

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# ВЕСТНИК

ВИТЕБСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 (55)

ВИТЕБСК 2026

---

ISSN 2079-7958 (print)  
ISSN 2306-1774 (online)

MINISTRY OF EDUCATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS  
EDUCATIONAL INSTITUTION  
"VITEBSK STATE TECHNOLOGICAL UNIVERSITY"

# BULLETIN

## OF VITEBSK STATE TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

№ 1 (55)

VITEBSK 2026

### Редакционная коллегия:

Главный редактор – Кузнецов Андрей Александрович, д-р техн. наук, профессор

Заместитель главного редактора – Ванкевич Елена Васильевна, д-р экон. наук, профессор

Ответственный секретарь – Рыклин Дмитрий Борисович, д-р техн. наук, профессор

## Члены редакционной коллегии

### Технология материалов и изделий текстильной и легкой промышленности

- Редактор – Буркин А.Н., д-р техн. наук, профессор (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Рубаник В.В., д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси (ИТА НАН Беларуси, Республика Беларусь)
- Абрамович Н.А., канд. техн. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Башметов В.С., д-р техн. наук, профессор (Республика Беларусь)
- Гусаров А.М., канд. техн. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Дунина Е.Б., канд. физ.-мат. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Казарновская Г.В., канд. техн. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Киосев Й., д-р техн. наук, профессор (Дрезденский технический университет, Германия)
- Кирсанова Е.А., д-р техн. наук, профессор (РГУ им. А.Н. Косыгина, Российская Федерация)
- Коган А.Г., д-р техн. наук, профессор (Республика Беларусь)
- Корнилова Н.Л., д-р техн. наук, доцент (ИвГПУ, Российская Федерация)
- Милашиус Р., д-р техн. наук, профессор (Каунасский технологический университет, Литва)
- Ольшанский В.И., канд. техн. наук, профессор (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Панкевич Д.К., канд. техн. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Разумеев К.Э., д-р техн. наук, профессор (РГУ им. А.Н. Косыгина, Российская Федерация)
- Садовский В.В., д-р техн. наук, профессор (БГЭУ, Республика Беларусь)
- Ташпулатов С.Ш., д-р техн. наук, профессор (Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Республика Узбекистан)
- Шустов Ю.С., д-р техн. наук, профессор (РГУ им. А.Н. Косыгина, Российская Федерация)

### Химическая технология

- Редактор – Ясинская Н.Н., д-р техн. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Дормешкин О.Б., д-р техн. наук, профессор (БГТУ, Республика Беларусь)
- Дутчик В., научный сотрудник (Институт по исследованию полимеров, Германия)
- Корниенко А.А., д-р физ.-мат. наук, профессор (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Скобова Н.В., канд. техн. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Стёпин С.Г., канд. хим. наук, доцент (ВГМУ, Республика Беларусь)
- Труханов А.В., д-р физ.-мат. наук, заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Республики Беларусь (НАН Беларуси, Республика Беларусь)
- Шут В.Н., д-р физ.-мат. наук, профессор (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Щербина Л.А., канд. техн. наук, доцент (БГУТ, Республика Беларусь)

### Экономика

- Редактор – Яшева Г.А., д-р экон. наук, профессор (Республика Беларусь)
- Касаева Т.В., канд. техн. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Богдан Н.И., д-р экон. наук, профессор (БГЭУ, Республика Беларусь)
- Быков А.А., д-р экон. наук, профессор (БГЭУ, Республика Беларусь)
- Варшавская Е.Я., д-р экон. наук, профессор (НИУ «Высшая школа экономики», Российская Федерация)
- Зайцева О.В., канд. экон. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Коробова Е.Н., канд. экон. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Меньшиков В.В., д-р социол. наук, профессор (Даугавпилсский университет, Латвия)
- Нехорошева Л.Н., д-р экон. наук, профессор (БГЭУ, Республика Беларусь)
- Плахин А.Е., д-р экон. наук, доцент (УрГЭУ, Российская Федерация)
- Советникова О.П., канд. экон. наук, доцент (ВГТУ, Республика Беларусь)
- Шматко А.Д., д-р экон. наук, профессор (Институт проблем региональной экономики Российской академии наук, Российская Федерация)

Журнал включен в перечень научных изданий Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, в информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования», наукометрические базы Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, Open Academic Journals Index (OAJI), Index Copernicus International (ICI), China National Knowledge Infrastructure (CNKI), научную электронную библиотеку «КиберЛенинка».

Республика Беларусь, г. Витебск, Московский пр-т, 72, тел.: 8-0212-49-53-38.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.

**Editorial Board:**

*Editor-in-Chief* Andrei A. Kuzniatsou, Dr. Sc. (Eng), Professor  
*Deputy Editor-in-Chief* Alena V. Vankevich, Dr. Sc. (Econ), Professor  
*Executive secretary* Dzmitry B. Ryklin, Dr. Sc. (Eng), Professor

## Thematic Editors

### Technology of Materials and Products of Textile Industry and Consumer Goods Industry

- Editor Alexander N. Burkin, Dr. Sc. (Eng), Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Vasili V. Rubanik, Dr. Sc. (Eng), Professor, Corresponding Member of the NAS of Belarus (Institute of Technical Acoustics of Belarus NAS, Republic of Belarus)
- Natallia A. Abramovich, Cand. Sc. (Eng), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Valery S. Bashmetau, Dr. Sc. (Eng), Professor (Republic of Belarus)
- Aliaksei M. Husarau, Cand. Sc. (Eng), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Elena B. Dunina, Cand. Sc. (Phys.-Mat), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Galina V. Kazarnovskaya, Cand. Sc. (Eng), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Yordan Kyosev, Dr. Sc. (Eng), Professor (Hochschule Niederrhein, Germany)
- Elena A. Kirsanova, Dr. Sc. (Eng), Professor (Russian State University named after A.N. Kosygin, Russian Federation)
- Aleksander G. Kogan, Dr. Sc. (Eng), Professor (Republic of Belarus)
- Nadezhda L. Kornilova, Dr. Sc. (Eng), Associate Professor (Ivanovo State Polytechnic University, Russian Federation)
- Rimvydas Milašius, Dr. Sc. (Eng), Professor (Kaunas University of Technology, Lithuania)
- Valery I. Alshanski, Cand. Sc. (Eng), Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Darya K. Pankevich, Cand. Sc. (Eng), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Konstantin E. Razumeev, Dr. Sc. (Eng), Professor (Russian State University named after A.N. Kosygin, Russian Federation)
- Victor V. Sadovski, Dr. Sc. (Eng), Professor (BSEU, Republic of Belarus)
- Salikh S. Tashpulatov, Dr. Sc. (Eng), Professor (Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Uzbekistan)
- Yuriy S. Shustov, Dr. Sc. (Eng), Professor (Russian State University named after A.N. Kosygin, Russian Federation)

### Chemical Engineering

- Editor Natallia N. Yasinskaya, Dr. Sc. (Eng), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Oleg B. Dormeshkin, Dr. Sc. (Eng), Professor (BSTU, Republic of Belarus)
- Victoria Dutschk, Researcher (The Institute of Polymer Research, Dresden, Germany)
- Alexey A. Kornienko, Dr. Sc. (Phys.-Mat), Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Natallia V. Skobova, Cand. Sc. (Eng), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Svjatoslav G. Stepin, Cand. Sc. (Chem), Associate Professor (VSMU, Republic of Belarus)
- Aleksey V. Trukhanov, Dr. Sc. (Phys.-Mat), Deputy Chairman of the Presidium of the NAS of Belarus (NAS of Belarus, Republic of Belarus)
- Victor N. Shut, Dr. Sc. (Phys.-Mat), Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Leonid A. Shcherbina, Cand. Sc. (Eng), Associate Professor (BSUFT, Republic of Belarus)

### Economics

- Editor Galina A. Yasheva, Dr. Sc. (Econ), Professor (Republic of Belarus)
- Tamara V. Kasayeva, Cand. Sc. (Eng), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Nina I. Bohdan, Dr. Sc. (Econ), Professor (BSEU, Republic of Belarus)
- Aliaksei A. Bykau, Dr. Sc. (Econ), Professor (BSEU, Republic of Belarus)
- Elena Ya. Varshavskaya, Dr. Sc. (Econ), Professor (National Research University "Higher School of Economics", Russian Federation)
- Olga V. Zaitseva, Cand. Sc. (Econ), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Alena N. Korabava, Cand. Sc. (Econ), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Vladimir V. Menshikov, Dr. Sc. (Soc), Professor (Daugavpils University, Latvia)
- Lyudmila N. Nekhorosheva, Dr. Sc. (Econ), Professor (BSEU, Republic of Belarus)
- Andrey E. Plakhin, Dr. Sc. (Econ), Associate Professor (Ural State Economic University, Russian Federation)
- Olga P. Sovetnikova, Cand. Sc. (Econ), Associate Professor (VSTU, Republic of Belarus)
- Alexey D. Shmatko, Dr. Sc. (Econ), Professor (Institute for Regional Economic Studies RAS, Russian Federation)

The journal is registered in the Belarus Higher Attestation Commission Catalogue of scientific publications on results of dissertation research, and indexed in the National information Analysis System "Russian Science Citation Index", Google Scholar, Erich Plus, Ulrich's Periodicals Directory, Open Academic Journals Index (OAJI), Index Copernicus International (ICI), China National Knowledge Infrastructure (CNKI), the CyberLeninka scientific electronic library.

Republic of Belarus, Vitebsk, Moscovsky pr, 72, tel.: 8-0212-49-53-38.

Certificate of State Registration of the publisher, producer, and distributor of printed media No. 1/172 issued on February 12, 2014.

Certificate of State Registration of the publisher, producer, and distributor of printed media No. 3/1497 issued on February 30, 2017.

# СОДЕРЖАНИЕ

## Технология материалов и изделий текстильной и легкой промышленности

- Сафонов П. Е., Левакова Н. М., Пивкина С. И.**  
Разработка оптимальных структур текстильных материалов с заданной стойкостью при проколе ..... 9
- Фурашова С. Л., Милюшкова Ю. В.**  
Влияние тепловой обработки на показатели релаксации искусственных кож для верха обуви ..... 25
- Марущак Ю. И., Петюль И. А., Ясинская Н. Н., Башметов В. С.**  
Применение теории простых чисел в построении комплексного показателя качества текстильных материалов с полимерным покрытием ..... 38
- Ивашко Е. И., Буркин А. Н.**  
Влияние температуры воздуха и многоциклового изгиба на уровень водонепроницаемости мембранных текстильных материалов ..... 48
- Марущак Ю. И., Ясинская Н. Н., Бизюк А. Н., Кузнецов А. А.**  
Моделирование и прогнозирование потребительских свойств тканей с полиуретановым покрытием ..... 57

## Химическая технология

- Шут В. Н., Кузнецов А. А., Мозжаров С. Е., Толочко Н. К., Кабанова А. А.**  
Дентальные имплантаты, полученные методом селективного лазерного спекания-плавления ..... 68
- Щербина Л. А., Радковский И. С., Будкуте И. А.**  
Термохимическое поведение полиакрилонитрильных волокон, модифицированных высокодисперсными материалами ..... 75

## Экономика

- Ванкевич Е. В., Калиновская И. Н.**  
Онлайн-ландшафт рынка труда Республики Беларусь: результаты сравнительной оценки основных участников ..... 87
- Берестень И. В., Ревяко К. В., Ерофеева О. Н.**  
Феномен NEET-молодежи: особенности распространения и факторы формирования (межстрановой количественный анализ) ..... 103

<b>Карпенко В. М., Пан Цзыхань</b> Управление качеством жизни населения Китая на основе метода DEA-SBM и индекса Мальмквиста-Люенбергера .....	121
<b>Касаева Т. В., Жихар Ю. Ю.</b> Информационное обеспечение и инструменты оценки уровня цифрового развития организации.....	133
<b>Алексеева Е. А., Шеремет О. О.</b> Оценка влияния конкурентоспособности рабочей силы на устойчивое развитие региона.....	148
<hr/>	
ПАМЯТКА АВТОРАМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК ВИТЕБСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА» .....	159
ОФОРМЛЕНИЕ ССЫЛОК НА ИСТОЧНИКИ И СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	162

# CONTENTS

## Technology of Materials and Products of Textile Industry and Consumer Goods Industry

- Pavel E. Safonov, Natalia M. Levakova, Svetlana I. Pivkina**  
Development of optimal structures of textile materials with preset puncture resistance ..... 9
- Svetlana L. Furashova, Yuliya V. Miliushkova**  
The effect of heat treatment on the relaxation rates of artificial leather for shoe upper ..... 25
- Yulia I. Maruschak, Irina A. Petyul, Natallia N. Yasinskaya, Valery S. Bashmetov**  
Application of the theory of prime numbers in constructing a comprehensive quality indicator for textile materials with a polymer coating..... 38
- Katsiaryna I. Ivashko, Alexander N. Burkin**  
Influence of air temperature and multi-cycle bending on the level of waterproofness of membrane textile materials..... 48
- Yulia I. Maruschak, Natallia N. Yasinskaya, Andrey N. Bizyuk, Andrey A. Kuznetsov**  
Modeling and forecasting consumer properties of fabrics with polyurethane coating..... 57

## Chemical Engineering

- Victor N. Shut, Andrey A. Kuznetsov, Sergey E. Mozzharov, Nicolay K. Tolochko, Arina A. Kabanova**  
Dental implants made by selective laser sintering-melting method ..... 68
- Leonid A. Shcherbina, Ivan S. Radkovsky, Iryna A. Budkute**  
Thermochemical behavior of polyacrylonitrile fibers modified with highly dispersed materials ..... 75

## Economics

- Alena V. Vankevich, Iryna N. Kalinouskaya**  
The online landscape of the labor market of the Republic of Belarus: the results of the comparative assessment of the main participants ..... 87
- Ivan V. Beresten', Kiryl V. Reviaka, Aksana N. Yerafeyeva**  
The NEET-youth phenomenon: peculiarities of prevalence and factors of formation (a cross-country quantitative analysis) ..... 103
- Valeri M. Karpenka, Pan Zihan**  
Quality of life management in China based on the DEA-SBM method and the Malmquist-Luenberger index..... 121

**Tamara V. Kasayeva, Yulia Yu. Zhikhar**  
Information support and tools for assessing the level of digital development  
of an organization..... 133

**Alena A. Aliakseyeva, Olga O. Sheremet**  
Assessment of the impact of labor force competitiveness on the sustainable development  
of a region..... 148

---

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS OF JOURNAL  
"BULLETIN OF STATE TECHNOLOGICAL UNIVERSITY" .....159

PREPARATION OF LINKS TO SOURCES AND A LIST OF REFERENCES.....162

## Разработка оптимальных структур текстильных материалов с заданной стойкостью при проколе

П. Е. Сафонов<sup>1</sup>,  
Н. М. Левакова<sup>1</sup>,  
С. И. Пивкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ТЕКС-ЦЕНТР», Российская Федерация

<sup>2</sup>Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство), Российская Федерация

**Аннотация.** Работа посвящена проектированию оптимальных структур, выбору сырьевого состава и разработке технологии изготовления современных материалов (тканей и трикотажных полотен) с заданной устойчивостью при проколе. Спроектированные материалы нашли применение при изготовлении защитной экипировки фехтовальщиков (куртки, набочки, воротники масок), так как соответствуют основным требованиям Международной Федерации фехтования (FIE) и обладают совокупностью таких полезных качеств, как гибкость, заданная поверхностная плотность, относительно малая толщина, устойчивость к многократным мокрым обработкам без ухудшения потребительских свойств.

Для изготовления тканей с сопротивлением проколу не менее 350 Н предложено использовать высокопрочные комплексные полиэфирные нити, а для изготовления трикотажных полотен с сопротивлением проколу не менее 800 Н – нити СВМПЭ (сверхвысокомолекулярный полиэтилен) в сочетании с высокоэластичными текстурированными нитями. Все спроектированные структуры тканей и трикотажа предложено изготавливать двухслойными переплетениями.

В рамках проведенной работы установлена взаимосвязь между круткой и показателями физико-механических свойств нитей СВМПЭ, определена оптимальная величина крутки для нитей СВМПЭ 44 и 66 текс.

Установлено, что оптимальное соотношение высот волн изгиба основы и утка в слоях ткани должно стремиться к 1, в противном случае нити основы и утка не будут участвовать в работе деформирования одновременно, что приведет к разрушению нитей одной из систем и вытягиванию и раздвижке без разрушения нитей другой системы.

Установлено, что из нитей СВМПЭ целесообразно вязать защитные трикотажные полотна, а не ткать традиционные ткацкие структуры, что обусловлено специфическим сочетанием свойств СВМПЭ – сверхвысокая прочность и низкий коэффициент трения.

**Ключевые слова:** защитные материалы, стойкость при проколе, двухслойные переплетения, СВМПЭ.

**Информация о статье:** поступила 5 февраля 2026 года.

Статья подготовлена по материалам доклада Международной научно-технической конференции «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2025)», которая состоялась 18–19 ноября 2025 года в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» (Республика Беларусь).

## Development of optimal structures of textile materials with preset puncture resistance

Pavel E. Safonov<sup>1</sup>,  
Natalia M. Levakova<sup>1</sup>,  
Svetlana I. Pivkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TEKS-CENTRE Ltd., Russian Federation

<sup>2</sup>A.N. Kosygin Russian State University (Technology, Design, Art),  
Russian Federation

**Abstract.** The research is devoted to the design of optimal structures, the choice of raw materials and the development of manufacturing technology for contemporary materials (fabrics and knitted fabrics) with preset puncture resistance. The designed materials are applied in the manufacture of protective equipment for fencers (jackets, side pads, mask collars), as they meet the basic requirements of the International Fencing Federation (FIE) and possess a set of useful qualities such as flexibility, specified surface density, relatively small thickness, resistance to repeated wet treatments without deterioration of consumer properties.

For the manufacture of fabrics with a puncture resistance of at least 350 N, it is proposed to use high-strength polyester threads, and for the manufacture of knitted fabrics with a puncture resistance of at least 800 N, UHMWPE (Ultra high

molecular weight polyethylene) threads in combination with highly stretchable textured yarns. All the designed structures of fabrics and knitwear are proposed to be made with two-layer weaves.

As part of the work carried out, the relationship between the twist and the indicators of the physical and mechanical properties of UHMWPE threads was determined, and the optimal amount of twist for UHMWPE threads 44 and 66 tex was calculated.

It has been found that the optimal ratio of the bending wave heights of the warp and weft in the fabric layers should tend to 1, otherwise the warp and weft threads will not participate in the deformation process at the same time, which will lead to the destruction of the threads of one of the systems and stretching and sliding without destroying the threads of the other system.

It has been established that it is advisable to knit protective knitted fabrics from UHMWPE threads rather than weaving traditional weaving structures, which is due to a specific combination of UHMWPE properties – ultra-high strength and low coefficient of friction.

**Keywords:** protective materials, puncture resistance, double-layer weaves, UHMWPE.

**Article info:** received February 5, 2026.

The article summarizes the research materials presented at the International Scientific and Technical Conference "International Conference on Textile and Apparel Innovation" (ICTAI-2025), held on November 18–19, 2025 at Vitebsk State Technological University (Republic of Belarus).

### Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью импортозамещения современных текстильных материалов, применяемых в защитной экипировке спортсменов фехтовальщиков (Сафонов, Левакова, Юхин, Пивкина и Фомина, 2025). Материалы фехтовальных костюмов (куртка, набочник) должны обеспечивать заданную устойчивость при проколе в совокупности с такими свойствами, как легкость движений, необходимых для занятий фехтованием (что предполагает хорошую драпируемость ткани при сравнительно малой толщине и поверхностной плотности), устойчивость к многократным мокрым обработкам (стирки), при этом верх экипировки должен быть белого или светлого цвета.

Требования, предъявляемые к материалам фехтовальной экипировки, регламентированы Международной Федерацией фехтования (Federation Internationale d'Escrime, далее FIE), а также Международной Федерацией спорта инвалидов-колясочников и ампутантов (International Wheelchair and Amputee Sports Federation, далее IWAS)<sup>1</sup>. Российская Федерация в приказе Минспорта № 873 от 30.11.2020 г. полностью признает, что требования к экипировке, соответствующей регламенту FIE, являются обязательными.

<sup>1</sup> Международные правила проведения соревнований по фехтованию (elpn.ru): <https://elpn.ru/f/pravilapofekhtovaniyu.pdf?ysclid=lu9fipe5dz702476012> (дата обращения 17.12.2025).

### Аналитический обзор

При анализе литературных источников, посвященных вопросам создания материалов с повышенным сопротивлением при проколе, установлено, что в соответствии с регламентом FIE одежда спортсмена должна быть сделана из ткани, имеющей сопротивление проколу 800 Н (350 Н для детско-юношеского разряда и тренировочных костюмов), при этом особое внимание должно быть уделено выполнению швов в области подмышечной впадины, при их наличии. Данное требование распространяется на соревнования во всех видах оружия. При этом снаряжение и одежда спортсмена не должны содержать какие-либо петли или отверстия, при попадании в которые конец оружия соперника мог бы быть задержан или отклонен. Материал, из которого выполняется снаряжение, не должен иметь скользкой поверхности, которая могла бы вызвать скольжение наконечника, а судейство уколов должно быть легким.

В Правилах FIE отмечается, что одежда фехтовальщика может быть различных цветов, но туловище должно быть белого или светлого цвета, это важное требование, так как оно накладывает ограничения на использование в качестве материала верха куртки некоторых современных специальных высокопрочных волокон и нитей, например параарамидных.

Из сформулированных выше требований видно, что конкретные нормы устанавливаются только на сопротивление проколу материалов – 350 и 800 Н. Отсутству-

ют конкретные требования по структуре, толщине, поверхностной плотности, жесткости на изгиб, количеству и виду санитарных обработок, что осложняет процесс проектирования данных материалов и делает необходимым анализ существующих решений в данной области.

Из патента РФ 2113566 (Керимов, Попов, Абрамчук, Курмашова и Харченко, 1998) известна ткань, которая может быть использована для пошива одежды фехтовальщиков: спортивных костюмов, защитных набочников, тренировочных нагрудников. Ткань вырабатывается креповым переплетением, образованным путем комбинации двух репсовых переплетений (репс основной 2/2 и репс уточный 2/2). Переплетение образуется способом смещения базовых переплетений относительно друг друга одновременно по горизонтали и вертикали.

Известна ткань «кольчуга» (Керимов, Попов, Курмашова, Мокеев и Харченко, 1999) выполненная мелкозорчатым однослойным переплетением с числом нитей в раппорте равным шести. Ткань может быть выполнена из синтетических нитей, например, параарамидных, полиэфирных нитей или полиэтиленовых нитей.

