 5* (трехмерная реконструкция и отображение и анализ полученных результатов реконструкции) реализовывались с использованием алгоритмов, описанных в [13, 19]. Алгоритм трехмерной реконструкции ионосферы основывается на использовании модифицированного метода Ландвебера и отличается установкой параметров релаксации и начальных значений в соответствии с уравнением Чепмена и экспоненциальным распределением, ограничением на гладкость на основе девятиточечной конечно-разностной аппроксимации оператора Лапласа второго порядка, а также введением весовых коэффициентов, обеспечивающих учет влияния ограничений и начальных значений.

**Результаты испытаний разработанных алгоритмов трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным сети EPN.** На рис. 3 приведены результаты расчета полного электронного содержания по данным спутников GPS и наземных станций системы EPN, размещенных на территории Беларуси, 11 мая 2024 г.,

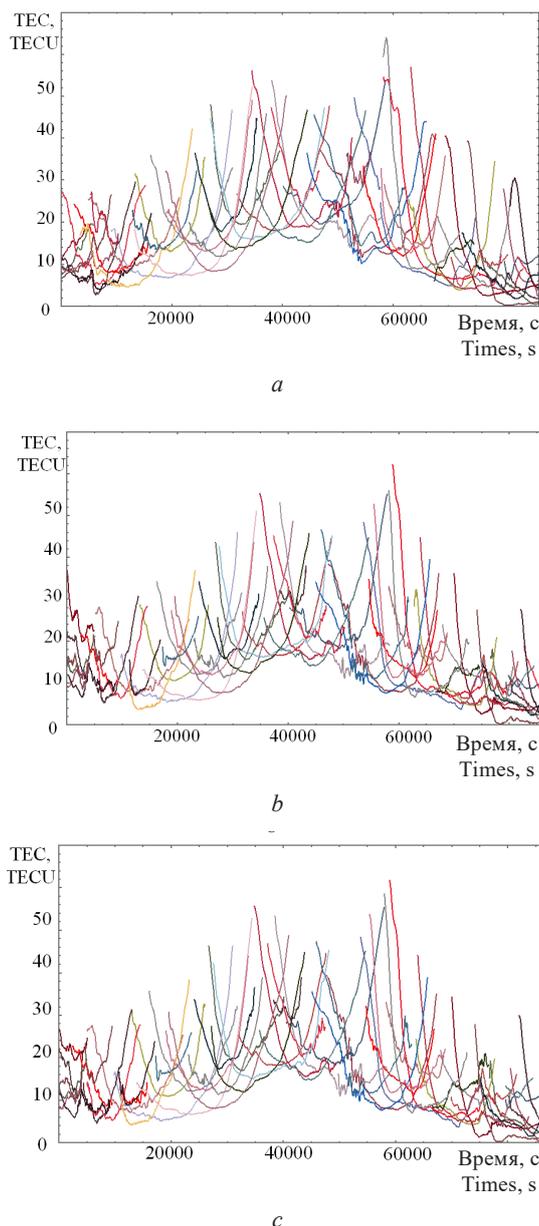


Рис. 3. Результаты расчета полного электронного содержания за 11 мая 2024 г. по данным спутников GPS (различными цветами показаны значения для разных спутников) и наземных станций системы EPN, размещенных на территории Беларуси: Брест (а), Новополоцк (b), Витебск (c)

Fig. 3. Results of total electron content calculations for May 11, 2024 based on GPS satellites data (values for different satellites are shown in different colors) and EPN system ground stations located in Belarus: Brest (a), Novopolotsk (b), Vitebsk (c)

когда магнитосфера Земли пережила сильнейшее возмущение в текущем столетии (Sunspot region AR13664. URL: <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/region/13664.html>). Причиной таких возмущений стала повышенная активность Солнца – корональные выбросы массы 7–9 мая 2024 г. Графики на рис. 3 наглядно демонстрируют суточную динамику изменения TEC во время мощной геомагнитной бури. Особенно заметны резкие колебания значений в дневное время (между 10:00 и 16:00 UTC), что характерно для периодов сильных ионосферных возмущений. Максимальные значения TEC наблюдаются в полуденные часы, что соответствует периоду максимальной солнечной ионизации. Сравнительный анализ данных с множества подобных станций позволяет отследить пространственное распределение возмущений над территорией страны.

На рис. 4 приведены примеры работы алгоритма реконструкции полей концентрации электронов в ионосфере над территорией Европы во время геомагнитной бури 11 мая 2024 г.