По мнению авторов (Керимов, Попов, Курмашова, Мокеев и Харченко, 1999) предложенное чередование нитей в раппорте ткани с наполнением до 170 %, позволяет обеспечить поверхностную плотность на уровне 280–320 г/м<sup>2</sup>, жесткость на изгиб 1,4–1,5 гс/см<sup>2</sup>, воздухопроницаемость 82–86 дм<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с, толщину 0,6 мм. Устойчивость на прокол при использовании в ткани полиэфирных комплексных нитей составляет 475 Н, а при использовании полиэтиленовых нитей 820 Н.

Ткань, предложенная в патенте РФ 2137868 имеет малую толщину и чрезвычайно высокое наполнение, что делает ее структуру крайне жесткой и плохо драпируемой.

Из патента US20180163329A1 (Mingfu, Chao, 2017) известно высокопрочное трикотажное полотно для защитной одежды фехтовальщиков, где в качестве исходного сырья используются волокна сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) линейной плотности 40–46,7 текс и высокопрочные полиэфирные нити линейной плотности 51,1–60 текс. Полотно имеет устойчивость при проколе 3300 Н при поверхностной плотности 600 г/м<sup>2</sup>.

Как видно из патента US20180163329A1 трикотажные полотна, связанные из СВМПЭ нитей удовлетворяют требованиям FIE и являются альтернативой тканым структурам.

Из публикаций (Yang, Cui, Wang, Xing, 2025; Платонов, 2020) известно о применении СВМПЭ нитей для создания материалов для баллистической защиты, и защиты при самообороне и при занятиях боевыми искусствами. В работе (Yang, Cui, Wang, Xing, 2025) СВМПЭ нити используются для получения нетканых панелей (жестких ламинатов), пропитанных смолой, а в работе (Платонов, 2020) СВМПЭ нити используются для вязания трикотажа с толщиной от 0,9 до 1,5 мм и весом от 200 г/м до 650 г/м.

К недостаткам трикотажных полотен можно отнести их большую растяжимость при деформировании и большой удельный вес в сравнении с тканями при прочих равных условиях, что обусловлено существенно большей длиной нити в петле трикотажа по сравнению с длиной нити в элементе ткани.

В патенте US5514457A (Fels, Brustmann, Schuster, 1996) предлагается изготавливать защитные текстильные структуры (ткани, трикотаж, плетеные изделия), предназначенные для использования в одежде, защищающей от прокола, порезов, осколков и пуль, из армированных нитей с внутренним высокопрочным сердечником и оболочкой из пряжи на основе натуральных или искусственных волокон, что позволяет облегчить крашение и печать данных полотен.

Недостатком такой однослойной ткани является повышенная жесткость и осыпаемость толстых нитей при крае ткани.

В патенте РФ 2240713С2 (Чиоу, 2004) предлагается многослойный пакет из тканей, защищающий от воздействия ударов ножом. Многослойный пакет выполняется без специальных связующих и имеет поверхностную плотность 3,0 кг/м<sup>2</sup>. Ткань слоев изготовлена из комплексных нитей (например, арамид, полиолефины, полибензоксазол, полибензотиазол и из их комбинаций), имеющих прочность 10 гс/дтекс, коэффициент плотности ткани должен быть от 0,2 до 0,65, что обеспечивает улучшенную стойкость к пробиванию лезвием ножа.

Недостатком изобретения является повышенный вес защитных пакетов, что не позволяет использовать их при занятиях спортом.

В патенте РФ 2666217С2 (Там, Бун, Батнагар, 2018) приводятся сведения о том, что композиты на основе нетканых структур (так называемые одно- или многонаправленные UD-структуры), в которых нити располагаются в каком-то одном или нескольких направлениях не переплетаясь друг с другом, будучи скреплены тем

или иным способом (горячее прессование, склеивание, дублирование), лучше останавливают высокоскоростные поражающие элементы, чем композиты на основе традиционных тканей, так как армирующие нити в данных нетканых полотнах не имеют изгиба. Придание изгиба нитям в традиционной ткани снижает их способность работать на растяжение и мгновенно поглощать энергию высокоскоростного поражающего элемента, что снижает их эффективность.

При этом авторы [Там, Бун, Батнагар, 2018] утверждают, что композиты на основе традиционных тканых структур демонстрируют лучшую стойкость к проколу, в отличие от нетканых структур, так как структура ткани с пересечениями и изгибом нитей создает довольно высокое трение, что имеет решающее значение при прокалывании. Стойкие к проколу изделия на основе тканей требуют очень высокой плотности нитей по основе и утку для того, чтобы при ударе не происходило смещения нитей.

Известен материал верха куртки от лидера мирового рынка фехтовальной экипировки компании Allstar (Германия). Анализ материала костюма Allstar показал, что верх куртки представляет собой двухслойное трикотажное полотно из нитей СВМПЭ 48 текс 70 кр./м на лицевой стороне и текстурированных полиамидных нитей 26 текс на изнаночной стороне, соединение слоев осуществляется с помощью текстурированных полиамидных нитей 12,6 текс. Поверхностная плотность трикотажного полотна 733,5 г/м<sup>2</sup>, толщина при давлении на пробу 19 кПа: 1,56 мм, усилие при проколе 877 Н при прогибе образца 22 мм.

Таким образом, из приведенных выше литературных источников видно, что для создания современных материалов с повышенной устойчивостью к проколам и порезам нашли применение нити на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. При этом особый интерес могут представлять многослойные структуры с различной комбинацией нитей в слоях.

### **Выбор сырьевого состава и проектирование защитных структур тканей**

Как подчеркивалось ранее, основной проблемой создания эффективных защитных текстильных структур является неполная реализация свойств нитей [Сафонов, 2025]. Главными причинами неполной реализации свойств высокопрочных и высокомодульных нитей в материале являются, во-первых, снижение механических свойств нитей в процессе переработки (перемотка,

снование, ткачество), во-вторых, особенности строения полотна: вид переплетения, степень изгиба нитей в структурном элементе, длина основных и уточных перекрытий и т. д.

Таким образом, задача проектирования оптимального защитного материала сводится к выбору исходного сырья, разработке щадящих режимов его переработки по всем переходам производства и выбора текстильной структуры, в которой нити всех систем будут участвовать в деформировании полотна максимально полезно (одновременно).

Для изготовления тканей с повышенным сопротивлением проколу предложено использовать высокопрочные полиэфирные нити с относительной разрывной нагрузкой на уровне 60–70 сН/текс, нити СВМПЭ с относительной разрывной нагрузкой на уровне 280–300 сН/текс и высокоэластичные текстурированные нити, которые предлагается вводить в структуру ткани в ограниченном количестве для обеспечения лучших усадочных свойств в процессе отделки и лучшего сцепления нитей при проколе ткани.

К преимуществам полиэфирных и СВМПЭ нитей относится то, что они обладают естественным белым цветом (одно из требований FIE), устойчивы к истиранию и многократным изгибам, устойчивы к УФ-излучению, обладают минимальным влагопоглощением по сравнению с параарамидными нитями и современными нитями на основе жидкокристаллических полимеров [Шкуренко, Галицын и Соколов, 2022; Перепелкин, 2009].

Исследуем более подробно основные физико-механические свойства выбранных нитей, в особенности СВМПЭ. Нити СВМПЭ выпускаются в некрученом виде, что существенно осложняет процесс их текстильной переработки. Поэтому возникает необходимость выбора оптимальной величины крутки, которая с одной стороны позволит с минимальными повреждениями переработать нить, а с другой стороны позволит реализовать полезные свойства нити при воздействии поражающего элемента.

На рисунке 1 представлены фотографии исходной некрученой и крученой на 70 кр./м нити СВМПЭ 66 текс. Видно, что придание нити СВМПЭ крутки позволяет сделать ее более компактной и пригодной для текстильной переработки.

На рисунке 2 представлены диаграммы деформирования нити СВМПЭ с различной величиной крутки. Установлено, что с увеличением крутки наблюдается увели-

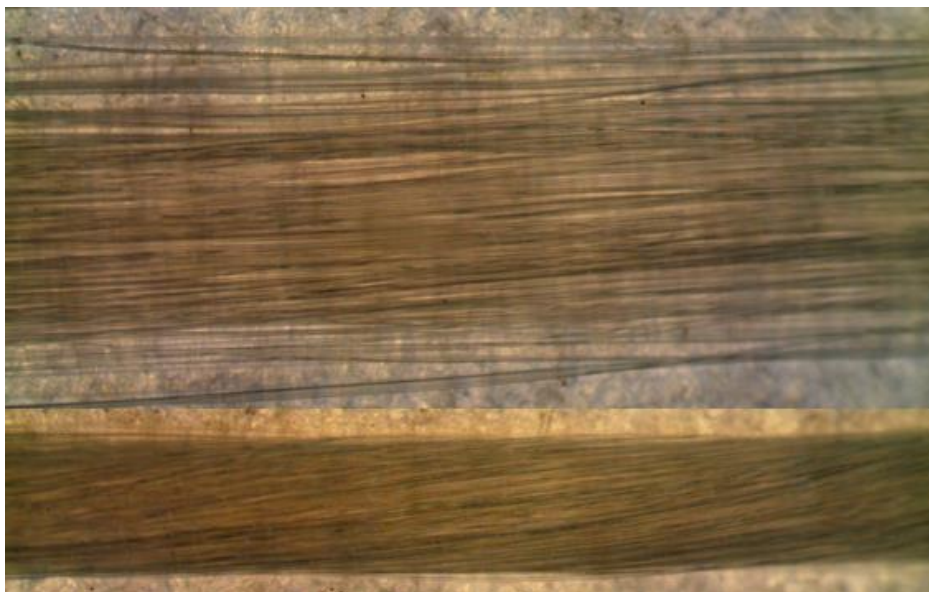


Рисунок 1 – Внешний вид нити СВМПЭ 66 текс до и после кручения  
Figure 1 – View of UHMWPE thread 66 tex before and after twisting

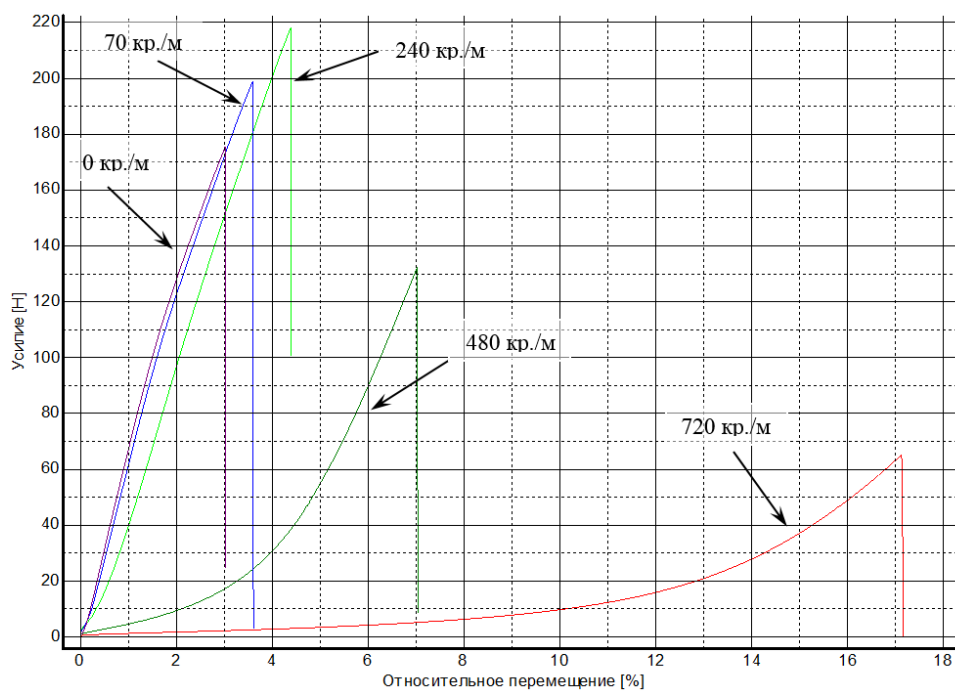


Рисунок 2 – Изменение характера диаграмм растяжения нити СВМПЭ 66 текс  
при различной величине крутки  
Figure 2 – Changing features stretching diagrams of the UHMWPE thread 66 tex at different twist values

чение разрывной нагрузки нити, но до определенного предела (до критической крутки), который, в данном примере, составил 240 кр./м.

После превышения величины критической крутки наблюдается резкое снижение разрывной нагрузки (рисунок 3), что связано со значительным перенапряжением нити в поперечном направлении. При этом удли-

нение нити при разрыве продолжает увеличиваться (рисунок 4).

В таблице 1 представлены значения показателей физико-механических свойств некрученных и крученных СВМПЭ нитей, выбранных для исследования. В качестве оптимальной крутки для нитей СВМПЭ линейной плотности 44 и 66 текс выбрана крутка 120 и 70 кр./м,

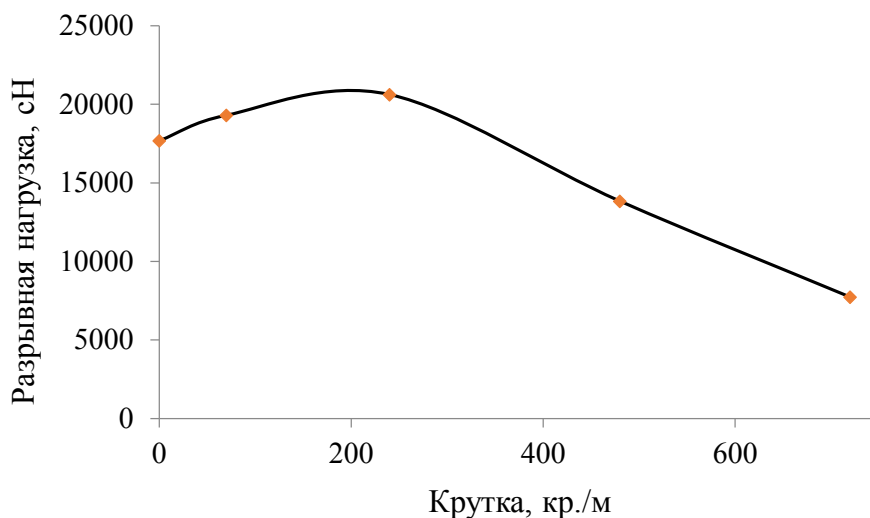


Рисунок 3 – Зависимость разрывной нагрузки нити СВМПЭ 66 текс от величины крутки  
Figure 3 – Dependence of the breaking load of a UHMWPE thread 66 tex on the twist value

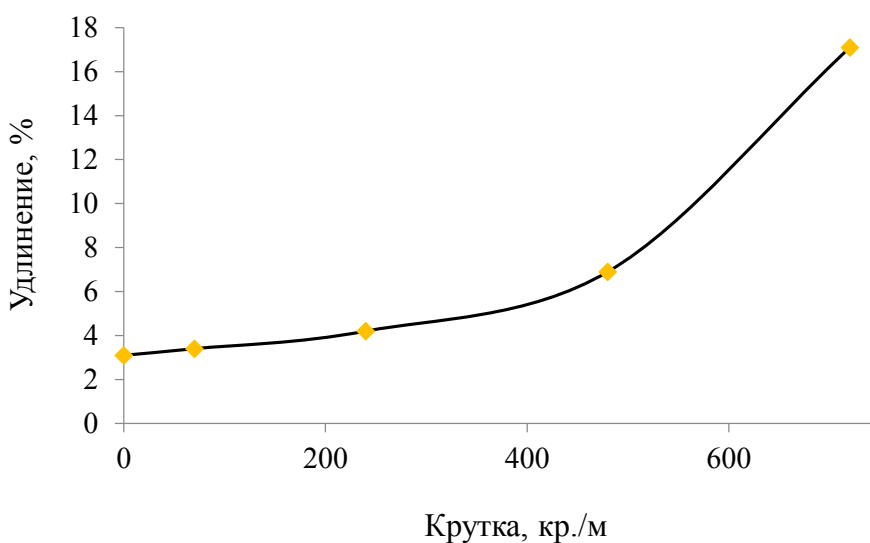


Рисунок 4 – Зависимость разрывного удлинения нити СВМПЭ 66 текс от величины крутки  
Figure 4 – Dependence of the breaking elongation of a UHMWPE thread 66 tex on the twist value

Таблица 1 – Значения показателей физико-механических свойств некрученых и крученых СВМПЭ нитей  
Table 1 – Values of the physical-mechanical properties of non-twisted and twisted UHMWPE threads

Наименование показателя свойств	Наименование нити			
	УHMWPF СВМПЭ 44 текс	УHMWPF СВМПЭ 66 текс	УHMWPF СВМПЭ 44 текс	УHMWPF СВМПЭ 66 текс
Линейная плотность, текс	46,1	66,8	45,3	68,6
Отклонение фактической линейной плотности от номинальной, %	+4,8	+1,2	+3,0	+3,9
Коэффициент вариации по линейной плотности, %	2,0	2,3	1,6	2,8
Крутка нити, кр./м	0	0	100	70
Коэффициент крутки, отн. ед.	-	-	21,3	18,3
Тангенс угла наклона витков крученой нити, град.	-	-	31,8	30,2
Диаметр крученой нити, мм	-	-	0,56	0,76
Разрывная нагрузка нити, сН	12892,6	18771,8	13136,7	20075,8
Относительная разрывная нагрузка, сН/текс	279,7	281,0	290,0	292,7
Коэффициент вариации по разрывной нагрузке, %	2,3	9,4	5,3	7,5
Удлинение нити при разрыве, %	3,4	2,9	3,6	3,3
Коэффициент вариации по удлинению, %	4,1	12,4	6,0	8,2
Модуль упругости при $\epsilon = 1\%$ , ГПа	110,4	115,6	91,4	101,3
Удельная работа разрыва, Дж/г	52,6	46,3	58,7	53,3
Содержание замасливателя, %	0,04	0,03	-	-

соответственно, что соответствует величине коэффициента крутки 21,3 и 18,3, и тангенсу угла наклона витков на уровне 30–32 градусов.

Поясним некоторые использованные выше понятия. При уменьшении крутки комплексной нити происходит уменьшение тангенса угла наклона витков периферийных элементарных нитей (филаментов). При этом тангенс угла кручения рассчитывается по формуле:

$$\tan \beta = \frac{\alpha_k}{89,6\sqrt{\delta_n}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_k$  – безразмерный коэффициент крутки;  $\delta_n$  – объемная плотность нити, мг/мм<sup>3</sup>.

Коэффициент крутки нити характеризует интенсивность скручивания нитей различной линейной плотности и определяется из соотношения:

$$\alpha_k = K \cdot \sqrt{\frac{T}{1000}}, \quad (2)$$

где  $K$  – величина крутки нити, кр./м;  $T$  – линейная плотность нити, текс.

Объемная плотность нити в г/см<sup>3</sup> или мг/мм<sup>3</sup>:

$$\delta_n = \frac{1,27 \cdot T}{1000 \cdot d^2}, \quad (3)$$

где  $T$  – линейная плотность нити, текс;  $d$  – диаметр нити, мм.

Таким образом, защитную ткань предлагается изготавливать из нитей основы и утка с коэффициентом крутки порядка 20 единиц и тангенсом угла наклона витков порядка 30 градусов.

Зная фактический диаметр крученой нити (на основании анализа микрофотографий, рисунок 1) можно определить значения коэффициента  $C$ , характеризующего волокнистый состав и структуру нити:

$$d = 0,1C\sqrt{0,1T}. \quad (4)$$

Для СВМПЭ нити получим значение  $C = 2,6-2,9$ , для сравнения комплексная крученая полиэфирная нить соизмеримой линейной плотности имеет  $C = 1,6-1,7$ . Таким образом, нити СВМПЭ обладают повышенной объемной плотностью в сравнении с традиционными нитями. Объемная плотность СВМПЭ нити составляет  $0,15-0,18 \text{ г/см}^3$ , что больше в 2,5–3 раза, чем у полиэфирной нити –  $0,46 \text{ г/см}^3$ .

Далее были спроектированы две структуры защитных тканей с повышенной устойчивостью при проколе. Спроектированные ткани предлагается изготавливать двухслойными переплетениями:

1) спроектирована полиэфирная ткань с расчетной поверхностной плотностью  $470 \text{ г/м}^2$ . Ткань предлагается изготавливать двухслойным переплетением с прижимными нитями утка, где в качестве прижимных нитей предлагается использовать текстурированные высокоэластичные полиамидные нити эластик, на рисунке 5 представлен фрагмент схемы расположения основных и уточных нитей в ткани, где: П1...П4 – прижимной уток. В качестве базового переплетения верхнего и нижнего слоя выбран неправильный четырехремизный сатин,

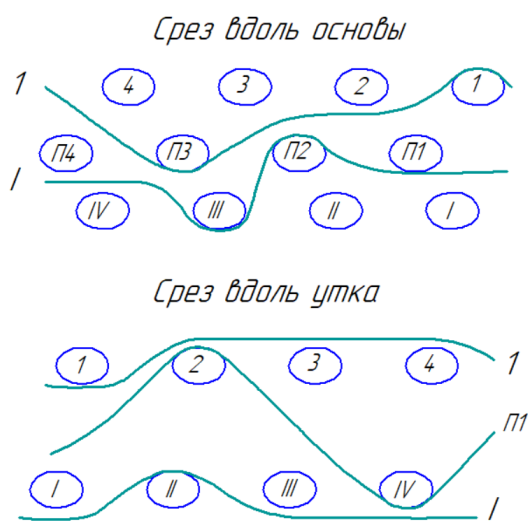


Рисунок 5 – Расположение нитей основы и утка в структуре двухслойной ткани с прижимными нитями утка  
Figure 5 – The arrangement of warp and weft threads in a two-layer fabric with pressed weft threads

соотношение верхней и нижней основ 1:1, соотношение верхнего, нижнего и прижимного утка 1:1:1;

2) спроектирована ткань из СВМПЭ нитей (44 текс в основе и 66 текс в утке) с расчетной поверхностной плотностью  $370 \text{ г/м}^2$ . Ткань предлагается изготавливать двухслойным переплетением с комбинированным способом соединения слоев, что позволяет получить наиболее прочную и плотную структуру, на рисунке 6 представлен фрагмент схемы расположения основных и уточных нитей в ткани. В качестве базового переплетения верхнего и нижнего слоя выбран неправильный четырехремизный атлас, соотношение верхней и нижней основ 1:1, соотношение верхнего и нижнего утка 1:1.

Для изготовления спроектированных двухслойных тканей был выбран рапирный многоцветный ткацкий станок марки BestMax-210. Снование основ разработанных тканей предложено производить на ленточной сновальной машине HF998С при скорости снования не более  $200 \text{ м/мин}$  и скорости перевивания не более  $50 \text{ м/мин}$ .