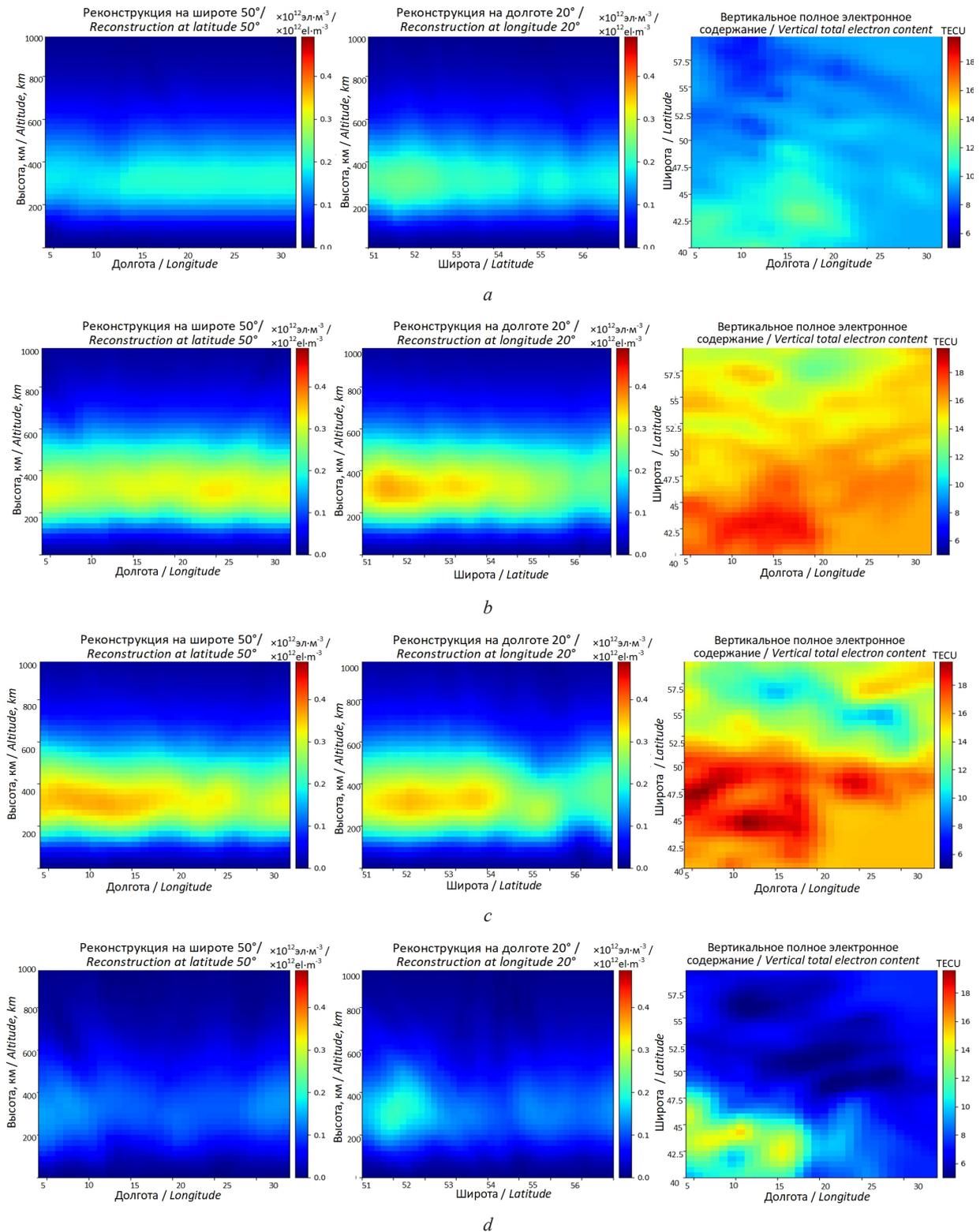


Рис. 4. Пример реконструкции распределения концентрации электронов в различные моменты времени 11 мая 2024 г. по данным спутников GPS и 100 станций EPN над территорией Европы: 08:00:00 (a); 12:00:00 (b); 16:00:00 (c); 20:00:00 (d)

Fig. 4. Example of electron concentration distribution reconstruction at different time points on May 11, 2024, based on GPS satellites data and 100 EPN stations over the territory of Europe: 08:00:00 (a); 12:00:00 (b); 16:00:00 (c); 20:00:00 (d)