Установлено, что средний уровень натяжения при сновании полиэфирных нитей не должен превышать

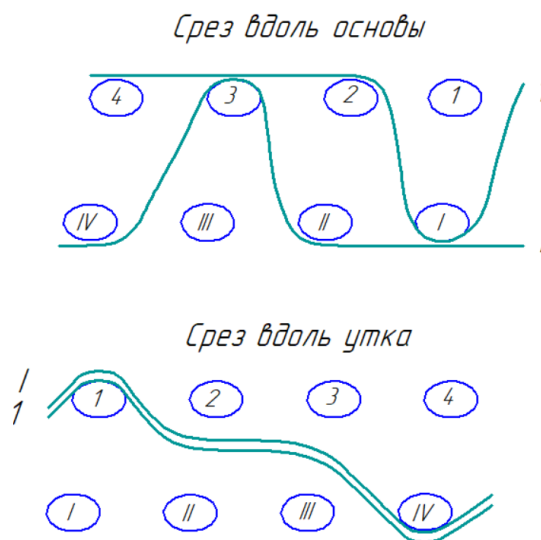


Рисунок 6 – Расположение нитей основы и утка в структуре двухслойной ткани с комбинированным способом соединения слоев  
Figure 6 – The arrangement of warp and weft threads in a two-layer fabric with a combined method of layer connection

2 % от разрывной нагрузки, а максимальный уровень не должен превышать 4 %.

Установлено, что средний уровень натяжения при сновании высокопрочных СВМПЭ нитей составляет 0,2 % от их разрывной нагрузки, а максимальный уровень составляет 0,7–1,3 % от разрывной нагрузки.

Отметим, что при навивании ленты на барабан производится обработка нитей шлихтующим препаратом Texuwaх CF (холодная шлихта), что позволяет снизить повреждаемость нитей в процессе ткачества.

Установлено, что средний уровень натяжения основы при зевобразовании при формировании двухслойной полиэфирной ткани составляет 1,5 % от разрывной нагрузки нити, а максимальный уровень натяжения основы при прибое составляет 3,4 %.

Установлено, что средний уровень натяжения основы при зевобразовании при формировании двухслойной СВМПЭ ткани составляет 0,4–0,7 % от разрывной нагрузки нити, а максимальный уровень натяжения основы при прибое составляет 2–2,5 %.

#### Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Далее представлены результаты исследований физико-механических и защитных свойств разработанных двухслойных тканей. В таблице 2 представлены значения показателей физико-механических и защитных свойств спроектированных двухслойных тканей.

Отметим, что испытания на сопротивление проколу проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ Р 124.260-2011 с дополнением: устойчивость на прокол определяется с помощью металлического индентора сечением 3\*3 мм с пирамидальной заточкой граней под углом 30 градусов к основанию, что позволяет имитировать воздействие острого обломка оружия фехтовальщика.

Из данных таблицы 2 следует, что все спроектированные образцы ткани в суровом и готовом (отделанном) виде обладают устойчивостью при проколе не менее 350 Н, что позволяет использовать их для пошива тренировочных и детско-юношеских фехтовальных костюмов. При использовании ткани арт. 5613-23 в два слоя удается обеспечить усилие при проколе на уровне 907-1249 Н, что удовлетворяет основным требованиям FIE – не менее 800 Н.

Установлено, что полиэфирная ткань арт. 5613-23 с поверхностной плотностью 449 г/м<sup>2</sup> в суровом виде имеет усилие при проколе на уровне 442 Н, после про-

цесса отделки ткани усилие при проколе увеличивается на 18 % до 522 Н. Также установлено, что после машинных стирок полиэфирной ткани с прижимным утком устойчивость к проколу продолжает увеличиваться – до 627 Н после трех стирок и до 646 Н после десяти стирок. Это объясняется тем, что высокообъемные и высокоэластичные текстурированные нити эластик, использованные в качестве прижимного утка, дополнительно усаживаются после мокрых обработок и температурных воздействий при отделке и стирках.

Неожиданным является тот факт, что усилие при проколе ткани арт. 5613-23 и 5614-23 фактически совпадает, несмотря на то, что ткани выработаны различными переплетениями и усилие вытягивания нитей из ткани арт. 5614-23 (двухслойное переплетение с комбинированным соединением слоев) существенно превышает аналогичный показатель для арт. 5613-23 (двухслойное переплетение с прижимным утком). Метод определения усилия вытягивания нитей из ткани подробно описан в работе [Сафонов, 2025].

На рисунках 7 и 8 представлены фотографии поперечных срезов разработанных тканей. Установлено, что соотношение высот волн изгиба основы и утка в слоях ткани арт. 5613-23 составляет 1,1, а в ткани арт. 5614-23 при использовании полиэфирных нитей – 2,7 и при использовании СВМПЭ нитей – 2,0.

Как было показано в работе [Сафонов, 2025] если соотношение высот волн изгиба основы и утка в ткани отличается от единицы (т. е. ткань не в пятом порядке фазы строения), то наблюдается резкое увеличение анизотропии свойств в направлении основы и утка, что выражается в неодинаковом усилии вытягивания нитей. Именно этот случай наблюдается для ткани с комбинированным соединением слоев (рисунок 8).

Также неожиданный результат получен при испытаниях ткани арт. 5614-23 из нитей СВМПЭ; установлено, что, несмотря на уникально высокую относительную разрывную нагрузку СВМПЭ по сравнению с полиэфиром (в 5 раз выше), усилие при проколе ткани составило всего 418 Н.

Это объясняется тем, что нити СВМПЭ, несмотря на высокую прочность и надежное закрепление в элементе ткани, все же вытягиваются без разрыва при воздействии индентора.

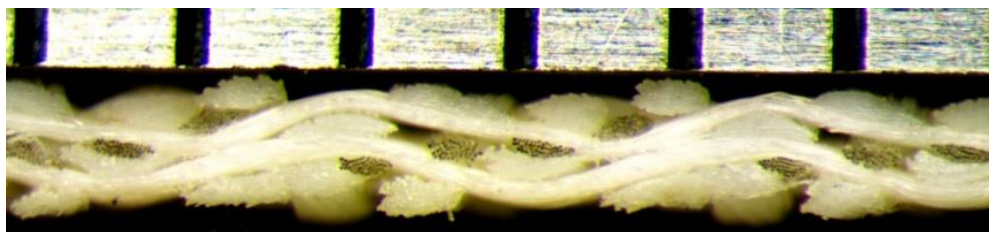
На рисунке 9 показаны образцы разработанных тканей в местах прокола. Видно, что в ткани с комбинированным соединением слоев (арт. 5614-23) нити утка,

## ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

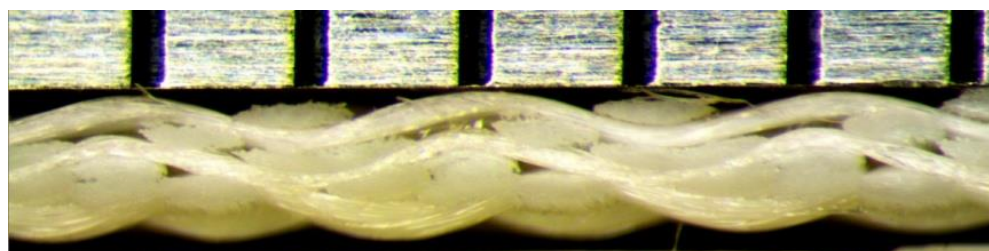
Таблица 2 – Значения показателей физико-механических свойств двухслойных тканей с номинальным усилием на прокол не менее 350 Н

Table 2 – Values of the physical and mechanical properties of double-layered fabrics with a nominal puncture force of at least 350 N

Наименование показателей	Значения показателей			
	Арт. 5613-23 сур.	Арт. 5613-23 гот.	Арт. 5614-23 сур.	
Сырьевой состав	93 % ПЭ, 7 % ПА	93 % ПЭ, 7 % ПА	100 % ПЭ	100 % СВМПЭ
Линейная плотность нитей, текс				
основа	55,6	55,6	55,6	44
уток	55,6 и 20	55,6 и 20	55,6	66
Переплетение	Двухслойное с прижимным утком (рисунок 5)		Двухслойное с комбинированным соединением слоев (рисунок 6)	
Толщина при 19 кПа, мм	0,78	0,75	0,75	0,73
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	449,1	483,2	402,1	365,3
Количество нитей на 10 см:				
по основе	375	396	368	365
по утку	468	499	283	262
Разрывная нагрузка полоски ткани (50x200)мм, Н:				полоска (25x200)мм
по основе	5701,1	5898,8	4931,3	4177
по утку	4875,3	5324,3	4519,6	6860
Удлинение полоски ткани (50x200)мм ткани, %:				полоска (25x200)мм
по основе	15,5	21,5	17,7	16,9
по утку	17,0	23,6	13,3	10,7
Раздирающая нагрузка ткани, Н				
по основе	649,7	612,8	565,5	4062
по утку	655,3	655,7	538,2	4270
Устойчивость на прокол, Н	448	522 646 – 10 стирок	416 576 – гот.	418
Максимальное перемещение индентора при проколе, мм	6,6	7,0 8,3 – 10 стирок	7,1	10,2
Воздухопроницаемость, дм <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> с	25,0	21,1	Менее 6,9	Менее 6,9
Жесткость ткани при изгибе, Н·см <sup>2</sup>				
по основе	0,13	0,16	0,20	0,24
по утку	0,50	0,15	0,40	0
коэффициент жесткости $K_{EI}$	1,26	1,10	0,50	-//-
Усилие вытягивания нити, Н:				
основа	10,1	11,2	27,8	55,2
уток	5,8	7,0	15,6	16,4



a



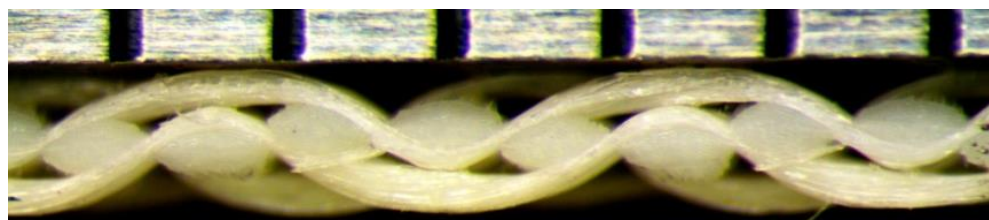
б (b)

Рисунок 7 – Микросрезы двухслойной ткани с прижимным утком:

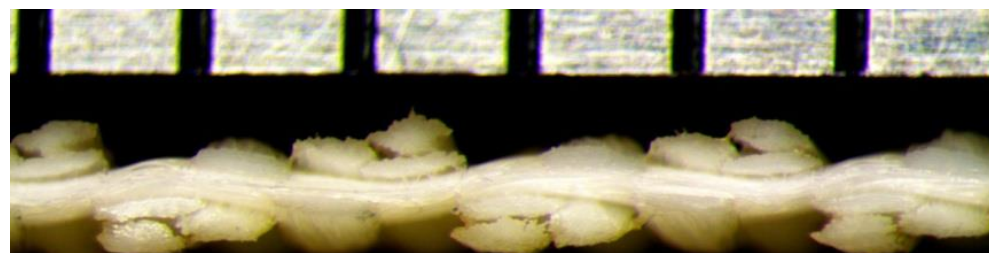
a – вдоль основы; б – вдоль утка

Figure 7 – Cross section of fabric with connective weft:

a – along warp thread; b – along weft thread



a



б (b)

Рисунок 8 – Микросрезы двухслойной ткани с комбинированным соединением слоев:

a – вдоль основы; б – вдоль утка

Figure 8 – Cross section of fabric with a combined method of joining layers:

a – along warp thread; b – along weft thread



а



б (b)



в (c)

Рисунок 9 – Фотографии тканей в местах прокола:

а – полиэфирная ткань с прижимным утком; б – полиэфирная ткань с комбинированным соединением слоев; в – СВМПЭ ткань с комбинированным соединением слоев

Figure 9 – Photos of fabrics at the puncture sites:

а – polyester fabric with a connective weft; б – polyester fabric with a combined method of joining layers; в – UHMWPE fabric with a combined method of joining layers

имеющие меньший изгиб в отличие от основы, вытягиваются без разрушения, особенно это при использовании СВМПЭ нитей.

Таким образом, для более полной реализации свойств нитей при взаимодействии с поражающим элементом при проколе, для предотвращения их вытягивания, в особенности при использовании СВМПЭ, было предложено связать высокоплотное малорастяжимое трикотажное полотно.

Высокоплотное малорастяжимое двухслойное трикотажное полотно было спроектировано на базе переплетения производная гладь с соединением слоев переплетением ластик 1:1 (Сафионов, Левакова, Юхин, Пивкина

и Фомина, 2025). Трикотажное полотно предложено изготавливать из СВМПЭ нитей 44 текс и текстурированных высокоэластичных нитей.

В качестве соединительных нитей (нити наброска) предложено использовать текстурированные высокоэластичные и высокоусадочные нити либо нити СВМПЭ, скрученные с полиуретановой нитью типа спандекс. Также при вязании полотна его основа – СВМПЭ нить может быть провязана платтировкой с текстурированной нитью, что позволяет увеличить фрикционное взаимодействие при проколе.

В таблице 3 представлены результаты испытаний опытных образцов трикотажа, связанного на плоскостя-

Таблица 3 – Значения показателей физико-механических свойств двухслойного трикотажа с номинальным усилием на прокол не менее 800 Н

Table 3 – The values of the physical and mechanical properties of double-layer knitwear with a nominal puncture force of at least 800 N

№ обр.	Сырьевой состав образца	Наименование показателя свойств			
		Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Толщина, мм	Усилие при проколе, Н	Прогиб в момент прокола, мм
1	55,5 % СВМПЭ – основа 44,5 % комб. нить СВМПЭ+спандекс – наброски	741,1	2,21	895 Min 672 Max 1116	29,2
1.1	53,5 % СВМПЭ – основа 46,5 % комб. нить СВМПЭ+спандекс – наброски	771,5	2,33	1015 Min 898 Max 1109	20,9
2	45 % СВМПЭ – основа 38 % комб. нить СВМПЭ+спандекс – наброски 17 % Полиэфир текстур. – платтировка	1014,1	2,45	1089 Min 931 Max 1249	21,6
2.2	47 % СВМПЭ – основа 36 % комб. нить СВМПЭ+спандекс – наброски 17 % Полиэфир текстур. – платтировка	936,5	2,53	972 Min 796 Max 1212	23,2
3	56 % СВМПЭ – основа 44 % Полиэфир текстур. – наброски и платтировка	846,8	2,78	916 Min 876 Max 992	20,9

зальной машине.

Из данных таблицы 3 следует, что все образцы трикотажа имеют среднюю устойчивость при проколе не менее 800 Н, фактически от 895 до 1089 Н, что полностью соответствует требованиям FIE.

Особенностью деформирования трикотажного полотна при проколе является значительный прогиб в момент разрушения. Прогиб трикотажа при проколе достигает 21–29 мм, для сравнения прогиб ткани в максимальном случае 10 мм. Значительный прогиб защитного материала, даже без его разрушения, может привести к травме спортсмена – так называемая запреградная травма. Таким образом, наиболее перспективными представляются образцы трикотажа с прогибом при проколе не более 22 мм.

На рисунке 10 представлены фотографии трикотажных полотен в месте прокола. Крупным планом представлено место прокола в образце № 3, который обладает, по нашему мнению, наилучшим соотношением

поверхностной плотности, толщины, устойчивости при проколе и прогибе при разрушении. Использование в качестве набросков и платтировки текстурированных нитей позволило в данном случае обеспечить необходимое фрикционное усилие между нитями при проколе и тем самым реализовать свойства СВМПЭ нитей.

Таким образом, в результате проведенной работы был произведен выбор исходного сырья, спроектированы, изготовлены и испытаны защитные материалы (двухслойные ткани и трикотаж) с заданным сопротивлением проколу, которые могут быть рекомендованы для пошива костюмов фехтовальщиков.

#### **Выводы**

- на основании анализа литературных источников и существующего мирового опыта были спроектированы образцы двухслойных тканей и трикотажа с заданным сопротивлением проколу;
- для изготовления материалов с повышенным сопротивлением проколу, предназначенных для изго-

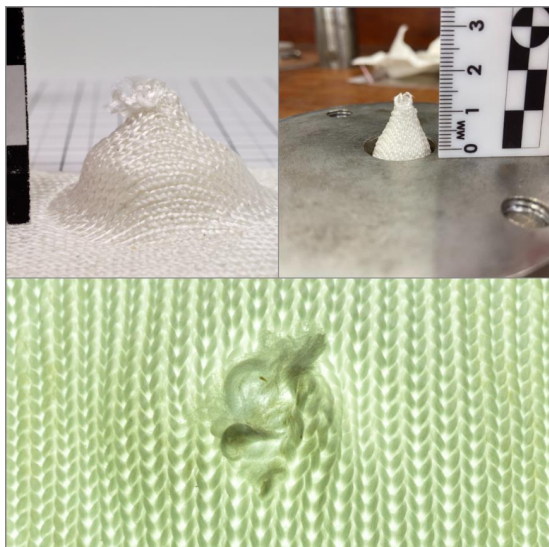


Рисунок 10 – Фотографии трикотажа из СВМПЭ в местах прокола  
Figure 10 – Photos of UHMWPE knitwear in puncture sites

товления экипировки фехтовальщиков, предложено использовать высокопрочные полиэфирные нити, высокопрочные и высокомодульные нити СВМПЭ и высококорастяжимые и высокоусадочные текстурированные нити;

– для изготовления защитных тканей рекомендуется использовать полиэфирные высокопрочные нити в сочетании с текстурированными нитями, а для изготовления трикотажных полотен использовать высокопрочные и высокомодульные нити СВМПЭ в сочетании с текстурированными нитями и нитями типа спандекс, что позволяет в максимальной степени реализовать свойства выбранных нитей;

– по результатам проведенной работы в состав экипировки фехтовальщика внедрена двухслойная полиэфирная ткань арт. 5613-23 с поверхностной плотностью 483 г/м<sup>2</sup> и сопротивлением проколу в один слой не менее 350 Н и в два слоя не менее 800 Н;

– на этапе внедрения находятся опытные трикотажные полотна с поверхностной плотностью от 741 до 1014 г/м<sup>2</sup> и сопротивлением при проколе не менее 800 Н.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Керимов, С.Г., Попов, Л.Н., Абрамчук, С.С., Курмашова, И.А. и Харченко, Е.Ф. (1998). *Ткань для защитной одежды*. Пат. № 2113566 РФ; МПК D03D15/00; заявка 96111933/12; заявл. 13.06.1996; опубл. 20.06.1998.

Керимов, С.Г., Попов, Л.Н., Курмашова, И.А., Мокеев, О.Б. и Харченко, Е.Ф. (1999). *Ткань «Кольчуга» для защитной одежды*. Пат. № 2137868 РФ; МПК D03D15/00; заявка 98120794/12; заявл. 20.11.1998; опубл. 20.09.1999.

Перепелкин, К.Е. (2009). *Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты*. Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, Российская Федерация.

Платонов, Р.В. (2020). *Ткань трикотажная для использования при самообороне в боевых контактах и искусствах*. Пат. № 2020113981А; МПК D04Н 1/00; заявка: 2020113981, 16.04.2020; опубл. 20.10.2020.

Сафонов, П.Е. (2025). Исследование взаимосвязи между параметрами строения ткани и ее защитной способностью при прорезании. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 3 (53), С. 38–52. DOI:10.24412/2079-7958-2025-3-38-52.

Сафонов, П.Е., Левакова, Н.М., Юхин, С.С., Пивкина, С.И. и Фомина, О.П. (2025). Разработка структур тканей и трикотажа с повышенной устойчивостью на прокол. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2025, № 4 (418), С. 154–162.

Там, Т., Бун, М.Б. и Батнагар, А. (2018). *Стойкие к проколу и пуленепробиваемые изделия и способ изготовления таких изделий*. Пат. № 2666217С2 РФ; МПК D03D 15/00; заявка: 2015144364; заявл. 12.03.2014; опубл. 06.09.2018.

Чиоу, М. Дж. (2004). Композит, стойкий к ударам ножа. Пат. 3 2240713С2 РФ; МПК А41D 31/00, F41H 1/02; заявка: 2002121775/12; заявл. 06.12.2000; опубл. 27.11.2004.

Шкуренко, С.И., Галицын, В.П. и Соколов, А.В. (2022). Проблемы и перспективы создания отечественного производства высоко- и сверхвысокопрочных армирующих материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Про-*

*мышленные процессы и технологии*, Т. 2, № 4 (6), С. 20–31. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-4(6)-20-3.

Achim, G. Fels, Georg, K. Brustmann and Dieter, H.P. Schuster (1996). *Textile structure for protective clothing*. Patent US 5514457A; F41H 1/02; D03D 3700; D02G 3/00; B32B5/02; publ: May 7, 1996.

Yang Yanfei, Cui Shuo, Wang Yi and Xing Bowen (2025). Influence of Resin Distribution Within UHMWPE Panels on Adhesion Strength and Ballistic Responses. *Polymer Composites*, 47 (9), 8141–8156. DOI:10.1002/pc.70675.

Yuan Mingfu and Yuan Chao (2017). *Light-weight high-strength fabric for fencing protective clothing and preparation process thereof*. Patent US 20180163329A1; D04B 1/14, D04B 21/16, D04B 1/22; PCT/CN2015/097444, Dec. 15, 2015; publ. Nov. 24, 2017.

## REFERENCES

Chiou, M.J. (2004). *Kompozit, stojkij k udaram nozha* [Composite, resistant to knife blows]. Patent No. 2240713C2 of the Russian Federation, IPC A41D 31/00, F41H 1/02; application: 2002121775/12; submitted on 06.12.2000; publ. 11.27.2004 (In Russian).

Kerimov, S.G., Popov, L.N., Abramchuk, S.S., Kurmashova, I.A. and Kharchenko, E.F. (1998). *Tkan' dlya zashchitnoj odezhdy* [Fabric for protective clothing]. Patent No. 2113566 of the Russian Federation, IPC D03D15/00; application 96111933/12; submitted on 13.06.1996; publ. 20.06.1998 (In Russian).

Kerimov, S.G., Popov, L.N., Kurmashova, I.A., Mokeev, O.B. and Kharchenko, E.F. (1999). *Tkan' «Kol'chuga» dlya zashchitnoj odezhdy* [Chainmail fabric for protective clothing]. Patent No. 2137868 of the Russian Federation, IPC D03D15/00; application 98120794/12; submitted on 11/20/1998; publ. 09.20.1999 (In Russian).

Perepelkin, K.E. (2009). *Armiryushchie volokna i voloknistye polimernye kompozity* [Reinforcing fibers and fibrous polymer composites]. Saint Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, Russian Federation (In Russian).

Platonov, R.V. (2020). *Tkan' trikotazhnaya dlya ispol'zovaniya pri samooborone v boevyh kontaktah i iskusstvakh* [Knitted fabric for use in self-defense in combat contacts and arts]. Patent No. 2020113981A of the Russian Federation, IPC D04H 1/00; application: 2020113981, 04/16/2020; publ. 10/20/2020 (In Russian).

Safonov, P.E. (2025). Researching the relationship between the parameters of the fabric structure and its protective ability when cutting knife [Issledovanie vzaimosvyazi mezhdu parametrami stroeniya tkani i ee zashhitnoj sposobnostyu pri prorezanii]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Vitebsk State Technological University*, no. 3 (53), pp. 38–52. DOI:10.24412/2079-7958-2025-3-38-52 (In Russian).

Safonov, P.E., Levakova, N.M., Yukhin, S.S., Pivkina, S.I. and Fomina, O.P. (2025). Development of structures of fabrics and knitwear with increased puncture resistance [Razrabotka struktur tkanej i trikotazha s povyshennoj ustojchivostyu na prokol]. *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, no. 4 (418), pp. 154–162 (In Russian).

Shkurenko, S.I., Galitsyn, V.P. and Sokolov, A.V. (2022). Problems and prospects of creating domestic production of high- and ultra-high-strength reinforcing materials based on ultra-high molecular weight polyethylene [Problemy i perspektivy sozdaniya otechestvennogo proizvodstva vysoko- i sverxvysokoprochnyx armiryushchix materialov na osnove sverxvysokomolekulyarnogo polietilena]. *Promyshlennye processy i tekhnologii = Industrial processes and technologies*, vol. 2, no. 4 (6), pp. 20–31. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-4(6)-20-3 (In Russian).

Tam, T., Bun, M.B. and Batnagar, A. (2018). *Stojkie k prokolu i puleneprobivaemye izdeliya i sposob izgotovleniya takih izdelij* [Puncture-resistant and bulletproof products and the method of manufacturing such products]. Patent No. 2666217C2 of the Russian Federation, IPC D03D 15/00; application: 2015144364; submitted 12.03.2014; publ.06.09.2018 (In Russian).

Achim, G. Fels, Georg, K. Brustmann and Dieter, H.P. Schuster (1996). *Textile structure for protective clothing*. Patent US 5514457A; F41H 1/02; D03D 3700; D02G 3/00; B32B5/02; publ: May 7, 1996.

Yang Yanfei, Cui Shuo, Wang Yi and Xing Bowen (2025). Influence of Resin Distribution Within UHMWPE Panels on Adhesion Strength and Ballistic Responses. *Polymer Composites*, 47 (9), 8141–8156. DOI:10.1002/pc.70675.

Yuan Mingfu and Yuan Chao (2017). *Light-weight high-strength fabric for fencing protective clothing and preparation process thereof*. Patent US 20180163329A1; D04B 1/14, D04B 21/16, D04B 1/22; PCT/CN2015/097444, Dec. 15, 2015; publ. Nov. 24, 2017.

### Информация об авторах

### Information about the authors

#### Сафонов Павел Евгеньевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный технолог ООО «ТЕКС-ЦЕНТР», Российская Федерация.

E-mail: pavlin722007@yandex.ru, info@teks-centre.ru

#### Левакова Наталия Марковна

Кандидат технических наук, генеральный директор ООО «ТЕКС-ЦЕНТР», Российская Федерация.

E-mail: info@teks-centre.ru

#### Пивкина Светлана Ивановна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и художественное оформление текстильных изделий», Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Российская Федерация.

E-mail: yss@staff.msta.ac.ru

#### Pavel E. Safonov

Candidate of Sciences (in Engineering), Senior Researcher, Chief Technologist, TEKS-CENTRE Ltd., Russian Federation.

E-mail: pavlin722007@yandex.ru, info@teks-centre.ru

#### Natalia M. Levakova

Candidate of Sciences (in Engineering), General Director, TEKS-CENTRE Ltd., Russian Federation.

E-mail: info@teks-centre.ru

#### Svetlana I. Pivkina

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor, A.N. Kosygin Russian State University (Technology, Design, Art), Russian Federation.

E-mail: yss@staff.msta.ac.ru

**Влияние тепловой обработки на показатели релаксации искусственных кож для верха обуви****С. Л. Фурашова,  
Ю. В. Милюшкова***Витебский государственный технологический университет,  
Республика Беларусь*

**Аннотация.** Натуральная кожа является лучшим материалом для верха обуви благодаря своей долговечности и высоким гигиеническим свойствам. Учитывая стоимость натуральных кож, альтернативными материалами для верха обуви являются искусственные кожи с более низкой стоимостью. Однако особенность структур искусственных кож, состоящих из слоев различных полимеров, вызывает необходимость разработки технологии изготовления обуви с учетом свойств материалов верха. При выполнении формообразующих операций заготовка верха обуви подвергается тепловому воздействию, в результате чего снижаются усилия растяжения, повышается скорость релаксационных процессов и возрастает величина остаточных удлинений.

Анализ литературных источников показал, что реологические свойства искусственных кож изучались в основном в более ранних трудах, однако не были изучены реологические свойства искусственных коллагеновых кож, поэтому такие исследования являются актуальными.

Целью работы является оценка показателей релаксации искусственных коллагеновых кож, применяемых для изготовления верха обуви, при растяжении и воздействии тепла и установление оптимальных режимов тепловой обработки при выполнении формообразующих операций изготовления обуви с верхом из таких материалов.

Методика проведения эксперимента заключалась в деформировании образцов с использованием автоматизированного комплекса, позволяющего регистрировать усилия и осуществлять расчет показателей релаксации. Режимы теплового воздействия на образцы соответствовали технологии изготовления обуви из искусственных кож на обувных предприятиях.

Установлено, что искусственные кожи артикулов «Лак М1614» и «Марсель» можно рекомендовать для изготовления обуви в качестве материалов верха, так как показатели их релаксационных свойств соизмеримы с показателями натуральной кожи. Режимы формования образцов из искусственной кожи «Нубук» требуют оптимизации, так как показатели их релаксационных свойств существенно ниже рекомендуемого значения (не менее 45 %).

Полученные результаты имеют практическое значение при установлении технологических режимов формования заготовок из искусственных кож на этапе конструкторско-технологической подготовки производства.

**Ключевые слова:** искусственные коллагеновые кожи для верха обуви, формование, тепловая обработка, показатели релаксации, формоустойчивость.

**Информация о статье:** поступила 12 марта 2026 года.

**The effect of heat treatment on the relaxation rates of artificial leather for shoe upper****Svetlana L. Furashova,  
Yuliya V. Miliushkova***Vitebsk State Technological University,  
Republic of Belarus*

**Abstract.** Genuine leather is the best material for shoe upper due to its durability and high hygienic properties. Given the cost of genuine leather, synthetic leather is a cheaper alternative for shoe upper. However, the unique structure of synthetic leather, consisting of layers of various polymers, necessitates the development of shoe manufacturing technologies that take into account the properties of the upper materials. During shaping operations, the shoe upper is subjected to heat, which reduces tensile forces, increases the rate of relaxation processes, and increases the magnitude of residual elongation. An analysis of the literature revealed that the rheological properties of artificial leathers were studied mainly in earlier works, but the rheological properties of artificial collagen leathers were not studied, so such studies are relevant.

The aim of the work is to evaluate the relaxation indices of artificial collagen leathers used for the production of shoe upper under stretching and exposure to heat and to establish optimal heat treatment modes when performing shaping operations in the production of shoes upper made of such materials.

The experimental methodology involved deforming samples using an automated system capable of recording forces and calculating relaxation parameters. The thermal conditions applied to the samples corresponded to those used in artificial leather footwear manufacturing.

It has been determined that artificial leathers of the "Lac M1614" and "Marseille" product categories can be recommended for shoe upper, as their relaxation properties are comparable to those of genuine leather. The molding conditions for "Nubuck" artificial leather samples require optimization, as their relaxation properties are significantly lower than the recommended value (at least 45 %).

These results are of practical importance for determining molding conditions for artificial leather blanks during the design and engineering preparation stage.

**Keywords:** artificial collagen leather for shoe upper, molding, heat treatment, relaxation indicators, shape stability.

**Article info:** received March 12, 2026.

### Введение

Лучшим материалом для верха обуви является натуральная кожа, так как она обладает необходимым комплексом физико-механических и гигиенических свойств. В настоящее время наряду с натуральной кожей для производства заготовок верха обуви широко применяются различные виды искусственных кож. Искусственные кожи представляют собой материал, в большинстве случаев имеющий многослойную структуру, состоящую из волокнистой основы (ткань, трикотажное или нетканое полотно), пропитанной и (или) покрытой пленкообразующими полимерными композициями.

Искусственные кожи уступают натуральным козам по ряду показателей. Основными недостатками искусственных кож являются: неудовлетворительные формовочные свойства, формоустойчивость и приформовываемость обуви к стопе, низкие гигиенические свойства, преждевременное разрушение материала под влиянием факторов окружающей среды и потовыделения.

Вместе с тем, искусственные кожи имеют высокие технологические свойства. Однородность свойств по площади позволяет применять многослойный раскрой и открывает широкие возможности для автоматизации производства. Наличие полимерного покрытия в искусственных кожах позволяет использовать тепловой или высокочастотный нагрев, тиснить, сваривать и формовать детали с высокой производительностью при хорошем качестве. Обувь, изготовленная с верхом из искусственных кож, имеет более низкую стоимость по сравнению с обувью с верхом из натуральных кож, а разнообразие цветовой гаммы и фактуры поверхно-

сти этих материалов позволяет расширять ассортимент изготавливаемой обуви.

Перспективным материалом для изготовления деталей верха обуви являются коллагеновые искусственные кожи, они имеют многослойную пористую структуру из нетканой волокнистой основы, состоящей из смеси коллагеновых волокон (которые получают из отходов кож) и небольшого количества химических волокон, проклеенных полиэфируретановыми композициями, или бутадиенстирольными и акрилонитрильными латексами, и пористого лицевого покрытия. Благодаря такому строению эти кожи обладают хорошей гигроскопичностью, влагопоглощением и влагоотдачей. Искусственные коллагеновые кожи эластичные, кожеподобные, хорошо поддаются окрашиванию и тиснению. Обувь с верхом из коллагеновых искусственных кож приформовывается к стопе значительно лучше, чем обувь с верхом из других искусственных кож, но все же хуже, чем обувь из натуральной кожи.

Типовой технологический процесс изготовления обуви с верхом из различных материалов включает ряд операций, многие из которых связаны с воздействием температур в широком диапазоне значений. При производстве обуви используются сверхвысокие (более 800 °C), высокие (200–800 °C), средние и малые (не более 200 °C) тепловые потоки.

Тепловые процессы оказывают различные воздействия на свойства материалов. Сверхвысокие потоки тепла приводят к деструкции полимерного материала и его разрушению. Подобные тепловые воздействия используются при раскрое материала лазером и обжиге

краев деталей. Высокие тепловые потоки существенно изменяют термомеханические свойства материалов в зоне обработки, при этом явных деструктивных явлений и разрушения материала не наблюдается. Такие тепловые воздействия применяются, например, при безниточном соединении деталей заготовки из искусственных кож и тиснении лицевой поверхности деталей. Средние и малые тепловые потоки не приводят к деструкции обувного материала и его термическому разрушению, а улучшают механические и упруго-пластические свойства материалов. Применяются такие воздействия преимущественно для придания обувным материалам свойств формовости и формоустойчивости.

Технология изготовления обуви с верхом из искусственных кож, учитывая сложную структуру и состав этих материалов, имеет отличительные особенности на всех стадиях ее изготовления по сравнению с производством обуви с верхом из натуральных кож.

Наиболее сложными процессами в производстве обуви являются технологические операции формования заготовки верха обуви, от выполнения которых во многом зависит качество изделия. На этапе формования заготовка верха обуви неоднократно испытывает тепловые воздействия. Материал подвергается повышенным температурам на операциях: пластификация носочно-пучковой части заготовки, затяжка заготовки верха обуви, термофиксация обуви и разглаживание верха обуви струей горячего воздуха.

При растяжении заготовки в процессе формования обуви в структуре материалов возникают релаксационные процессы, от скорости протекания которых, зависит продолжительность производственного цикла изготовления обуви и формоустойчивость изделия после снятия с колодки. Воздействие температуры на заготовку верха обуви в процессе её подготовки к формованию, при формовании, а также фиксации формы, снижает энергию межмолекулярного взаимодействия в структуре материала, что приводит к ускорению релаксационных процессов и материалы отформованной заготовки быстрее возвращаются в равновесное состояние.

Процессам релаксации, протекающим в структуре различных обувных материалах при растяжении, а также при воздействии различных технологических факторов уделялось внимание в научных исследованиях разных лет.

Процессы релаксации, возникающие в материалах заготовок из натуральных и искусственных кож,

текстильных материалов при одноосном и двухосном растяжении и при воздействии влаги и тепла, изучались достаточно подробно в ранних исследованиях (Растинис и Гутаускас, 1972; Луцык и Хомяк, 1979; Островский, К. Ю. и Островский, Ю. К., 2000). По результатам этих исследований можно судить о характере релаксационных процессов, протекающих в структуре обувных материалов при влиянии различных технологических факторов. Однако необходимо отметить, что в этих исследованиях не были изучены искусственные коллагеновые кожи.

Из применяемых для верха обуви материалов достаточно подробно в последние годы исследованы деформационно-прочностные показатели и релаксационные процессы, протекающие в системах материалов верха для войлочной обуви. На основе анализа кривых релаксации и петель гистерезиса исследована формовость и формоустойчивость обуви с верхом из войлока при одноцикловом растяжении (Зарицкий и Леденева, 2014; Леденева, 2023; Ledeneva and Bokova, 2024).

Свойства современных коллагеновых искусственных кож для верха обуви изучены недостаточно. В работе (Даниленко и Фурашова, 2022) проведены исследования релаксационных свойств коллагеновых искусственных кож, применяемых для производства заготовки верха обуви. Показано влияние различных видов тиснения лицевой поверхности искусственных кож на показатели релаксации, формовости и формоустойчивости.

В последнее время широко исследованы вопросы прогнозирования процессов релаксации полимерных материалов текстильной и легкой промышленности и осуществлена оценка точности предложенных методов (Макаров, Переборова, Егорова и др., 2017; Демидов, Переборова, Макаров и др., 2022; Переборова и Макаров, 2023; Козлов и Киселев, 2023; Вагнер, Егорова и Егоров, 2024; Переборова, Вагнер, Титова и др., 2024).

Прогнозирование релаксационных свойств натуральных и искусственных кож, текстильных материалов, а также их систем осуществлялось в более ранних работах. Для математического описания релаксационных процессов полимерных материалов предлагалось использовать уравнение Кольрауша, систему уравнений Максвелла-Томсона, модель Кельвина-Фойгта и теорию наследственной вязкоупругости Больцмана-Вольтерры (Бурмистров и Кочеров, 1998; Фурашова, Горбачик и Скоков, 2008).

Моделирование процессов релаксации обувных материалов позволяет с высокой точностью прогнозиро-

вать величину остаточных усилий в любой момент времени, что дает возможность осуществить рациональный выбор материалов для обуви высокого качества (Фурашова, Горбачик и Скоков, 2010).

Постоянное расширение ассортимента искусственных кож для верха обуви за счет использования передовых полимерных составов, внедрения новых типов покрытий и широкого использования коллагеновых волокон в качестве основ искусственных кож требует изучения свойств новых материалов и особенностей их поведения в процессе проведения технологических операций производства обуви. Учитывая, что искусственные кожи состоят из слоев различных полимеров, при установлении технологических режимов обработки обуви с верхом из искусственных кож на этапе формирования необходимо учитывать особенности поведения этих полимеров при воздействии на них высоких температур.

Исходя из этого, целью настоящей работы является определение влияния режимов тепловой обработки заготовок обуви с верхом из современных искусственных кож на релаксационные процессы, протекающие в материале при формировании и установлении оптимальных режимов тепловой обработки при выполнении формообразующих операций изготовления обуви с верхом из коллагеновых искусственных кож.

### Методы и средства исследования 1

Метод исследования релаксационных свойств материалов при одноосном растяжении заключался в деформировании образцов на разрывной машине «FRANK» и в определении с использованием автоматизированного комплекса усилий в испытуемом образце, а также обработки результатов испытаний с записью кривых релаксации усилий (Горбачик, Томашева, Фурашова и др., 2006).

В ходе испытаний материалов на растяжение, усилия, возникающие при деформации образца, соответствующие им значения удлинений, а также релаксация усилий при фиксированном удлинении регистрируются датчиками разрывной машины «FRANK» и преобразуются посредством аналогового устройства в цифровые значения, которые передаются ПЭВМ. Полученный массив данных представляет собой значения усилий, зафиксированные каждые 250 микросекунд.

Для выполнения поставленной цели были исследованы несколько видов материалов, применяемых для заготовки верха обуви: натуральная кожа арт. «Мираж»

и искусственные кожи артикулов: «Нубук», «Марсель» и «Лак М1614». Отобранные искусственные кожи состоят из нетканой основы, включающей смесь кожевенных и искусственных волокон, вспененного полимерного слоя и полиуретанового покрытия.

Учитывая различную деформационную способность исследуемых материалов по направлениям, раскрой образцов искусственных кож производился вдоль рулона и поперек рулона, натуральной кожи – вдоль и поперек хребтовой линии. Выкраивались образцы прямоугольной формы размерами 200×40 мм с рабочей частью 150×40 мм. Релаксационные свойства материалов исследовались для двух групп образцов, по пять параллельных образцов в каждом испытании. Первая группа образцов исследовалась в нормальных условиях, без воздействия тепловой обработки, вторая группа образцов подвергалась тепловому воздействию.

Методика проведения эксперимента для первой группы образцов заключалась в следующем: образцы закреплялись в зажимах разрывной машины «FRANK» и подвергались одноосному растяжению на 15 % со скоростью 100 мм/мин, время выдержки деформированных образцов составляло 1 час, что соответствует времени выдержки обуви на колодке в процессе формообразующих операций. В течение всего эксперимента для испытуемых образцов материалов осуществлялась запись кривых релаксации усилий с выводом их на экран монитора.

В основу методики эксперимента для второй группы образцов положено моделирование технологического процесса изготовления обуви с верхом из натуральных и искусственных кож. Типовая технология формирования верха обуви из натуральных кож предусматривает увлажнение и пластификацию носочно-пусковой части заготовки перед формированием и выполнение операции тепловой фиксации формы верха обуви. При изготовлении обуви из искусственных кож перед формированием заготовку пластифицируют, а фиксация формы верха обуви выполняется способом тепловой обработки. Технологические параметры гидротермических воздействий на испытуемые образцы приняты согласно технологии, используемой на обувных предприятиях при изготовлении обуви с верхом из аналогичных материалов.

Пластификация образцов из искусственных кож производилась на лабораторной установке контактным способом в течение 12 с при температуре 120 °С,

а образцы из натуральной кожи пластифицировались термодиффузионным контактным способом с применением увлажнителя и соблюдением аналогичных температурных и временных параметров. Затем пластифицированные образцы закреплялись в зажимах разрывной машины «FRANK» и деформировались по заданным параметрам. Через 15 мин после начала растяжения образцы подвергались тепловому воздействию конвективным способом при температуре 140 °С в течение 4 мин, что имитировало процесс тепловой фиксации заготовки верха обуви после формообразующих операций. Общее время выдержки деформированных образцов составляло 1 час.

С использованием полученного массива данных в автоматическом режиме программного комплекса рассчитывались основные показатели, характеризующие процесс релаксации:

– доля быстропотекающих процессов релаксации усилия ( $\delta P_o$ ), %:

$$\delta P_o = \frac{P_o - P_1}{P_o} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $P_o$  – усилие в начале процесса релаксации, Н;  $P_1$  – усилие после протекания быстрых процессов перестройки структуры материала (5 секунд после момента

начала процесса релаксации), Н.

– общая доля релаксации усилия ( $\delta P_{обш}$ ), %:

$$\delta P_{обш} = \frac{P_o - P_2}{P_o} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $P_2$  – усилие через один час после начала процесса релаксации, Н.

### Результаты исследований 1

Полученные показатели релаксации исследуемых материалов верха обуви представлены в таблице 1.

#### Анализ результатов 1

Значение показателя начального усилия ( $P_o$ ) зависит от физико-механических свойств материала и оказывает большое влияние на формуемость заготовки верха обуви. Показатель характеризует нагрузку, необходимую для растяжения образцов на 15 %. Как показывают данные таблицы для исследуемых материалов  $P_o$  находится в широких пределах от 36,8 Н до 389,2 Н. Величина начального усилия в продольном направлении значительно превышает усилие в поперечном направлении как для образцов первой группы, так и для второй группы образцов. В искусственных кожах наблюдается большая анизотропия свойств, по сравнению с натуральной кожей. При тепловом воздействии начальное усилие при растяжении уменьшается для образцов

Таблица 1 – Показатели релаксации исследуемых материалов

Table 1 – Relaxation indices of the studied materials

Наименование материала	Обработка	Показатели релаксации по направлениям раскрытия образцов					
		$P_o$ , Н		$\delta P_{от}$ , %		$\delta P_{обш}$ , %	
		вдоль	поперек	вдоль	поперек	вдоль	поперек
НК арт. «Мираж»	без обработки	389,2	306,3	11,7	14,7	31,7	34,6
	тепловое воздействие	269,9	203,6	19,8	24,6	52,2	59,4
ИК арт. «Лак М1614»	без обработки	186,5	44,5	15,9	11,8	42,9	64,7
	тепловое воздействие	151,5	36,9	19,0	13,6	46,3	67,7
ИК арт. «Марсель»	без обработки	171,1	39,2	13,8	22,0	33,9	38,9
	тепловое воздействие	153,9	36,8	16,4	26,4	47,4	58,6
ИК арт. «Нубук»	без обработки	226,7	62,3	13,7	17,0	37,2	39,3
	тепловое воздействие	178,5	54,2	15,0	21,2	40,8	41,5

натуральной кожи в среднем на 30 %. Для образцов искусственных кож снижение начального усилия находится в пределах от 6 до 21 %, что в среднем составляет 13,5 %. Таким образом, уменьшение показателя начального усилия при растяжении образцов подвергнутых тепловой обработке свидетельствует об улучшении формоустойчивости исследуемых материалов верха обуви.

Показатель доли быстропротекающих процессов ( $\delta P_p$ ) характеризует скорость релаксационных процессов в первые 5 секунд после окончания растяжения. Значение показателя зависит от структуры материала и оказывает влияние на интенсивность падения напряжений в образце, находящемся под нагрузкой. Анализ данных таблицы показывает, что значение параметра  $\delta P_p$  находится в интервале от 11,7 % до 26,4 %. Тепловое воздействие на материал повышает значение показателя доли быстропротекающих процессов для образцов из натуральной кожи в среднем на 40 %, а для образцов искусственных кож в среднем на 18 %.