для моментов 8:00, 12:00, 16:00, 20:00 UTC. Трехмерная реконструкция осуществлялась по результатам полного электронного содержания для 100 наземных станций EPN. Для обеспечения необходимого объема данных шаг дискретизации по времени выбирался равным 15 мин. Общее число трехмерных вокселей, на которые разбивалась ионосфера, равнялось 48 000 (число вокселей по широте, долготе и высоте – 40, 30 и 40 соответственно). Также на рис. 4 показаны примеры сечений реконструируемой области в двух плоскостях (в плоскости с постоянной широтой  $50^\circ$ , в плоскости с постоянной долготой  $20^\circ$ ), а также суммарное вертикальное полное электронное содержание, полученное суммированием реконструированного поля по вертикальным столбцам. В реконструированных распределениях хорошо виден характерный максимум электронной концентрации на высотах 300–400 км, что соответствует теоретическим представлениям о структуре ионосферы. Видно, в ионосфере возникают неоднородности – так как называемый ионосферный шторм, который наиболее сильно проявляется в 12:00 и 16:00 UTC.

Верификация разработанных программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным EPN заключалась в проверке устойчивости алгоритмов радиотомографии при различных уровнях зашумленности входных данных, а также в тестировании на модельных примерах с известным распределением электронной концентрации.

Проведенные экспериментальные исследования разработанных программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным сети EPN позволили получить ряд важных результатов.

1. Подтверждена работоспособность разработанных алгоритмов в условиях реальных измерений, в том числе при наличии сильных геомагнитных возмущений, что было продемонстрировано на примере данных за 11 мая 2024 г., когда магнитосфера Земли испытала сильнейшее возмущение в текущем столетии.

2. Разработанная методика обработки данных, включающая этапы структурирования, предварительной обработки, вычисления полного электронного содержания и трехмерной реконструкции, показала свою эффективность при работе с большими массивами данных от 100 станций сети EPN.

3. Полученные результаты реконструкции демонстрируют способность алгоритмов детально отслеживать динамику ионосферных процессов, включая формирование и развитие неоднородностей во время ионосферных штормов, что особенно четко проявилось в периоды максимального развития возмущений (12:00 и 16:00 UTC).

4. Визуализация результатов в различных сечениях доказала возможность получения детальной трехмерной картины распределения электронной концентрации в ионосфере.

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили практическую применимость и эффективность разработанных алгоритмов для решения задач радиотомографического мониторинга ионосферы в реальных условиях, включая периоды сильных геомагнитных возмущений.

**Заключение.** Представлены результаты экспериментальных исследований и верификации программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным европейской наземной системы EPN.

Основные результаты работы:

1. Разработаны и верифицированы программные средства, реализующие полный цикл обработки данных, включая: структурирование первичной информации; предварительную обработку с отбраковкой аномальных значений; вычисление полного электронного содержания; трехмерную реконструкцию ионосферы.

2. Экспериментально подтверждена эффективность разработанных алгоритмов в условиях сильных геомагнитных возмущений, что продемонстрировано на примере данных за 11 мая 2024 г. во время мощнейшей геомагнитной бури текущего столетия.

3. Показана возможность успешной реконструкции трехмерного распределения электронной концентрации в ионосфере с временным разрешением 15 мин на основе данных 100 станций сети EPN, включая 10 станций на территории Беларуси.

4. Реализована визуализация результатов в различных сечениях: в плоскостях постоянной широты и долготы; в виде суммарного вертикального полного электронного содержания.

5. Проведенная всесторонняя верификация программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере доказала достоверность получаемых результатов реконструкции; устойчивость алгоритмов к различным видам помех; корректность работы всех программных модулей в различных режимах.

6. Подтверждена способность алгоритмов детально отслеживать динамику ионосферных процессов, включая формирование и развитие неоднородностей во время ионосферных штормов.

Полученные результаты целесообразно использовать при мониторинге ионосферы для обеспечения надежной работы радиосистем; обнаружения ионосферных аномалий естественного и искусственного происхождения; прогнозирования природных явлений; повышения точности работы систем спутниковой навигации; улучшения качества радиосвязи в условиях геомагнитных возмущений.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование алгоритмов реконструкции и расширение функциональных возможностей разработанных программных средств.