Показатель общей доли релаксации ( $\delta P_{общ}$ ) отражает падение усилий, происходящее в материале в течение времени наблюдения за процессом релаксации, чем больше его значение, тем лучше релаксирует материал и остаточные напряжения в материале заготовки будут минимальны на момент снятия обуви с колодки. По мнению исследователей, релаксационная способность обувных материалов считается достаточной для обеспечения хорошей формоустойчивости обуви, если общая доля релаксации после выполнения формообразующих операций и операций фиксации формы составляет не менее 45 % [Растенис и Гутаускас, 1972; Луцык и Хомяк, 1979; Адигезалов, 1983].

Как показывает анализ данных таблицы показатель общей доли релаксации ( $\delta P_{общ}$ ) в образцах натуральной кожи составляет 31,7 % и 34,6 %, соответственно вдоль и поперек хребтовой линии. Тепловое воздействие на материал позволяет повысить значение анализируемого показателя до 52,2 % и 59,4 %, соответственно вдоль и поперек хребтовой линии. Величина анализируемого показателя согласуется с данными, полученными в более ранних исследованиях [Растенис и Гутаускас, 1972; Луцык и Хомяк, 1979; Островский, К. Ю. и Островский, Ю. К., 2000; Даниленко и Фурашова, 2022].

Значение показателя общей доли релаксации ( $\delta P_{общ}$ ) в образцах искусственной кожи находится в широких пределах и варьирует от 33,9 % до 42,9 % и от 38,9 % до 64,7 %, соответственно вдоль и поперек рулона.

Тепловое воздействие на искусственные кожи повышает значение  $\delta P_{общ}$  от 40,8 % до 47,4 % и 41,5 % до 67,7 % соответственно вдоль и поперек рулона. Максимальное повышение значения показателя общей доли релаксации ( $\delta P_{общ}$ ) при тепловой обработке наблюдается в образцах искусственной кожи «Марсель», увеличение показателя произошло в среднем на 31 %.

Кривые релаксации усилий образцов искусственной кожи «Марсель» без обработки и подвергнутых тепловому воздействию представлены на рисунке 1.

На кривых выделены характерные точки и участки.

Точка  $P_0$  соответствует начальному усилию, возникающему при растяжении образца на 15 %.

Точка  $P_2$  характеризует величину остаточного усилия, сохранившегося в образце на момент снятия деформирующей нагрузки через один час после начала процесса релаксации.

Участок  $P_{0-1}$  отражает процесс релаксации, протекающий в структуре материала в нормальных условиях в первые 15 мин до теплового воздействия (точка 1).

Участок 1-2 соответствует времени осуществляемого теплового воздействия на образец (4 мин). Тепловое воздействие вызывает резкое падение усилий, вследствие прогрева материала, что значительно ускоряет процесс релаксации. Точка 2 определяет окончание теплового воздействия, в этот момент усилия в материале минимальны.

После прекращения теплового воздействия на кривой наблюдается незначительное кратковременное возрастание внутренних усилий (участок 2-3), вызванное термическим эффектом – сжатием материала при охлаждении.

Последующая выдержка материала в напряженном состоянии в нормальных условиях в течение заданного времени эксперимента приводит к незначительному снижению усилий до точки  $P_2$ . Характер наклона кривых показывает интенсивность релаксационных процессов в исследуемых образцах.

Сравнительный анализ кривых релаксации образцов искусственной кожи «Марсель», исследованных в нормальных условиях и подвергнутых тепловому воздействию показал, что пластификация образцов контактным способом в течение 12 с при температуре 120 °C снижает показатель начального усилия на 17 Н в образцах, выкроенных вдоль рулона и на 2,5 Н в образцах, выкроенных поперек рулона.

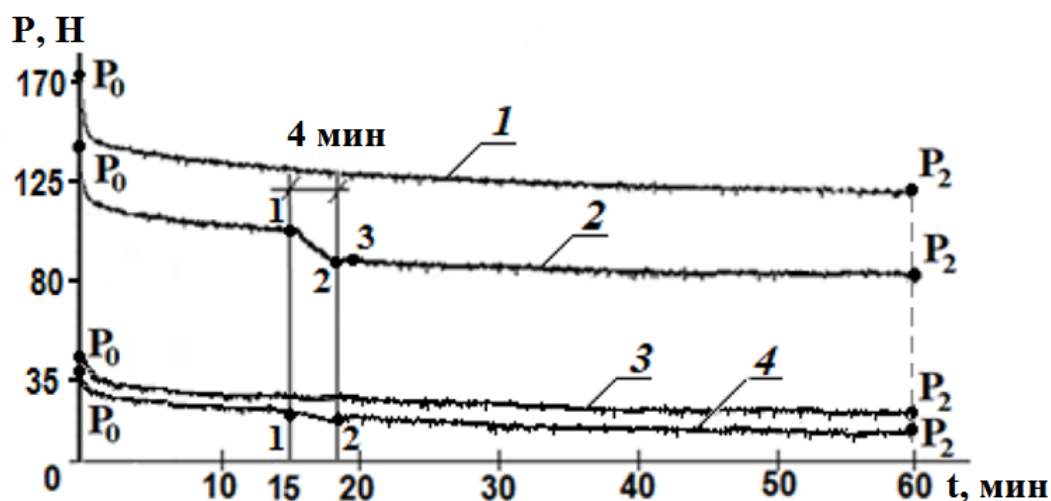


Рисунок 1 – Кривые релаксации усилий образцов искусственной кожи «Марсель»:

1 – вдоль рулона без обработки; 2 – вдоль рулона с тепловой обработкой;  
3 – поперек рулона без обработки; 4 – поперек рулона с тепловой обработкой.

Figure 1 – Stress relaxation curves of artificial leather samples "Marcel":

1 – along the roll without treatment; 2 – along the roll with heat treatment;  
3 – across the roll without treatment; 4 – across the roll with heat treatment

Тепловое воздействие на деформируемые образцы конвективным способом при температуре 140 °С в течение 4 мин (участок 1–2) вызывает резкое падение регистрируемых усилий в образцах на 16 Н и 3,5 Н, выкроенных вдоль и поперек рулона соответственно.

Общее снижение релаксируемых усилий (точка  $P_2$ ) по сравнению с первоначальным значением (точка  $P_0$ ) в образцах не подвергнутых тепловой обработке, выкроенных вдоль рулона, составляет 58 Н и 15 Н в образцах, выкроенных поперек рулона.

Кривые релаксации показывают, что тепловое воздействие повышает интенсивность протекания релаксационных процессов, особенно в образцах, выкроенных поперек рулона, общая доля релаксации [ $\delta P_{\text{общ}}$ ] возрастает на 20 %, в образцах вдоль рулона на 13,5 %.

Исследования показали, что при выбранных температурных воздействиях искусственная кожа «Марсель» имеет релаксационные свойства близкие к свойствам натуральной кожи «Мираж» и соответствуют рекомендуемым значениям. Исходя из этого, выбранные режимы теплового воздействия можно рекомендовать при производстве обуви с верхом из искусственной кожи «Марсель».

Кривые релаксации других исследуемых искусственных кож в основном носят аналогичный характер и отличаются значением показателей  $P_0$  и  $P_2$ , интенсивностью падения и роста усилий (участки 1–2 и 2–3) в зависимости от вида материала и направления раскроя образца.

В образцах искусственных кож артикулов «Нубук» и «Лак» наблюдается повышение показателя  $\delta P_{\text{общ}}$  при тепловом воздействии в среднем на 3,5 % в продольном направлении и на 2,5 % в поперечном направлении. При этом искусственная кожа «Лак М1614» имеет высокую релаксационную способность, как в нормальных условиях, так и при тепловой обработке, соизмеримую с показателем общей доли релаксации натуральной кожи. Значение показателя общей доли релаксации искусственной кожи «Нубук» составляет в среднем 41 %, что меньше рекомендуемого значения и существенно ниже значения аналогичного показателя, как искусственных кож исследуемых артикулов, так и натуральной кожи, что может привести к недостаточной формоустойчивости готовой обуви.

Как следует из данных литературных источников, тепловое воздействие на заготовку с верхом из искус-

ственной кожи в наибольшей степени ускоряет релаксационные процессы, протекающие в структуре материала. Таким образом, подбором режимов тепловой обработки материала заготовки можно достичь более высокого значения показателя общей доли релаксации.

Исходя из этого, следующей задачей, решаемой в данной работе, является корректировка режимов тепловой обработки искусственной кожи «Нубук» с целью достижения более высоких значений показателя общей доли релаксации

## Методы и средства исследования 2

Корректировка режимов тепловой обработки осуществлялась с использованием D-оптимального плана второго порядка, который предполагает варьирование факторов на трех уровнях.

В качестве критерия оптимизации принят показатель общей доли релаксации ( $\delta P_{общ}$ ), который должен составлять не менее 45 %.

В качестве исследуемых факторов выбраны: температура пластификации перед формообразующими

операциями ( $T_{пл}$ , °C) и продолжительность воздействия тепловой фиксации после формования верха обуви ( $t_{ф}$ , мин). При выборе области определения исследуемых факторов учитывалась режимная технология изготовления обуви из искусственных кож при выполнении таких операций как, «Пластификация носочной части заготовки» и «Тепловая фиксация полуфабриката обуви».

Постоянными факторами в эксперименте являются: время пластификации перед формообразующими операциями ( $t_n = 12$  с) и температура тепловой фиксации после формования верха обуви ( $T_{ф} = 140$  °C) (таблица 2).

План эксперимента представлен в таблице 3.

## Результаты исследований 2

С использованием программы STATISTICA было получено уравнение регрессии, отражающее зависимость показателя общей доли релаксации ( $\delta P_{общ}$ ) от температуры пластификации ( $T_{пл}$ ) и продолжительности тепловой фиксации ( $t_{ф}$ ). Полученное уравнение, в кодированных значениях переменных, имеет следующий вид:

$$\delta P_{общ} = 41,0 + 4,2X_1 + 4,3 X_2 + 2,2 X_1 X_2 . \quad (3)$$

Таблица 2 – Уровни варьирования факторов

Table 2 – Levels of variation of factors

Факторы	Температура пластификации $T_{пл}$ , °C ( $X_1$ ), продолжительность 12 с	Продолжительность тепловой фиксации $t_{ф}$ , мин ( $X_2$ ), $T_{ф} = 140$ °C
Max (-)	100	2
0	120	4
Min (+)	140	6

Таблица 3 – План эксперимента

Table 3 – Experiment plan

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$\delta P_{общ}$
1	-	-	34,6
2	-	0	37,5
3	-	+	38,4
4	0	-	36,6
5	0	0	40,8
6	0	+	46,0
7	+	-	38,4
8	+	0	46,0
9	+	+	51,0

**Анализ результатов 2**

Из уравнения видно, что увеличение температуры пластификации ( $X_1$ ) и продолжительности тепловой фиксации ( $X_2$ ) приводит к росту показателя общей доли релаксации, влияние этих факторов на критерий оптимизации практически одинаково. Для полученного уравнения характерна значимость коэффициента парного взаимодействия, действие температуры пластификации на показатель общей доли релаксации зависит от уровня, на котором находится фактор продолжительности тепловой фиксации.

Полученный график изолиний показателя общей доли релаксации ( $\delta P_{общ}$ ) дает возможность визуально определить технологические режимы пластификации и тепловой фиксации, при которых  $\delta P_{общ}$  принимает максимальное значение (рисунок 2).

График изолиний показывает, что максимальное значение показателя общей доли релаксации ( $\delta P_{общ} = 51\%$ ) достигается при температуре пластификации ( $T_{пл}$ ) 140 °C в течение 12 секунд и тепловой фикса-

ции при температуре ( $T_{\phi}$ ) 140 °C в течение 6 минут.

Дальнейшее повышение продолжительности тепловой фиксации и повышение температуры пластификации не рационально, так как это может привести к переходу полимерного покрытия в вязкотекучее состояние, в результате чего на материале могут проявляться такие дефекты как: вылегание основы, эффект «лимонной корки», трещины лицевого слоя, нарушения лицевой поверхности кожи и отклеивание затяжной кромки от подошвы.

**Выводы**

1. Проведенные исследования показали, что тепловое воздействие, осуществляемое при формировании обуви с верхом из коллагеновых искусственных кож, так же как и при формировании обуви с верхом из искусственных кож, не содержащих коллагеновых волокон, существенно повышает релаксационную способность материалов верха заготовки. По сравнению с натуральными кожами показатели релаксации искусственных коллагеновых кож находятся в более широком интервале и могут зна-

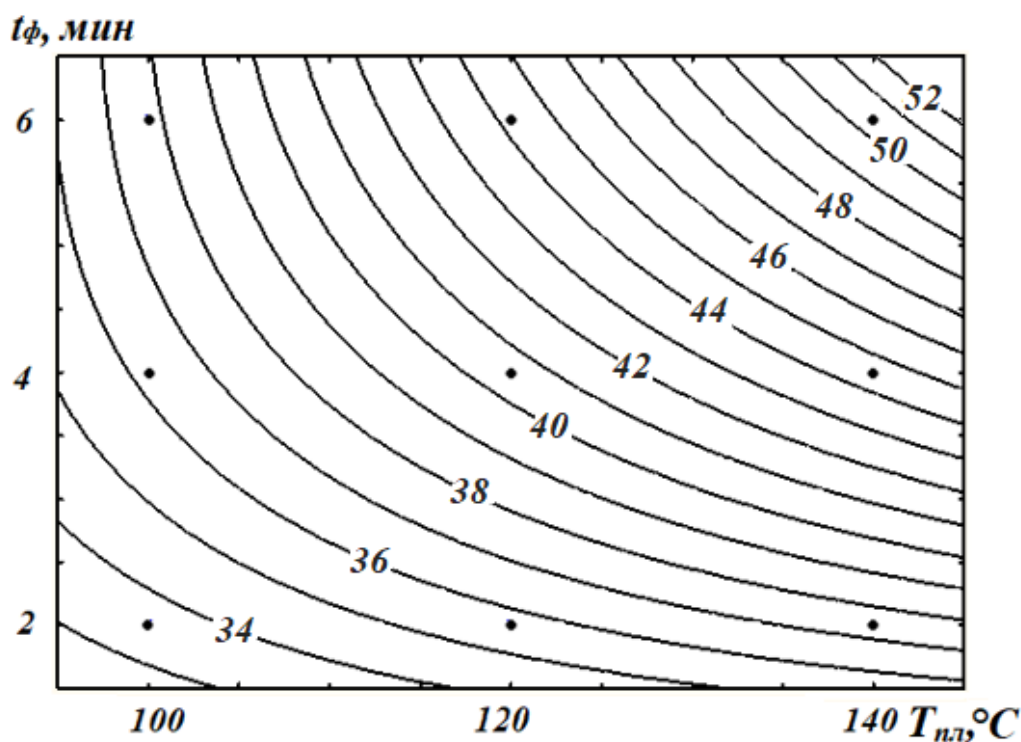


Рисунок 2 – Сечения поверхностей показателя общей доли релаксации материалов  
 Figure 2 – Cross sections of the surfaces of the indicator of the total proportion of relaxation of materials

чительно отличаться от показателей релаксации, характерных для натуральной кожи.

2. Установлено, что искусственные кожи артикулов «Лак М1614» и «Марсель» можно рекомендовать к использованию в качестве материалов верха, обеспечивающих достаточную формоустойчивость готовой обуви, так как показатели их релаксационных свойств соизмеримы со свойствами натуральной кожи и согласуются с ранее проведенными исследованиями. Общая доля релаксации этих кож составляет более 45 %.

3. Значение показателя общей доли релаксации искусственной коллагеновой кожи «Нубук» существенно ниже рекомендуемого значения (не менее 45 %), и меньше аналогичного показателя, как искусственных

кож исследуемых артикулов, так и натуральной кожи, что может привести к недостаточной формоустойчивости готовой обуви. Для повышения релаксационной способности кожи «Нубук» необходима корректировка технологических режимов тепловой обработки.

4. В работе с применением математических методов планирования эксперимента оптимизированы технологические режимы тепловой обработки искусственной кожи арт. «Нубук». Установлено, что высокого показателя общей доли релаксации ( $\delta P_{общ}$ ) можно достичь при следующих технологических режимах: температуре пластификации ( $T_{нл}$ ) 140 °С в течение 12 секунд и тепловой фиксации при температуре ( $T_{ф}$ ) 140 °С в течение 6 минут.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Адигезалов, Л.И.-О. (1983). *Увлажнение, сушка и влажно-тепловая обработка в обувном производстве*. Москва: Легкая и пищевая промышленность, РСФСР.

Бурмистров, А.Г. и Кочеров, А.В. (1998). Компьютерный комплекс «RELAX» для оценки качества материалов. *Кожевенно-обувная промышленность*, № 1, С. 17–19.

Вагнер, В.И., Егорова, М.А. и Егоров, И.М. (2024). Моделирование релаксации полимерных текстильных материалов технического назначения. *Дизайн. Материалы. Технология*, № 1 (73), С. 166–170.

Горбачик, В.Е., Томашева, Р.Н., Фурашова, С.Л., Довыдько, А.П. и Ковалев, А.Л. (2006). Автоматизированный комплекс для оценки механических свойств материалов. *Вестник Витебского государственного университета*, Вып. 11, С. 5–8.

Даниленко, А.Е. и Фурашова, С.Л. (2022). Релаксационные свойства тисненых искусственных кож для верха обуви. *Материалы и технологии*, № 1 (9), С. 45–49.

Демидов, А.В., Переборова, Н.В., Макаров, А.Г. и Киселев, С.В. (2022). Оптимизация математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. № 2 (398), С. 285–291.

Зарицкий, Б.П. и Леденева, И.Н. (2014). Формуемость и формоустойчивость обуви с верхом из войлока. *Дизайн и технологии*, № 42 (84), С. 33–38.

Козлов, А.А. и Киселев, С.В. (2023). Разработка методов прогнозирования процессов обратной релаксации полимерных текстильных материалов. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии*, № 2, С. 95–98.

Леденева, И.Н. (2023). Анализ и эмпирические модели результатов полуцикловых экспериментов с войлоками для верха обуви. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. № 5 (407), С. 51–55.

Луцык, Р.В. и Хомяк, Н.Е. (1979). Влияние тепла и влаги на релаксационные свойства и формоустойчивость искусственных и синтетических кож. *Кожевенно-обувная промышленность*, № 10, С. 45–48.

Макаров, А.Г., Переборова, Н.В., Егорова, М.А. и Егоров, И.М. (2017). Математическое моделирование деформационно-релаксационных процессов полимерных материалов в условиях переменной температуры. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, № 4, С. 287–292.

Макаров, А.Г., Переборова, Н.В., Егорова, М.А. и Егоров, И.М. (2017). Разработка критериев достоверности прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных материалов. *Химические волокна*. № 2. С. 59–63.

Островский, К.Ю. и Островский, Ю.К. (2000). Способ оценки релаксационных параметров кожи. *Кожевенно-обувная промышленность*, № 5, С. 42–43.

Переборова, Н.В. и Макаров, А.Г. (2023). Проверка критериев доверительного прогнозирования релаксации полимерных текстильных материалов. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна, Серия 1: Естественные и технические науки*, № 3, С. 80–85.

Переборова, Н.В., Вагнер, В.И., Титова, М.Н., Шиков, П.А., Стекольников, А.А., Климова, Н.С., Рудовский, П.Н., Одинцов, А.С., Силаков, А.В. и Тихомирова, С.А. (2024). Оценка точности прогнозирования процессов релаксации полимерных текстильных материалов. *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*, Т 68, № 4, С. 88–92.

Растенис, И.К. и Гутаускас, М.М. (1972). Релаксация напряжений при пространственном растяжении текстильных материалов. *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*, Т 4, С. 106–108.

Фурашова, С.Л., Горбачик, В.Е. и Скоков, П.И. (2008). Прогнозирование релаксации усилий обувных материалов. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, Вып. 15, С. 76–81.

Фурашова, С.Л., Горбачик, В.Е. и Скоков, П.И. (2010). Прогнозирование релаксационной способности систем материалов. *Вестник Витебского государственного университета*, Вып. 18, С. 100–105.

Ledeneva, I.N. and Bokova, E.S. (2024). Analysis of the structure and shape stability of felt modified with synthetic latex. *Fibre Chemistry*, vol. 55, No. 5, January, 2024 [Russian Original No. 5, September – October, 2023] DOI 10.1007/s10692-024-10487-1, pp. 337–340.

## REFERENCES

Adigezalov, L.I.-O. (1983). *Uvlazhnenie, sushka i vlazhno-teplovaya obrabotka v obuvnom proizvodstve* (Moistening, drying and wet-heat treatment in footwear production). Moscow: Light and food industry, RSFSR (In Russian).

Burmistrov, A.G. and Kocherov, A.V. (1998). Computer complex "RELAX" for assessing the quality of materials. [Komp'yuternyj kompleks «RELAX» dlja ocenki kachestva materialov]. *Kozhevenno-obuvnaja promyshlennost' = Leather and Shoe industry*, No. 1, pp. 17–19 (In Russian).

Wagner, V.I., Egorova, M.A. and Egorov, I.M. (2024). Modeling of relaxation of polymer textile materials for technical purposes (Modelirovanie relaksacii polimernyh tekstil'nyh materialov tehničeskogo naznachenija). *Dizajn. Materialy. Tehnologija = Design. Materials. Technology*, No. 1 (73), pp. 166–170 (In Russian).

Gorbachik, V.E., Tomasheva, R.N., Furashova, S.L., Dovydko, A.P. and Kovalev, A.L. (2006). An automated complex for evaluating the mechanical properties of materials (Avtomatizirovannyj kompleks dlja ocenki mehanicheskikh svojstv materialov). *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State University*, Issue 11, pp. 5–8 (In Russian).

Danilenko, A.E. and Furashova, S.L. (2022). Relaxation properties of embossed artificial leather for shoe tops (Relaksacionnye svojstva tisnenyh iskusstvennyh kozh dlja verha obuvi). *Materialy i tehnologii = Materials and Technologies*, No. 1 (9), pp. 45–49 (In Russian).

Demidov, A.V., Pereborova, N.V., Makarov, A.G. and Kiselev, S.V. (2022). Optimization of Mathematical Modeling of Relaxation-Recovery Processes in Polymer Textile Materials (Optimizaciya matematičeskogo modelirovaniya relaksacionno-vosstanovitelnyh processov polimernyh tekstil'nyh materialov). *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, No. 2 (398), pp. 285–291 (In Russian).

Zaritsky, B.P. and Ledeneva, I.N. (2014). Formability and form stability of shoes with felt uppers (Formuemość i formoustojčivost' obuvi s verhom iz vojloka). *Dizajn i tehnologii = Design and Technology*, No. 42 (84), pp. 33–38 (In Russian).

Kozlov, A.A. and Kiselyov, S.V. (2023). Development of methods for predicting the processes of reverse relaxation of polymer textile materials (Razrabotka metodov prognozirovaniya processov obratnoj relaksacii polimernyh tekstil'nyh materialov). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tehnologii i dizajna, Seriya 1: Estestvennye i tehničeskije nauki = Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design, Series 1: Natural and Technical Sciences*, No. 3, pp. 80–85 (In Russian).

Ledeneva, I.N. (2023). Analysis and empirical models of the results of half-cycle experiments with felts for shoe uppers (Analiz i empiricheskie modeli rezultatov poluciklovyykh eksperimentov s vojlokami dlya verha obuvi). *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, No. 5 (407), pp. 51–55 (In Russian).

Luchik, R.V. and Khomyak, N.E. (1979). Study of heat and moisture on relaxation properties and dimensional stability of artificial and synthetic leather (Vliyaniye tepla i vlagi na relaksatsionnye svoystva i formoustojchivost' iskusstvennykh i sinteticheskikh kozh). *Kozhevenno-obuvnaya promyshlennost' = Leather and Shoe industry*, No. 10, pp. 45–48 (In Russian).

Makarov, A.G., Pereborova, N.V., Egorova, M.A. and Egorov, I.M. (2017). Mathematical Modeling of Deformation-Relaxation Processes in Polymer Materials under Variable Temperature Conditions (Matematicheskoe modelirovaniye deformatsionno-relaksatsionnykh processov polimernykh materialov v usloviyakh peremennoy temperatury). *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, No. 4, pp. 287–292 (In Russian).

Makarov, A.G., Pereborova, N.V., Egorova, M.A. and Egorov, I.M. (2017). Development of Reliability Criteria for Predicting Deformation and Relaxation Processes in Polymer Materials (Razrabotka kriteriev dostovernosti prognozirovaniya deformatsionnykh i relaksatsionnykh processov polimernykh materialov). *Himicheskie volokna = Chemical Fibers*, No. 2, pp. 59–63 (In Russian).

Ostrovsky, K.Yu. and Ostrovsky, Yu.K. (2000). A method for assessing the relaxation parameters of the skin (Sposob ocenki relaksatsionnykh parametrov kozhi). *Kozhevenno-obuvnaya promyshlennost' = Leather and Shoe industry*, No. 5, pp. 42–43 (In Russian).

Pereborova, N.V. and Makarov, A.G. (2023). Verification of criteria for confidence prediction of relaxation of polymer textile materials (Proverka kriteriev doveritel'nogo prognozirovaniya relaksatsii polimernykh tekstil'nykh materialov). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna, Seriya 1: Estestvennyye i tekhnicheskie nauki = Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design, Series 1: Natural and Technical Sciences*, No. 3, pp. 80–85 (In Russian).

Pereborova, N.V., Wagner, V.I., Titova, M.N., Shikov, P.A., Stekolnikov, A.A., Klimova, N.S., Rudovsky, P.N., Odintsovo, A.S., Silakov, A.V. and Tikhomirova, S.A. (2024). Evaluation of the accuracy of forecasting the relaxation processes of polymer textile materials (Ocenka tochnosti prognozirovaniya processov relaksatsii polimernykh tekstil'nykh materialov). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoj promyshlennosti = News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, vol. 68, No. 4, pp. 88–92 (In Russian).

Rastenis, I.K. and Gutasuskas, M.M. (1972). Stress relaxation during spatial stretching of textile materials (Relaksatsiya naprjazhenij pri prostranstvennom rastjazhenii tekstil'nykh materialov). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoj promyshlennosti = News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, vol. 4, pp. 106–108 (In Russian).

Furashova, S.L., Gorbachik, V.E. and Skokov, P.I. (2008). Predicting the relaxation efforts of shoe materials (Prognozirovaniye relaksatsii usilij obuvnykh materialov). *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Vitebsk State Technological University*, Vol. 15, pp. 76–81 (In Russian).

Furashova, S.L., Gorbachik, V.E. and Skokov, P.I. (2010). Forecasting the relaxation capacity of material systems (Prognozirovaniye relaksatsionnoj sposobnosti sistem materialov). *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Vitebsk State University*, Issue 18, pp. 100–105 (In Russian).

Ledeneva, I.N. and Bokova, E.S. (2024). Analysis of the structure and shape stability of felt modified with synthetic latex. *Fibre Chemistry*, vol. 55, No. 5, January, 2024 [Russian Original No. 5, September – October, 2023] DOI 10.1007/s10692-024-10487-1, pp. 337–340.

Информация об авторах

Information about the authors

**Фурашова Светлана Леонидовна**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технология одежды и обуви», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: slt1966@mail.ru

**Милюшкова Юлия Валерьевна**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технология одежды и обуви», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: Julie-poste@ya.ru

**Svetlana L. Furashova**

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor at the Department "Clothes Shoes Design and Technology", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: slt1966@mail.ru

**Yuliya V. Miliushkova**

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor at the Department "Clothes Shoes Design and Technology", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: Julie-poste@ya.ru

## Применение теории простых чисел в построении комплексного показателя качества текстильных материалов с полимерным покрытием

Ю. И. Марущак, И. А. Петюль,  
Н. Н. Ясинская, В. С. Башметов

Витебский государственный технологический университет,  
Республика Беларусь

**Аннотация.** Классические подходы оценки, основанные на анализе множества единичных показателей, затрудняют комплексную оценку пригодности текстильных материалов с полимерным покрытием. В свою очередь, применение методов комплексирования через вычисление средневзвешенных оценок сопряжено с риском компенсации низких значений одних свойств за счет высоких значений других свойств, субъективизмом при назначении весовых коэффициентов и невозможностью обратного разложения показателя. Целью работы является разработка и обоснование метода построения комплексного показателя качества текстильных материалов с полимерным покрытием с применением теории простых чисел.

В соответствии с предлагаемой методикой каждому единичному показателю качества присваивается простое число. Преимуществом метода является замена субъективных весовых коэффициентов на ранжирование показателей по значимости. В зависимости от установленного порядка значимости показателям назначаются простые числа (наиболее значимому – большее простое число из выбранного ряда). Для перехода от абсолютных значений показателей качества к порядковым номерам градации разработаны шкалы. Комплексный показатель вычисляется как произведение простых чисел в степени, соответствующей порядковому номеру градации каждого единичного показателя. Для удобства сравнения и интерпретации предложено логарифмическое преобразование, позволяющее избежать больших чисел.

Предложенный метод обеспечивает обратное разложение комплексного показателя, позволяя восстановить исходные значения единичных показателей. Метод не требует назначения весовых коэффициентов, что повышает объективность оценки. На примере образцов тканей с полиуретановым покрытием продемонстрирована работоспособность метода. Для количественной оценки степени приближения  $i$ -го образца к эталону предлагается использовать показатель  $K_i$ , рассчитываемый как отношение логарифма  $i$ -го образца к логарифму эталонного образца.

Метод комплексной оценки качества на основе теории простых чисел является объективным, информативным и практически реализуемым. Он устраняет основные недостатки традиционных подходов и может быть рекомендован для использования.

**Ключевые слова:** комплексный показатель, качество, простые числа, квалиметрия, факторизация, логарифмическое преобразование, полиуретановое покрытие.

**Информация о статье:** поступила 14 марта 2026 года.

## Application of the theory of prime numbers in constructing a comprehensive quality indicator for textile materials with a polymer coating

Yulia I. Maruschak, Irina A. Petyul,  
Natalia N. Yasinskaya, Valery S. Bashmetov

Vitebsk State Technological University,  
Republic of Belarus

**Abstract.** Classic assessment approaches based on the analysis of multiple individual indicators complicate the comprehensive assessment of the suitability of polymer-coated textile materials. In turn, the use of aggregation methods based on the calculation of weighted averages is associated with the risk of compensating for low values of some properties by high values of others, subjectivity in assigning weighting factors, and the impossibility of reverse decomposing the indicator. The aim of this study is to develop and validate a method for constructing a comprehensive quality indicator for polymer-coated textile materials using the prime number theory.

According to the proposed methodology, each individual quality indicator is assigned a prime number. The advantage of this method is the replacement of subjective weighting factors with a ranking of indicators by significance. Based on the specified order of significance, indicators are assigned prime numbers (the most significant is assigned the highest prime number in the selected series). Scales have been developed to convert absolute values of quality indicators to ordinal gradation numbers. The comprehensive indicator is calculated as the product of prime numbers raised to the power corresponding to the ordinal gradation number of each individual indicator. For ease of comparison and interpretation, a logarithmic transformation is proposed to avoid large numbers.

The proposed method provides a reverse decomposition of the complex indicator, allowing the original values of individual indicators to be retrieved. The method does not require weighting factors, which increases the objectivity of the assessment. The method's effectiveness is demonstrated using polyurethane-coated fabric samples. To quantitatively assess the degree of approximation of the  $i$ th sample to the standard, it is proposed to use the  $K_i$  indicator, calculated as the ratio of the logarithm of the  $i$ th sample to the logarithm of the standard sample.

This comprehensive quality assessment method based on prime number theory is objective, informative, and feasible. It eliminates the main shortcomings of traditional approaches and can be recommended for use.

**Keywords:** comprehensive indicator, quality, prime numbers, quality metrics, factorization, logarithmic transformation, polyurethane coating.

**Article info:** received March 14, 2026.

## Введение

Появление новых текстильных материалов с полимерным покрытием сопровождается ростом требований к их качеству (Турусбекова Н.К., Суйналиева Б.Б., 2018), что делает объективную оценку потребительских свойств необходимым условием обеспечения надежности и конкурентоспособности таких материалов (Pustianu M. et al., 2022).

Традиционный подход к оценке качества текстильных материалов заключается в исследовании множества единичных показателей (Дарханова А.Т., Айтуленова К.Т., 2018). Однако полученный набор числовых характеристик зачастую сложно интерпретировать для принятия решения о пригодности материала, что затрудняет работу технологов при выборе образцов (Беликова В.Д. и др., 2025). Решением данной проблемы является переход от анализа единичных показателей к использованию комплексных оценок качества (Чагина Л.Л., 2015). В квалиметрии используются различные подходы к построению комплексных показателей качества (Шустов Ю.С. и др., 2016). Средневзвешенные арифметические показатели применяются, когда единичные показатели имеют одинаковую размерность или приведены к безразмерному виду, а также когда предполагается линейная компенсация между ними. Средневзвешенные геометрические показатели используются, когда нежелательна прямая компенсация (низкое значение одного показателя не может быть полностью скомпенсировано

высоким значением другого). Средневзвешенные гармонические показатели применяют при значительном разбросе значений единичных показателей и, если важно, чтобы не было низких значений ни по одному показателю (Лунькова С.В. и др., 2015; Рудовский П.Н. и др., 2006). Преимущество метода комплексной оценки заключается в наличии одной числовой итоговой оценки вместо нескольких (Добровольская Т.А., Маслова А.А., 2021).

Актуальность разработки комплексного показателя обусловлена необходимостью создания удобного инструмента для оценки качества тканей с полиуретановым покрытием. Наиболее распространенным подходом является подсчет комплексного показателя через вычисление средневзвешенного арифметического.

Несмотря на широкую распространенность, обусловленную простотой вычислений и интерпретации, применение средневзвешенного арифметического для оценки текстильных материалов сопряжено с рядом ограничений, которые ставят под сомнение достоверность результатов в ряде задач. Во-первых, недостатком является возможность компенсации низкого уровня одного показателя за счет высокого уровня другого. Например, низкая стойкость к истиранию полимерного слоя материала может быть скомпенсирована высокими показателями воздухопроницаемости и жесткости. В рамках требований к текстильным материалам, где отдельные свойства являются важными и регламенти-

руются нормативными документами, подобная компенсация приводит к необъективному завышению оценки и не позволяет выявить образцы, непригодные к эксплуатации по одному из параметров. Во-вторых, располагая значением комплексного показателя качества, полученного по существующим методикам, невозможно перейти от него к тому набору значений единичных показателей, которые использованы при его подсчете. Это ограничивает информативность показателя и обуславливает отказ от его применения во многих практических задачах.

Таким образом, несмотря на свою простоту, метод комплексирования через вычисление средневзвешенных оценок несет в себе риск потери информации о свойствах материала и усреднения важных свойств. Это обуславливает необходимость разработки и применения альтернативных методов комплексной оценки, лишенных указанных недостатков.

Целью работы является разработка и обоснование метода построения комплексного показателя качества текстильных материалов с полимерным покрытием с применением теории простых чисел.

### Объект и методы исследования

В качестве исследуемых образцов использовали хлопчатобумажные ткани саржевого переплетения с нанесенным на них пористым полиуретановым слоем одежного назначения (Республика Беларусь). Для исследования паропроницаемости материалов использован гравиметрический метод, реализованный с помощью анализатора влажности «Radwag» М-50 (Марущак Ю.И., Ясинская Н.Н., 2024). Воздухопроницаемость определяли в соответствии с ГОСТ 12088-77 «Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения воздухопроницаемости». Стойкость к истиранию определяли на приборе ДИТ-М (Кудринский С.В., Тюрин И.Н., 2022). Жесткость тканей с покрытием определяли на приборе ПЖУ-12М, при проведении измерений руководствовались ГОСТ 8977-74 «Кожа искусственная и пленочные материалы. Методы определения гибкости, жесткости и упругости». Жесткость материала проявляется в двух направлениях, однако для получения обобщенной характеристики использовано среднее арифметическое значений жесткости в продольном и поперечном направлении (Марущак Ю.И., Ясинская Н.Н., 2024).

Для комплексной оценки качества текстильных материалов с покрытием предложен метод, основанный на кодировании единичных показателей простыми чис-

лами.

Согласно основной теореме арифметики, любое целое натуральное число может быть единственным образом представлено как произведение целочисленных степеней простых чисел (Гриценко С.А., Шевцова М.В., 2011). То есть если  $Y$  – представляемое число, то его можно записать в виде

$$Y = 2^{x_1} \cdot 3^{x_2} \cdot 5^{x_3} \cdot 7^{x_4} \cdot \dots, \quad (1)$$

где 2, 3, 5, 7... – последовательно возрастающие простые числа, являющиеся основанием степени;  $X_i$  – значения целочисленных степеней простых чисел.

Традиционный подход к комплексной оценке качества требует назначения весовых коэффициентов, которые определяются экспертным путем, что вносит элемент субъективизма. Незначительное изменение весов (например, 0,4 вместо 0,35) может изменить итоговое ранжирование образцов, а результаты разных экспертных групп зачастую плохо воспроизводятся. Метод на основе простых чисел предполагает вместо численных весов использовать закрепление за каждым единичным показателем качества простого числа. При этом простые числа выступают как математически фиксированные веса через натуральные логарифмы.

Для закрепления простых чисел за единичными показателями предложено следующее правило, учитывающее относительную важность единичных показателей качества. Пусть  $i$  – количество единичных показателей качества, включенных в комплексную оценку. Тогда в качестве оснований степеней используются первые  $i$  простых чисел, взятых в порядке возрастания (2, 3, 5, 7, 11...). На основе нормативных требований, пожеланий заказчика или экспертного мнения показатели ранжируются по значимости. Наиболее значимому присваивается наибольшее простое число из выбранного ряда, наименее значимому – наименьшее простое число. При таком назначении изменения наиболее важного показателя вносят максимальный вклад в комплексный показатель. Выбор последовательных простых чисел обеспечивает воспроизводимость методики и позволяет легко масштабировать подход на любое количество показателей.

Проведенные ранее исследования (Марущак Ю.И., Ясинская Н.Н., Петюль И.А., 2023) позволили сформировать номенклатуру показателей качества тканей с полиуретановым покрытием и выделить среди них четыре наиболее значимых: воздухопроницаемость, паропро-

ницаемость, жесткость и стойкость к истиранию. В данном случае за каждым единичным показателем закрепляем простое число в соответствии с вышеописанным правилом: воздухопроницаемость  $V - 7$ , паропроницаемость  $P - 5$ , жесткость  $G - 3$ , стойкость к истиранию  $I - 2$ .

Для перехода от значений единичных показателей качества, выраженных в натуральных единицах или единицах физических величин, к целочисленным значениям предлагается следующий подход. Весь диапазон возможных значений показателя качества разбивается на интервалы, которым присваиваются порядковые номера градации. Для показателей, рост численных значений которых соответствует повышению качества (позитивные), ранжирование осуществляется по возрастающей шкале: наименьшему интервалу присваивается минимальный порядковый номер. В случае негативных показателей, где увеличение значения ведет к ухудшению свойства, применяется обратный порядок: наименьшему интервалу соответствует максимальный порядковый номер, а последующие интервалы получают убывающие порядковые номера. Количество порядковых номеров градации определяется требуемой точностью оценки и может варьироваться как для всего комплекса показателей, так и индивидуально для каждого из них.

Однако недостатком такого представления чисел является их громоздкость. Так, например, для случая первых трех последовательных простых чисел в степенях соответственно 12, 26 и 9 представляемое число равно

$$Y = 2^{12} \cdot 3^{26} \cdot 5^9 = 2033492662663200000000. \quad (2)$$

Использование величины  $Y$  для сравнительного анализа и статистической обработки связано с определенными трудностями, что обуславливает необходимость перехода к логарифмическому представлению полученного числа

$$\ln(Y) = (\ln 2) \cdot x_1 + (\ln 3) \cdot x_2 + (\ln 5) \cdot x_3 + \dots \quad (3)$$

Для задач сравнения и ранжирования объектов допустимы строго монотонные преобразования исходных показателей, поскольку они сохраняют порядок следования объектов. Функция  $y = \ln(x)$  является строго монотонно возрастающей на всей области определения  $x > 0$ . Следовательно, для любых двух образцов с показателями  $Y_1$  и  $Y_2$  справедливо

$$Y_1 > Y_2, \ln(Y_1) > \ln(Y_2). \quad (4)$$

Таким образом, ранжирование материалов по величине  $\ln(Y)$  эквивалентно ранжированию по исходному показателю  $Y$  [Корнеев В.П., 2019]. Переход к логарифму не меняет взаимного расположения объектов в рейтинге качества. Тогда комплексный показатель вычисляется по формуле

$$K = \exp(\ln Y). \quad (5)$$

В рассмотренном примере такой переход позволит получить комплексный показатель

$$\ln(2033492662663200000000) = (\ln 2) 12 + (\ln 3) 26 + (\ln 5) 9 = 51,37. \quad (6)$$

На сегодняшний день реализация подобных вычислений не представляет сложности, поскольку существуют стандартные программные средства, обеспечивающие как возведение чисел в степень, так и разложение числа на простые множители. При использовании предложенной модели для расчета комплексного показателя следует учитывать, что при изменении показателя степени каждого из простых чисел соответственно на единицу, разность между получаемыми комплексными показателями в логарифмическом виде составит постоянную величину, зависящую от количества простых чисел в исследуемом ряду (т. е. от числа показателей качества). Разность изменяется пропорционально числу, на которое изменяются показатели степеней простых чисел ряда. Например, при оценке объектов  $Y_1$  и  $Y_2$  по трем показателям, независимо от числового значения показателя степени, при увеличении его соответственно на один порядковый номер градации у всех показателей, разность между показателями  $\ln(Y_1) - \ln(Y_2)$  составит 3,4; при увеличении показателя степени у каждого основания соответственно на две единицы, разница  $\ln(Y_1) - \ln(Y_2)$  составит 6,8; на три единицы – 10,2. Для случая четырех, пяти и более показателей ситуация аналогична описанной для трех показателей, меняется лишь величина разности  $\ln(Y_1) - \ln(Y_2)$ . Принцип пропорционального ее изменения в зависимости от изменения на определенную величину соответствующих показателей сохраняется.

Абсолютные значения единичных показателей по разработанному шкалам переводятся в порядковые номера градации, которые являются показателями степеней простых чисел. Комплексный показатель вычисляется как логарифм произведения простых чисел, возведенных в соответствующий порядковый номер.

## Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Общий алгоритм вычисления комплексного показателя качества согласно основной теореме арифметики представлен на рисунке 1.

Важнейшим преимуществом такого метода определения комплексного показателя является возможность его однозначного обратного разложения (факторизации) для идентификации значений единичных показателей, на основе которых получен комплексный.

Для перехода от абсолютных значений показателей качества к порядковым номерам градации разработаны шкалы, представленные на рисунке 2. Диапазон изменения значений показателей качества назначен исходя из предварительных исследований, без учета требований и ограничений стандартов. Диапазон охватывает совокупность полученных экспериментальных данных с запасом. Количество интервалов, на которые разбита область изменения значений по каждому из выбранных показателей, следовательно, и количество порядковых номеров градации, принято одинаковым для всех показателей.

Особенностью метода является возможность выбора произвольного количества порядковых номеров града-

ции в зависимости от требуемой точности, увеличение числа порядковых номеров приведет к повышению чувствительности комплексного показателя. На практике единичные показатели качества материалов могут иметь неодинаковый диапазон значений и чувствительность к изменениям. Поэтому допускается индивидуальный выбор количества порядковых номеров градации для каждого показателя. Сравнение образцов между собой при этом остается корректным, поскольку шкала каждого свойства имеет собственные границы.

Для демонстрации предложенного метода рассмотрим процесс расчета комплексного показателя качества для трех образцов тканей с полиуретановым покрытием, отличающихся по своим свойствам. Значения единичных показателей и соответствующий порядковый номер (№) градации по шкале (рисунок 2) приведены в таблице 1.