### Список использованных источников

1. Куницын, В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. – М.: Физматлит, 2007. – 693 с.
2. Hofmann-Wellenhof, B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo, and More / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle. – Springer, 2008. – xxix, 516 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
3. Results of Studies on Processes Occurring in the Ionosphere and Earth's Magnetic Field Over the Territory of the Republic of Belarus for the Year 2023 / A. O. Naumov, P. A. Khmarski, G. A. Aronov, D. S. Kotov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2024. – Vol. 27, № 3. – P. 225–233. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13960570>
4. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena / E. L. Afraimovich, E. I. Astafyeva, V. V. Demyanov [et al.] // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2013. – Iss. 3. – Art. ID A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013049>
5. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems / E. Astafyeva, Yu. Yasyukevich, A. Maksikov, I. Zhivetiev // Space Weather. – 2014. – Vol. 12, Iss. 7. – P. 508–525. <https://doi.org/10.1002/2014SW001072>
6. Артемьев, В. М. Радиотомография поля концентрации электронов в ионосфере на основе фильтра Калмана / В. М. Артемьев, А. О. Наумов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2012. – № 2. – С. 86–92.
7. Способ оценивания спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов, А. М. Крот, С. В. Козлов [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>
8. Method and Results of Real Time Modeling of Ionosphere Radiotomography on the Basis of the Kalman Filter Theory / V. M. Artemiev, A. O. Naumov, V. L. Stepanov, N. I. Murashko // Journal of Automation and Information Sciences. – 2008. – Vol. 40, № 2. – P. 52–62. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v40.i2.50>
9. Yasyukevich, Yu. V. Advances in GNSS Positioning and GNSS Remote Sensing / Yu. V. Yasyukevich, B. Zhang, V. R. Devanaboyina // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 4. – Art. ID 1200. <https://doi.org/10.3390/s24041200>
10. Yasyukevich, Yu. V. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data / Yu. V. Yasyukevich, A. A. Mylnikova, A. S. Polyakova // Results in Physics. – 2015. – Vol. 5. – P. 32–33. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006>
11. Определение концентрации электронов в ионосфере над территорией Республики Беларусь по данным глобальных навигационных спутниковых систем (на англ. яз.) / А. О. Наумов, П. А. Хмарский, Н. И. Бышневу, Н. А. Петровский // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 53–64. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-64>
12. GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network / C. Bruyninx, J. Legrand, A. Fabian, E. Pottiaux // GPS Solutions. – 2019. – Vol. 23. – Art. ID 106. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0880-9>
13. Артемьев, В. М. Алгоритм и методика оптимизации его параметров для трехмерной реконструкции ионосферы / В. М. Артемьев, П. А. Хмарский, А. О. Наумов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2024. – № 1. – С. 42–52.
14. Methods and software for calculating total electronic content based on GNSS data / A. Naumov, P. Khmarskiy, N. Byshniou, M. Piatrouski // 7<sup>th</sup> Advanced Engineering Days, 1–2 July. 2023. Mersin, Türkiye. – 2023. – P. 158–160.
15. Methods and software for estimation of total electron content in ionosphere using GNSS observations / A. Naumov, P. Khmarskiy, N. Byshnev, M. Piatrouski // Engineering Applications. – 2023. – Vol. 2, № 3. – P. 243–253.
16. Regional integration of long-term national dense GNSS network solutions / A. Kenyeres, J. G. Bellet, C. Bruyninx [et al.] // GPS Solutions. – 2019. – Vol. 23, Iss. 4. – Art. ID 122. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0902-7>
17. EUREF's contribution to national, European and Global Geodetic Infrastructures / J. Ihde, H. Habrich, M. Sacher [et al.] // Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet: Proceedings of the IAG General Assembly, Melbourne, Australia,

June 28 – July 2, 2011 / eds.: C. Rizos, P. Willis. – Springer, 2014. – P. 189–196. – (Series: International Association of Geodesy Symposia; Vol. 139). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-37222-3\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37222-3_24)

18. Ignacio, R. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format Version 4.00. – Darmstadt: IGS/RTCM RINEX WG, 2021. – 120 p.

19. Khmarski, P. A. Algorithms for Three-Dimensional Reconstruction of Electron Concentration Fields in the Ionosphere using Data from the Global Navigation Satellite System / P. A. Khmarski, A. O. Naumov // 31<sup>st</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2024), 27–29 May 2024, Saint Petersburg, Russia: [Proceedings]. – St. Petersburg: State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2024. – P. 185–188. – URL: <http://www.elektropribor.spb.ru/upload/medialibrary/8cc/31-ICINS-2024-all.pdf> (date of access 21.01.2025).

## References

1. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreyeva E. S. *Ionospheric Radiotomography*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 693 p. (in Russian).
2. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo, and More*. Springer, 2008. xxix, 516 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
3. Naumov A. O., Khmarski P. A., Aronov G. A., Kotov D. S. Results of Studies on Processes Occurring in the Ionosphere and Earth's Magnetic Field Over the Territory of the Republic of Belarus for the Year 2023. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2024, vol. 27, no. 3, pp. 225–233. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13960570>
4. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., Edemskiy I. K., Gavriyuk N. S., Ishin A. B., Kosogorov E. A. [et al.]. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2013, iss. 3, art. ID A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013049>
5. Astafyeva E., Yasyukevich Yu., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems. *Space Weather*, 2014, vol. 12, iss. 7, pp. 508–525. <https://doi.org/10.1002/2014SW001072>
6. Artemyev V. M., Naumov A. O. Radiotomography of the electron concentration field in the ionosphere based on the Kalman filter. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2012, no. 2, pp. 86–92 (in Russian).
7. Belokonov I. V., Krot A. M., Kozlov S. V., Kaplarchuk E. A., Savinykh I. E., Shapkin A. S. A method for estimating the total electron content in the ionosphere based on the retransmission of signals from the global navigation satellite system GPS. *Informatika = Informatics*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 7–27 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>
8. Artemiev V. M., Naumov A. O., Stepanov V. L., Murashko N. I. Method and Results of Real Time Modeling of Ionosphere Radiotomography on the Basis of the Kalman Filter Theory. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2008, vol. 40, no. 2, pp. 52–62. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v40.i2.50>
9. Yasyukevich Y. V., Zhang B., Devanaboyina V. R. Advances in GNSS Positioning and GNSS Remote Sensing. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 4, art. ID 1200. <https://doi.org/10.3390/s24041200>
10. Yasyukevich Yu. V., Mylnikova A. A., Polyakova A. S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data. *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 32–33. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006>
11. Naumov A. O., Khmarskiy P. A., Byshnev N. I., Piatrouski M. A. Determination of total electron content in the ionosphere over the territory of the Republic of Belarus based on global navigation satellite systems data. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 53–64. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-6>
12. Bruyninx C., Legrand J., Fabian A., Pottiaux E. GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network. *GPS Solutions*, 2019, vol. 23, art. ID 106. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0880-9>
13. Artemyev V. M., Khmarskiy P. A., Naumov A. O. Algorithm and methodology for optimizing its parameters for three-dimensional reconstruction of the ionosphere. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika [Non-Destructive Testing and Diagnostics]*, 2024, no. 1, pp. 42–52 (in Russian).
14. Naumov A., Khmarskiy P., Byshniou N., Piatrouski M. Methods and software for calculating total electronic content based on GNSS data. 7<sup>th</sup> *Advanced Engineering Days, 1–2 July. 2023. Mersin, Türkiye*. 2023. P. 158–160.
15. Naumov A., Khmarskiy P., Byshnev N., Piatrouski M. Methods and software for estimation of total electron content in ionosphere using GNSS observations. *Engineering Applications*, 2023, vol. 2, no. 3, pp. 243–253.
16. Kenyeres A., Bellet J. G., Bruyninx C., Caporali A., Doncker F. de, Droscak B., Duret A. [et al.]. Regional integration of long-term national dense GNSS network solutions. *GPS Solutions*, 2019, vol. 23, iss. 4, art. ID 122. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0902-7>
17. Ihde J., Habrich H., Sacher M., Söhne W., Altamimi Z., Brockmann E., Bruyninx C. [et al.]. EUREF's contribution to national, European and Global Geodetic Infrastructures. Rizos C., Willis P. (eds.). *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet: Proceedings of the IAG General Assembly, Melbourne, Australia, June 28 – July 2, 2011. International Association of Geodesy Symposia : Vol. 139*. Springer, 2014, pp. 189–196. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-37222-3\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37222-3_24)
18. Ignacio R. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format Version 4.00. Darmstadt, IGS/RTCM RINEX WG, 2021. 120 p.
19. Khmarski P. A., Naumov A. O. Algorithms for Three-Dimensional Reconstruction of Electron Concentration Fields in the Ionosphere using Data from the Global Navigation Satellite System. 31<sup>st</sup> *Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2024), 27–29 May 2024, Saint Petersburg, Russia: [Proceedings]*. St. Petersburg, State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, pp. 185–188. Available at: <http://www.elektropribor.spb.ru/upload/medialibrary/8cc/31-ICINS-2024-all.pdf> (accessed 21 January 2025).