Комплексные показатели для рассматриваемого примера, рассчитывают по формулам

$$Y_{01} = 7^6 \cdot 5^7 \cdot 3^8 \cdot 2^4 = 9,649 \times 10^{14}, \ln(Y_{01}) = 34,503, \quad (7)$$

$$Y_{02} = 7^1 \cdot 5^2 \cdot 3^{10} \cdot 2^2 = 4,133 \times 10^7, \ln(Y_{02}) = 17,537, \quad (8)$$

$$Y_{03} = 7^1 \cdot 5^2 \cdot 3^7 \cdot 2^2 = 1,530 \times 10^7, \ln(Y_{03}) = 14,241. \quad (9)$$

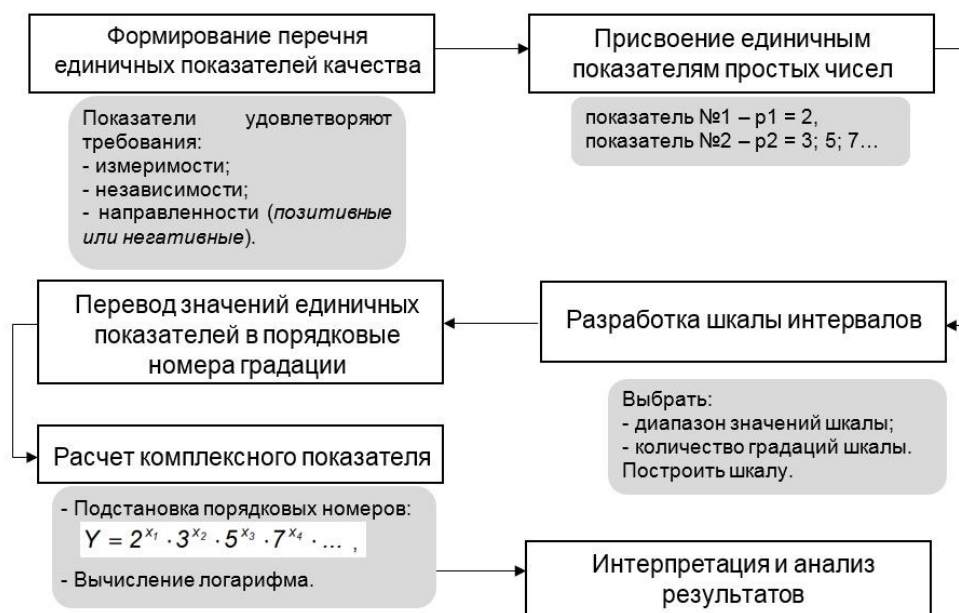
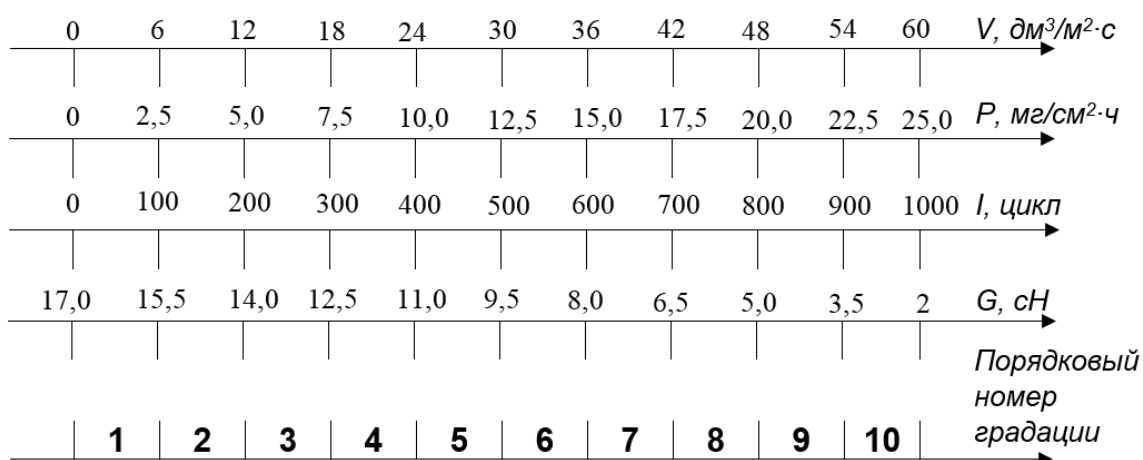


Рисунок 1 – Алгоритм вычисления комплексного показателя качества согласно основной теореме арифметики  
Figure 1 – Algorithm for calculating a complex quality indicator according to the fundamental theorem of arithmetic



*Рисунок 2 – Шкала показателей со шкалой вводимых порядковых номеров градации  
Figure 2 – A scale of indicators with a scale of entered ordinal gradation numbers*

*Таблица 1 – Значения единичных показателей и их порядковый номер градации  
Table 1 – Values of individual indicators and their rank*

Показатель	Значение показателя	№ градации	Значение показателя	№ градации	Значение показателя	№ градации
	Образец № 01		Образец № 02		Образец № 03	
Воздухопроницаемость, $dm^3/m^2 \cdot c$	32	6	4	1	0	1
Коэффициент паропроницаемости, $mg/cm^2 \cdot ч$	15,5	7	3,1	2	2,6	2
Средняя жесткость, сН	6,7	8	2,9	10	7,7	7
Стойкость к истиранию, цикл	333	4	129	2	198	2

В основе сравнения любых образцов заложено правило: чем больше значение комплексного показателя  $Y$ , тем выше уровень качества материала. Соответственно, чем больше значение  $\ln Y$ , тем выше уровень качества.

Необходимо также оценить, насколько каждый из образцов приближается к некоторому эталонному уровню. В качестве эталона может выступать как реальный образец, обладающий наилучшими характеристиками среди исследуемых, так и гипотетический «идеальный» материал, значения свойств которого соответствуют максимальным порядковым номерам градации. Для количественной оценки степени приближения  $i$ -го образ-

ца к эталону предлагается использовать показатель  $K_i$ , рассчитываемый по формуле:

$$K_i = \frac{\ln Y_i}{\ln Y_{\text{эТ}}} \quad (10)$$

где  $\ln Y_i$  – значение логарифмического комплексного показателя для  $i$ -го образца;  $\ln Y_{\text{эТ}}$  – значение логарифмического комплексного показателя для эталонного образца.

Данный коэффициент изменяется в пределах от 0 до 1. Чем ближе его значение к единице, тем выше качество образца и тем меньше его отставание от эталонно-

го уровня. Для примера расчета в качестве эталонного образца выбраны лучшие значения единичных показателей из исследуемого ассортимента материалов. Для него комплексный показатель примет вид:

$$Y_{эм} = 7^6 \cdot 5^7 \cdot 3^{10} \cdot 2^6 = 3,473 \times 10^{16}, \ln(Y_{эм}) = 38,087. \quad [11]$$

Результаты количественной оценки степени приближения *i*-го образца к эталону представлены в таблице 2.

Для удобства анализа может быть использована предложенная градация уровней качества (таблица 3).

Количественная оценка степени приближения исследуемых образцов к эталону (таблица 2) с использованием предложенной шкалы (таблица 3) позволяет сделать следующие выводы. Образец 01 имеет значение  $K = 0,91$ , что согласно шкале соответствует высокому уровню качества. Данный материал близок к эталону, сохраняет высокие потребительские свойства и может быть рекомендован для использования. Образцы 02 и 03 попадают в категорию неудовлетворительного качества. Эти материалы отстают по совокупности свойств от эталона и не могут быть рекомендованы для использования в изделиях, где предъявляются высокие требования к единичным показателям качества. Таким образом, предложенный подход позволяет не только ранжировать образцы, но и разделять материалы на пригодные и непригодные к применению на основе их степени приближения к эталонному уровню.

Предложенная шкала интерпретации значений коэффициента соответствия  $K$  не является жестко фиксированной и может корректироваться в зависимости от конкретных задач исследования или требований, предъявляемых к материалам. Например, если для изучаемого объекта установлено минимальное пороговое значение, ниже которого материал считается непригодным к использованию, именно эта величина может быть принята за нижнюю границу шкалы. В этом случае все образцы со значениями  $K$  ниже установленного порога автоматически относятся к категории несоответствующих требованиям, независимо от того, как они распределяются относительно предложенных ранее интервалов.

## Выводы

Разработан и обоснован метод комплексной оценки качества текстильных материалов с полиуретановым покрытием на основе простых чисел, который позволяет объединить множество разрозненных показателей в единый комплексный показатель. Благодаря использованию простых чисел в качестве оснований степеней обеспечена возможность однозначного обратного разложения комплексного показателя, что позволяет восстановить исходный набор единичных показателей. Это устраняет ограничение существующих методик построения комплексного показателя. В отличие от средневзвешенных методов, предложенный подход не требует назначения численных весовых коэффициен-

Таблица 2 – Результаты количественной оценки степени приближения к эталону

Table 2 – Results of quantitative assessment of the degree of approximation to the standard

Образец	$K_i$
01	0,91
02	0,46
03	0,37

Таблица 3 – Шкала для оценки показателя  $K$

Table 3 – Scale for assessing the  $K$  indicator

Значение $K$	Характеристика уровня качества
1,00–0,90	Высокий
0,89–0,70	Хороший
0,69–0,50	Удовлетворительный
менее 0,50	Неудовлетворительный

тов. Простые числа задают вес показателя через свои логарифмы, причем эти веса математически фиксированы и не требуют согласования численных значений. Присвоение порядкового номера градации показателей осуществляется через разработанные шкалы, что повышает объективность и воспроизводимость оценки качества. Переход к логарифмическому представлению показателя позволяет избежать больших чисел, сохраняя при этом порядок ранжирования объектов. Предложен коэффициент соответствия  $K_i$  и шкала оценки уровня качества, что делает метод пригодным для практическо-

го использования. На примере трех образцов тканей с полиуретановым покрытием показана работоспособность метода.

Таким образом, разработанный метод комплексной оценки качества на основе теории простых чисел является практически реализуемым. Метод обеспечивает возможность количественного сравнения образцов как между собой, так и с эталонным уровнем, а результаты вычислений легко интерпретируются и могут быть использованы для обоснованного выбора материалов на практике.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Беликова, В.Д., Шустов, Ю.С. и Плеханова, С.В. (2025). Комплексное исследование процесса износа огнестойких тканей от воздействия различных температур, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 6(420), С. 147–151.

Гриценко, С.А. и Шевцова, М.В. (2011). О распределении простых чисел в арифметических прогрессиях с разностью специального вида, *Прикладная математика & Физика*, 22 (5(100)), С. 17–38.

Дарханова, А.Т. и Айтуленова, К.Т. (2018). Исследование свойств ассортимента современной искусственной кожи для поясной одежды, *Вестник Алматинского технологического университета*, 4, С. 24–28.

Добровольская, Т.А. и Маслова, А.А. (2021). К вопросу комплексной оценки качества материалов для специальной одежды с использованием компьютерных технологий, *Костюмология*, 6(2), 9 с.

Корнеев, В.П. (2019). Оптимизационный метод выбора результирующего ранжирования объектов, представленных в ранговой шкале измерения, *Управление большими системами: сборник трудов*, 82, С. 44–60.

Кудринский, С.В. и Тюрин, И.Н. (2022). Исследование свойств и определение состава экоматериалов на основе растительной кожи, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 399, С. 81–85.

Лунькова, С.В., Лысова, М.А., Чистякова, Н.Э. и Гусев, Б.Н. (2015). Комплексная оценка чистоты текстильных нитей, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 2 (305), С. 27–31.

Марущак, Ю.И., Ясинская, Н.Н. и Петюль, И.А. (2023). Разработка номенклатуры показателей качества и оценка свойств экокож, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 404, С. 103–111.

Марущак, Ю.И. и Ясинская, Н.Н. (2024). Сравнительная оценка эргономических свойств тканей с полиуретановым покрытием, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2(48), С. 9–17.

Марущак, Ю.И. и Ясинская, Н.Н. (2024). Влияние внешних факторов на качественные показатели тканей с пористым полиуретановым покрытием, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 4(50), С. 49–58.

Рудовский, П.Н., Нуриев, М.Н. и Киселев, П.Н. (2006). Разработка комплексного показателя для оценки формы паковок крестовой мотки, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 5, С. 131–133.

Турусбекова, Н.К. и Суйналиева, Б.Б. (2018). Перспективные материалы в производстве изделий легкой промышленности, *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*, 1(45), С. 259–266.

Чагина, Л.Л. (2015). Методика комплексной оценки качества льняных трикотажных полотен для верхних изделий, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 6, С. 16–21.

Шустов, Ю.С., Давыдов, А.Ф. и Плеханова, С.В. (2016). *Экспертиза текстильных полотен: монография*. М.: МГУДТ, 216 с.

Pustianu, M., Popa, A., Barbu, I., Fogorasi, M. and Bucevschi, A. (2022). Estimation of quality level based on quality indicators, *Annals of the University of Oradea. Fascicle of Textiles, Leatherwork*, 23(2), pp. 51–58.

### REFERENCES

Belikova, V.D., Shustov, Yu.S. and Plekhanova, S.V. (2025). Complex study of the wear process of fire-resistant fabrics under the influence of various temperatures [Kompleksnoe issledovanie processa iznosa ognestojkih tkanej ot vozdejstviya razlichnyh temperatur], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 6(420), pp. 147–151 (in Russian).

Chagina, L.L. (2015). Methodology for comprehensive quality assessment of linen knitted fabrics for outerwear [Metodika kompleksnoj ocenki kachestva l'nyanyh trikotaznykh poloten dlya verhnih izdelij], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 6, pp. 16–21 (in Russian).

Darkhanova, A.T. and Aitulenova, K.T. (2018). Study of the properties of the range of modern artificial leather for waist clothing [Issledovanie svojstv assortimenta sovremennoj iskusstvennoj kozhi dlya pojasnoj odezhdy], *Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of the Almaty Technological University*, 4, pp. 24–28 (in Russian).

Dobrovol'skaya, T.A. and Maslova, A.A. (2021). On the issue of comprehensive quality assessment of materials for special clothing using computer technologies [K voprosu kompleksnoj ocenki kachestva materialov dlya special'noj odezhdy s ispol'zovaniem komp'yuternykh tekhnologij], *Kostyumologiya = Costume Design*, 6(2), 9 p. (in Russian).

Gritsenko, S.A. and Shevtsova, M.V. (2011). On the distribution of prime numbers in arithmetic progressions with a difference of a special form [O raspredelenii prostykh chisel v arifmeticheskikh progressiyah s raznost'yu special'nogo vida], *Prikladnaya matematika & Fizika = Applied Mathematics & Physics*, 22 (5(100)), pp. 17–38 (in Russian).

Korneenko, V.P. (2019). Optimization method for choosing the resulting ranking of objects presented in a rank scale of measurement [Optimizatsionnyj metod vybora rezul'tiruyushchego ranzhirovaniya ob'ektov, predstavlenykh v rangovoj shkale izmereniya], *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov = Management of large systems: a collection of works*, 82, pp. 44–60 (in Russian).

Kudrinsky, S.V. and Tyurin, I.N. (2022). Study of properties and determination of composition of eco-materials based on plant leather [Issledovanie svojstv i opredelenie sostava ekomaterialov na osnove rastitel'noj kozhi], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 399, pp. 81–85 (in Russian).

Lunkova, S.V., Lysova, M.A., Chistyakova, N.E. and Gusev, B.N. (2015). Comprehensive assessment of the purity of textile threads [Kompleksnaya ocenka chistoty tekstil'nykh nitej], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2(305), pp. 27–31 (in Russian).

Marushchak, Yu.I., Yasinskaya, N.N. and Petyul, I.A. (2023). Development of a nomenclature of quality indicators and evaluation of eco-leather properties [Razrabotka nomenklatury pokazatelej kachestva i ocenka svojstv ekokozh], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 404, pp. 103–111 (in Russian).

Marushchak, Yu.I. and Yasinskaya, N.N. (2024). Comparative assessment of ergonomic properties of fabrics with polyurethane coating [Sravnitel'naya ocenka ergonomicheskikh svojstv tkanej s poliuretanovym pokrytiem], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 2(48), pp. 9–17 (in Russian).

Marushchak, Yu.I. and Yasinskaya, N.N. (2024). Influence of external factors on the quality indicators of fabrics with porous polyurethane coating [Vliyaniye vneshnih faktorov na kachestvennye pokazateli tkanej s poristym poliuretanovym pokrytiem], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 4(50), pp. 49–58 (in Russian).

Pustianu, M., Popa, A., Barbu, I., Fogorasi, M. and Bucevschi, A. (2022). Estimation of quality level based on quality indicators, *Annals of the University of Oradea. Fascicle of Textiles, Leatherwork*, 23(2), pp. 51–58.

Rudovsky, P.N., Nuriev, M.N. and Kiselev, P.N. (2006). Development of a complex indicator for assessing the shape of cross-wound packages [Razrabotka kompleksnogo pokazatelya dlya ocenki formy pakovok krestovoj motki], *Izvestiya Vysshikh*

*Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 5, pp. 131–133 (in Russian).

Turusbekova, N.K. and Suynaliev, B.B. (2018). Promising materials in the production of light industry products [Perspektivnye materialy v proizvodstve izdelij legkoj promyshlennosti], *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova* = *News of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*, 1(45), pp. 259–266 (in Russian).

Shustov, Yu.S., Davydov, A.F. and Plekhanova, S.V. (2016). *Expertise of textile fabrics* [Ekspertiza tekstil'nyh poloten]: monograph. Moscow: MGUDT, 216 p. (in Russian).

### Информация об авторах

### Information about the authors

#### Марущак Юлия Игоревна

Аспирант, Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: tonk.00@mail.ru

#### Петюль Ирина Анатольевна

Кандидат технических наук, проректор по учебной работе, доцент кафедры «Техническое регулирование и товароведение», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: petyl@inbox.ru

#### Ясинская Наталья Николаевна

Доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Экология и химические технологии», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: yasinskaynn@rambler.ru

#### Башметов Валерий Степанович

Доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь.

#### Yulia I. Maruschak

Postgraduate Student, Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: tonk.00@mail.ru

#### Irina A. Petyul

Candidate of Sciences (in Engineering), Vice-Rector for Academic Affairs, Associate Professor at the Department "Technical Regulation and Commodity Science", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: petyl@inbox.ru

#### Natallia N. Yasinskaya

Doctor of Science (in Engineering), Associate Professor, Chair of the Department "Ecology and Chemical Technologies", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: yasinskaynn@rambler.ru

#### Valery S. Bashmetov

Doctor of Science (in Engineering), Professor, Republic of Belarus.

## Влияние температуры воздуха и многоциклового изгиба на уровень водонепроницаемости мембранных текстильных материалов

Е. И. Ивашко,  
А. Н. Буркин

*Витебский государственный технологический университет,  
Республика Беларусь*

**Аннотация.** Влагозащитные текстильные материалы с полимерным покрытием широко применяются для изготовления специальной одежды работников нефтяной, газовой, химической и других отраслей промышленности. В процессе эксплуатации такие материалы подвергаются комплексному воздействию механических нагрузок (многоциклового изгиба, растяжения, истирания) и факторов внешней среды (перепада температур, осадков, ультрафиолетового излучения). Совместное действие этих факторов приводит к постепенному снижению защитных свойств, в первую очередь – уменьшению уровня водонепроницаемости. В связи с этим актуальной задачей является оценка совместного влияния механического износа и факторов внешней среды на уровень водонепроницаемости.

Целью работы является определение влияния температуры воздуха и многоциклового изгиба на уровень водонепроницаемости текстильных материалов с покрытием для прогнозирования эксплуатационного срока носки изделия.

В качестве объектов исследования были выбраны два типа влагозащитных текстильных материалов с полиуретановым микропористым покрытием и с мембранным слоем производства ОАО «Моготекс» Республика Беларусь. Для определения изменения уровня водонепроницаемости влагозащитных текстильных материалов с покрытием после воздействия многоциклового изгиба при установленных параметрах температуры и влажности воздуха применялась методика исследования эксплуатационных свойств влагозащитных материалов в различных температурно-влажностных условиях. Для выявления совместного влияния температуры воздуха от +5 до +15 °С и количества циклов изгиба в диапазоне от 150 до 300 килоциклов на уровень водонепроницаемости исследуемых текстильных материалов с покрытием был проведён полный факторный эксперимент и получены экспоненциальные мультипликативные модели.

Полученные модели и установленные закономерности могут быть использованы для научно-обоснованного прогнозирования срока службы спецодежды в зависимости от климатических условий региона и интенсивности механических нагрузок.

**Ключевые слова:** влагозащитные материалы, водонепроницаемость, многоциклового изгиб, температура воздуха, регрессионная модель, специальная одежда.

**Информация о статье:** поступила 18 марта 2026 года.

## Influence of air temperature and multi-cycle bending on the level of waterproofness of membrane textile materials

Katsiaryna I. Ivashko,  
Alexander N. Burkin

*Vitebsk State Technological University,  
Republic of Belarus*

**Abstract.** Moisture-proof polymer-coated textile materials are widely used for the manufacture of special clothing for workers in the oil, gas, chemical and other industries. During operation, such materials are subjected to the complex effects of mechanical loads (multi-cycle bending, stretching, abrasion) and environmental factors (temperature fluctuations, precipitation, ultraviolet radiation). The combined effect of these factors leads to a gradual decrease in protective properties, primarily a decrease in the level of water resistance. In this regard, an urgent task is to assess the combined effect of mechanical wear and environmental factors on the level of water resistance.

The aim of the work is to determine the effect of air temperature and multi-cycle bending on the level of water resistance of coated textiles to predict the wear life of the product.

Two types of water-resistant textiles with a microporous polyurethane coating and a membrane layer, manufactured by Mogotex (Republic of Belarus), were selected as the objects of study. To determine the change in the water resistance of the water-resistant coated textiles after exposure to high-cycle bending at specified temperature and humidity parameters, a method for studying the performance properties of water-resistant materials under various temperature and humidity conditions was used.

To identify the combined effect of air temperature from +5 to +15 °C and the number of bending cycles in the range from 150 to 300 kilocycles on the water resistance level of the studied coated textile materials, a complete factorial experiment was conducted and exponential multiplicative models were developed.

The resulting models and patterns can be used for scientifically-based forecasting of the service life of workwear depending on the climatic conditions of the region and the intensity of mechanical loads.

**Keywords:** moisture-proof materials, water resistance, multi-cycle bending, air temperature, regression model, special clothing.

**Article info:** received March 18, 2026.

## Введение

Среди текстильных материалов, обладающих уникальными функциональными свойствами, особое место занимают влагозащитные материалы с полимерным покрытием [Lutz, C., Rödel, F. and Eibl, S., 2024; Yu, X. et al., 2024]. В отличие от водоотталкивающих пропиток, покрытия образуют защитный слой, обеспечивающий высокое сопротивление проникновению воды и устойчивость материала к внешним воздействиям [Панкевич Д.К., 2024].

Существуют два основных способа нанесения полимерного покрытия на текстильный материал [Пророкова Н.П., Кумеева Т.Ю. и Кириухин Д.П., 2025; Ташмухамедов Ф.Р. и Шардарбек М.Ш., 2019; Jay R. Ghonia et al., 2024]. Первый способ предусматривает нанесение полимерного состава (полиуретан, поливинилхлорид, акрилаты и др.) непосредственно на текстильный слой с использованием ракля, распыления или валика, после чего материал подвергают термофиксации. Второй, переносной, заключается в том, что покрытие сначала формируют на вспомогательной подложке, а затем переносят на текстильный слой под действием тепла и давления. Оба способа являются востребованными и применяются исходя из функционального назначения материалов.

Благодаря своим характеристикам влагозащитные материалы с покрытием широко используются для изготовления специальной одежды для нефтяной, газовой, химической и других отраслей промышленности [Зиятдинова Д.Р. и Абуталипова Л.Н., 2024; Метелева О.В., 2013].

Специальная одежда в процессе эксплуатации неизбежно подвергается воздействию целого ряда факторов, которые постепенно снижают её защитные свойства

[Padleckienė I. & Petrulis D., 2010]. Одной из основных причин влияющих на изменение свойств материалов является механический износ. Материалы, применяемые для изготовления специальной одежды, подвергаются таким видам воздействия, как трение, растяжение, изгиб и сжатие. В своих работах учёные отмечают значительное влияние изгиба на снижение уровня водонепроницаемости материалов с покрытиями [Zelová K. & Glombikova V., 2024; Ghezal I., et al., 2019]. Одновременно с механическим износом, на материал воздействуют факторы внешней среды. Ультрафиолетовое излучение, осадки и перепады температур запускают процессы разрушения полимеров. Эти процессы приводят к изменениям в структуре материала, что, в свою очередь, сказывается на его физических свойствах [Williams, J., 2017].

В реальных условиях эксплуатации изделия из защитных материалов подвергаются комплексному и одновременному воздействию нескольких факторов. Изучение совместного влияния механического износа и факторов внешней среды является одной из наиболее актуальных задач в области материаловедения. Поэтому в настоящее время в исследованиях используется комплексный подход к оценке износа, что позволяет максимально точно прогнозировать поведение материала в реальных условиях.

Таким образом, целью данной работы является определение влияния температуры воздуха и многоциклового изгиба на уровень водонепроницаемости текстильных материалов с покрытием для прогнозирования эксплуатационного срока носки изделия.

## Объекты исследований

В качестве объектов исследования были выбраны образцы влагозащитных материалов с полиуретановым микропористым покрытием (ПлПУМ) и мембранным слоем (ПлЛАМ), производства ОАО «Моготекс» (Республика Беларусь). Все образцы выработаны из полиэфирных нитей и имеют тканую основу, выполненную полотняным переплетением.

Характеристика исследуемых образцов представлена в таблице 1.

## Методы и средства исследований

Для определения изменения уровня водонепроницаемости влагозащитных текстильных материалов с покрытием после воздействия многоциклового изгиба при установленных параметрах температуры и влажности воздуха применяли методику исследования эксплуатационных свойств влагозащитных материалов в различных температурно-влажностных условиях (Ивашко, 2021). Методика распространяется на влагозащитные материалы и изделия из них, содержащие полимерный слой, за исключением материалов, в которых содержатся токопроводящие компоненты. Данная методика может быть использована на различных стадиях изготовления продукции, а также при контроле ее качества и заключается в моделировании циклического изгиба при создании определенных климатических условий в течение определенного времени и оценке изменения уровня водонепроницаемости материала после снятия нагрузки.

Для испытания в качестве образцов используют пробы без видимых повреждений. Из материала вырезают три элементарные пробы прямоугольной формы размером 50 мм × 90 мм. Их располагают в зажимах рабочего блока установки для испытания полимерных материалов, схема которого представлена на рисунке 1 следующим образом: пробу сгибают вдоль средней линии лицевой поверхностью внутрь и один конец пробы

вставляют до упора в подвижный зажим и закрепляют винтом (рисунок 2а). Свободный конец пробы выворачивают лицевой поверхностью наружу (рисунок 2б) и без натяжения закрепляют в неподвижном зажиме (рисунок 2в). После этого включают рабочий блок 8 установки и проверяют правильность закрепления элементарных проб. При правильной заправке элементарные пробы формируют бегущую складку, концы зажимов 10 не упираются в материал пробы, а направляют складку, не натягивая и не деформируя её.

Выключают рабочий блок 8 установки, закрывают климатическую камеру 7 и задают температуру и влажность воздуха, соответствующие условиям эксплуатации материалов. По достижении заданных параметров включают рабочий блок 8 установки, приводя в движение подвижные зажимы 10 с элементарными пробами.

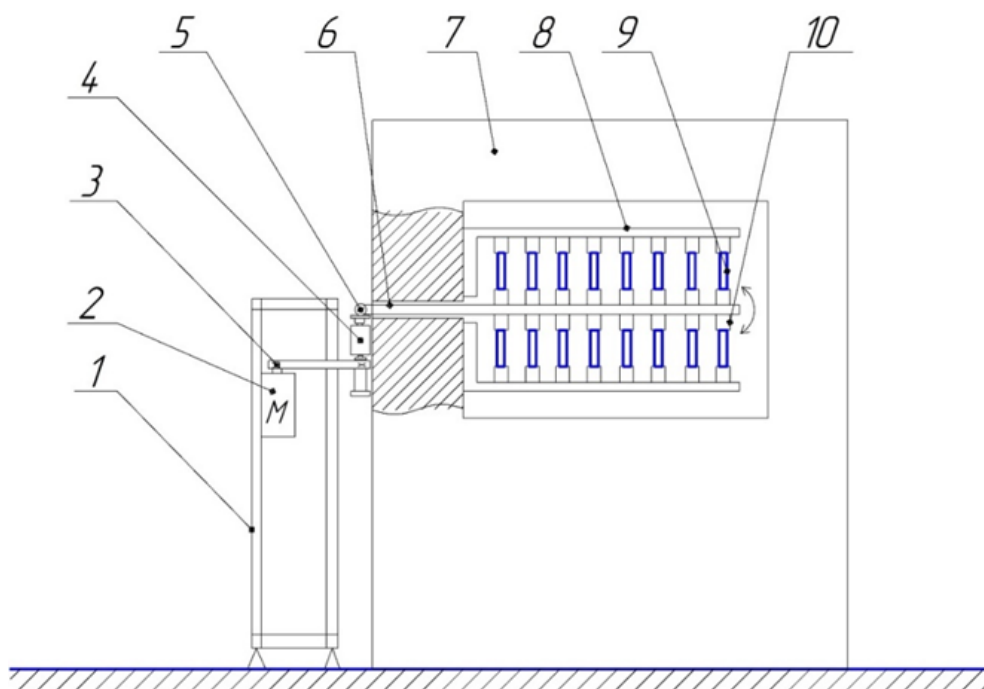
После окончания испытаний пробы вынимают из зажимов 10 установки и проводят измерение водонепроницаемости в центральной части элементарной пробы.

Уровень водонепроницаемости измеряют в трех точках пробы с помощью прибора для оценки водозащитных свойств методом гидростатического давления (Буркин А.Н. и др., 2021), схема которого представлена на рисунке 3.

Для определения водонепроницаемости необходимо в измерительную ячейку 1, установленную на диэлектрической пластине 2, залить воду в объеме, обеспечивающем формирование выпуклого мениска. Расположить испытуемый материал лицевой стороной к воде и накрыть крышкой 3 с кольцевой резиновой накладкой. С помощью переключателя 7 включить устройство 6 светозвуковой индикации проникания воды, активируя источник питания. Удерживая прибор за стойку 5, вращением ручки 4 зажима образца прижать крышку 3 с кольцевой резиновой накладкой к измерительной ячейке 1. Плавным последовательным вращением ручек 12 регулировки давления создать необходимое гидроста-

Таблица 1 – Характеристика исследуемых образцов  
Table 1 – Characteristics of the studied samples

Артикул	Способ нанесения покрытия	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Число нитей на 10 см		Толщина, мм	Водонепроницаемость, кПа
			по основе	по утку		
ПлПУМ	наносной	142	538	498	0,20	8
ПлЛАМ	переносной	134	504	346	0,19	100



1 – стойка, 2 – электродвигатель, 3 – клиноременная передача, 4 – редуктор,  
5 – кривошипно-коромысловый механизм, 6 – техническое отверстие, 7 – климатическая камера,  
8 – рабочий блок, 9 – элементарная проба образца материала, 10 – зажим

Рисунок 1 – Схема установки для испытания полимерных материалов  
Figure 1 – Scheme of the setup for testing polymeric materials

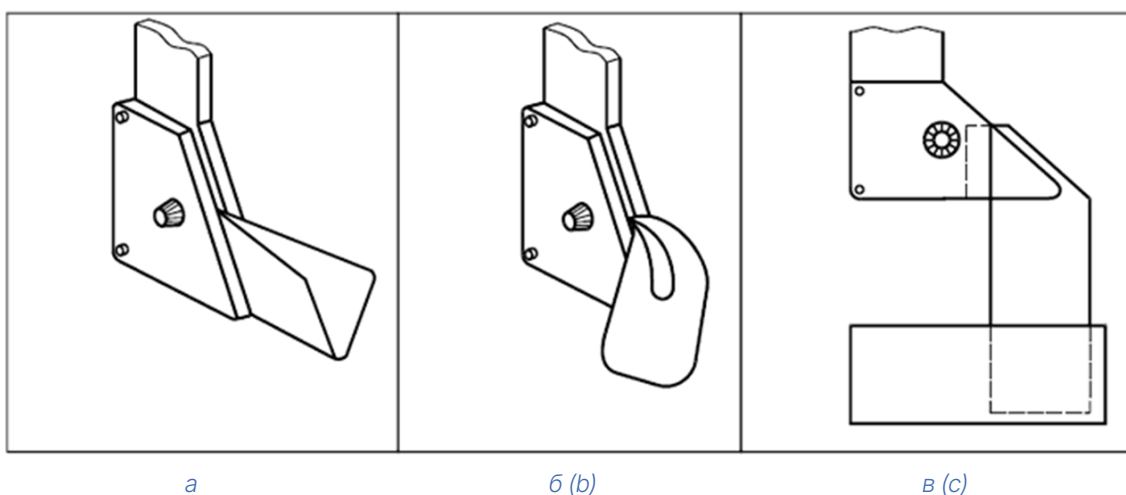
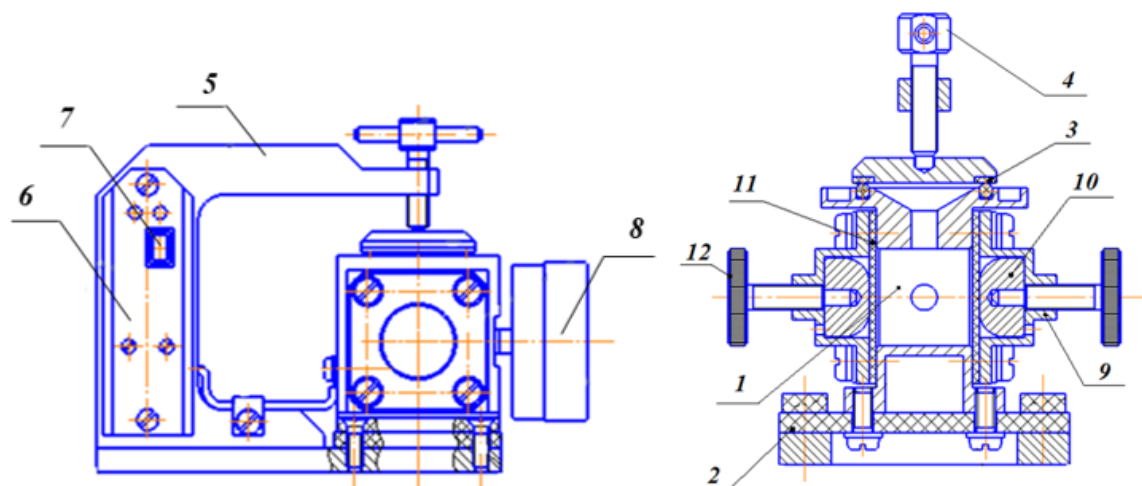


Рисунок 2 – Схема закрепления элементарных проб  
Figure 2 – Scheme of fixing elementary samples



1 – измерительная ячейка (корпус); 2 – диэлектрическая пластина;  
3 – крышка с резиновой накладкой и встроенным датчиком воды; 4 – ручка зажима образца;  
5 – стойка; 6 – светозвуковой индикатор промокания; 7 – переключатель; 8 – манометр;  
9 – щека упора; 10 – упор; 11 – мембрана; 12 – ручки регулировки давления

Рисунок 3 – Схема прибора для определения водозащитных свойств материалов методом гидростатического давления

Figure 3 – Scheme of the device for determination of waterproof properties of materials by hydrostatic pressure method

тическое давление в измерительной ячейке 1 путем воздействия на упоры 10, закрепленные щеками 9 упоров и прогибающие мембраны 11. Объем измерительной ячейки 1 уменьшается, а гидростатическое давление в ней повышается и вода под давлением воздействует на испытуемый материал. В момент появления воды на обратной стороне испытуемого материала электрическая цепь замыкается и срабатывает устройство 6 светозвуковой индикации проникания воды. Величина гидростатического давления в измерительной ячейке 1 определяется по манометру 8.

### Результаты исследований

Для определение влияния температуры воздуха и многоциклового изгиба на уровень водонепроницаемости текстильных материалов с покрытием (таблица 1), используемых для изготовления специальной одежды, были определены диапазон и интервалы варьирования управляемых факторов исходя из требований ГОСТ Р 124.288-2013 «Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная для защиты от воды.

Технические требования»<sup>1</sup> и климатическими условиями региона эксплуатации [Михеева А.И., 2013]. Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 2.

Для выявления совместного влияния температуры воздуха ( $T$ , °C) и количества циклов изгиба [ $N$ , тыс. циклов] на уровень водонепроницаемости ( $W$ , кПа) исследуемых текстильных материалов с покрытием был проведен полный факторный эксперимент. На основе анализа литературных источников (Padleckienė I. & Petrulis D., 2010; Панкевич Д.К. и Цуран А.А, 2017) в качестве базовой была выбрана экспоненциальная мультипликативная модель. Оценка параметров модели проводилась с использованием программного пакета «gretl». Для каждого типа материала по экспериментальным данным были рассчитаны коэффициенты модели. Уравнения регрессии для материалов с полиуретановым микропористым покрытием (ПлПУМ) и мембранным слоем (ПлЛАМ) имеет вид (1–2).

<sup>1</sup> Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная для защиты от воды. Технические требования: ГОСТ Р 124.288-2013. – Введ. 01.12.2014. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 9 с.

$$W_{\text{ПлПУМ}} = 8,153 \cdot \exp^{(-0,008N+0,0003N \cdot T)} \quad (1)$$

$$W_{\text{ПлЛАМ}} = 116,058 \cdot \exp^{(-0,0024N)(0,857+0,0143 \cdot T)} \quad (2)$$

Качество полученных моделей оценивали по скорректированному коэффициенту детерминации. Для материала ПлПУМ  $R^2 = 0,98$ , для ПлЛАМ  $R^2 = 0,96$ , что подтверждает высокую адекватность экспоненциальных моделей экспериментальным данным.

#### Анализ результатов

Оба исследуемых материала в исходном состоянии (таблица 1) имеют высокий уровень водонепроницаемости, соответствующий требованиям ГОСТ Р 124.288-2013 «Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная для защиты от воды. Технические требования»<sup>1</sup> и Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты»<sup>2</sup>. После моделирования эксплуатационных нагрузок защитные свойства материалов претерпевают существенные изменения, что отражается на их уровне водонепроницаемости.

Материал ПлЛАМ сохраняет водонепроницаемость на уровне значительно превышающем минимальные требования ГОСТ Р 124.288-2013 для 3-го класса защиты

<sup>2</sup> ТР ТС 019/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности средств индивидуальной защиты» (с изменениями на 27 ноября 2019 года) - принят решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года.

(от 7 кПа) и ТР ТС 019/2011 (не менее 2 кПа), тогда как материал ПлПУМ, имеющий значительно более низкие начальные значения уровня водонепроницаемости, после многоциклового изгиба почти полностью теряет защитные свойства.

#### Вывод

Установлено, что совместное действие многоциклового изгиба в диапазоне от 150 до 300 килоциклов и температуры воздуха от +5 до +15 °С приводит к экспоненциальному снижению водонепроницаемости исследуемых материалов. Полученные регрессионные модели позволяют прогнозировать водонепроницаемость в заданном диапазоне эксплуатационных параметров.

Многоциклового изгиб является преобладающим фактором снижения водонепроницаемости для обоих типов материалов. Однако степень его влияния существенно выше для материалов с полиуретановым микропористым покрытием. При увеличении циклов изгиба водонепроницаемость образца ПлПУМ снижается в среднем на 52 %, тогда как для ПлЛАМ это падение составляет порядка 31 %.

Температура воздуха также оказывает заметное влияние, но более выраженный эффект оказывает на образец ПлЛАМ.

Полученные модели и установленные закономерности могут быть использованы для научно-обоснованного прогнозирования срока службы спецодежды в зависимости от климатических условий региона и интенсивности механических нагрузок.

Таблица 2 – Матрица планирования эксперимента  
Table 2 – Experimental design matrix

№ п/п	T, температура воздуха, °С	N, количество циклов изгиба, килоциклы	W, водонепроницаемость образца ПлПУМ после воздействия, кПа	W, водонепроницаемость образца ПлЛАМ после воздействия, кПа
1	5	150	3	75
2	10	150	4	80
3	15	150	5	85
4	5	225	2	65
5	10	225	3	70
6	15	225	4	75
7	5	300	1	50
8	10	300	2	55
9	15	300	3	60

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Буркин, А.Н., Панкевич, Д.К., Ивашко, Е.И. и Терентьев, А.А. (2021). Прибор для определения водозащитных свойств материалов методом гидростатического давления, патент РБ № 12855, МПК G01N15/08, заявлено 2021.10.15, опубликовано 30.04.2022, Бюл. № 2.

Зиятдинова, Д.Р. и Абуталипова, Л.Н. (2024). Исследование эксплуатационных свойств текстильных материалов с защитной отделкой. *Костюмология*, Т. 9, № 4.

Ивашко, Е.И. (2021). Разработка методики исследования эксплуатационных свойств мембранных текстильных материалов. Сборник научных работ студентов Республики Беларусь «НИРС 2020». с. 88–93.

Метелева, О.В. (2013). *Исследование водозащитных свойств швейных изделий*. Иваново: ИГТА, Российская Федерация.

Михеева, А.И. (2013). Географическое распределение температуры воздуха в Беларуси. *Сборник докладов Республиканской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Инновации в технике и технологии дорожно-транспортного комплекса». Секция «Дорожная климатология»*. Том 1, с. 116–138.

Панкевич, Д.К. (2024). Рекомендации по области применения и исследованию свойств водозащитных многофункциональных текстильных материалов для одежды. *Костюмология*, Т. 9, № 4.

Панкевич, Д.К. и Цуран, А.А. (2017). Влияние многоцикловых механических нагрузок на водонепроницаемость материалов для водозащитной одежды. *Материалы докладов 50-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов посвящённой году науки*. Том 2, с. 169–172.

Пророкова, Н.П., Кумеева, Т.Ю. и Кирюхин, Д.П. (2025). Гидрофобизация полиэфирных тканей с использованием теломеров тетрафторэтилена. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 1 (51), с. 101–110.

Ташмухамедов, Ф.Р. и Шардарбек, М.Ш. (2019). Золь-гель способ фиксации в получении гидрофобного покрытия. *Наука и новые технологии*, № 2 (140). с. 99–108.

Ghezal Imene, Moussa Ali, Imed Ben Marzoug, Ahmida el achari, Christine Campagne and Sakli Faouzi (2019). Evaluating the Mechanical Properties of Waterproof Breathable Fabric Produced by a Coating Process. *Clothing and Textiles Research Journal*. Vol. 37, No. 4

Jay R. Ghonia, Nidhi G. Savani, Vimalkumar Prajapati and Bharatkumar Z. Dholakiya (2024). A review on polyurethane based multifunctional materials synthesis for advancement in textile coating applications. *Journal of Polymer Research*, Vol. 31, No. 3.

Lutz, C., Rödel, F. and Eibl, S. (2024). Comparison of ePTFE membranes with fluorine-free alternatives considering durability of laminated fabrics. *Textile Research Journal*. Vol. 94, No. 23–24.

Padleckienė, I. and Petrulis, D. (2010). Monitoring Flexing Fatigue Damage in the Coating of a Breathable-Coated Textile. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, Vol. 18, No. 2 (79), pp. 73–77.

Williams, J. (2017). *Waterproof and Water Repellent Textiles and Clothing*. Cambridge: The Textile Institute, England.

Yu, X., Wu, W., Xu, G., Wang, L., Yu, H., Kan, C.W., Yan, J., Wang, X., Wang, Z., Wu, Y., Wen, L. and Zhou, Q. (2024). Thermostable, water-repellent, moisture-permeable Nomex nanofibrous membranes with a connected PTFE network for personal protective fabrics. *Colloid and Interface Science Communications*. Vol. 60, 100782.

Zelová, K. and Glombikova, V. (2024). The effect of cyclic wrinkling on the durability of waterproof breathable functional outdoor materials for sportswear. *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 116, No. 1, pp. 1–14.

## REFERENCES

- Burkin, A.N., Pankevich, D.K., Ivashko, E.I. and Terent'ev, A.A. (2021). Pribor dlya opredeleniya vodozashchitnykh svoystv materialov metodom gidrostaticheskogo davleniya, patent RB № 12855, MPK G01N15/08, zayavleno 2021.10.15, opublikovano 30.04.2022, Byul. № 2 (In Russian).
- Ziyadinova, D.R. and Abutalipova, L.N. (2024). Investigation of performance properties of textile materials with protective finish [Issledovanie ekspluatatsionnykh svoystv tekstil'nykh materialov s zashchitnoy otelkoy]. *Kostyumologiya = Costumology*, Vol. 9, No. 4 (In Russian).
- Ivashko, E.I. (2021). Development of a methodology for studying the performance properties of membrane textile materials [Razrabotka metodiki issledovaniya ekspluatatsionnykh svoystv membrannykh tekstil'nykh materialov]. *Sbornik nauchnykh rabot studentov Respubliki Belarus' «NIRS 2020» = Collection of scientific works of students of the Republic of Belarus "NIRS 2020"*, pp. 88–93 (In Russian).
- Metel'eva, O.V. (2013). *Issledovanie vodozashchitnykh svoystv shvejnykh izdelij* [Study of waterproof properties of garments] monograph. Ivanovo: IGTA, Russian Federation (In Russian).
- Mikheeva, A.I. (2013). Geographical distribution of air temperature in Belarus [Geograficheskoe raspredelenie temperatury vozdukh v Belarusi]. *Sbornik dokladov Respublikanskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii aspirantov, magistrantov i studentov «Innovatsii v tekhnike i tekhnologii dorozhno-transportnogo kompleksa» = A collection of papers from the Republican Scientific and Technical Conference of Postgraduate, Master's, and Undergraduate Students «Innovations in Engineering and Technology of the Road Transport Complex»*, Vol. 1, pp. 116–138 (In Russian).
- Pankevich, D.K. (2024). Recommendations on the application and investigation of water-protective multifunctional textile materials for clothing [Rekomendatsii po oblasti primeneniya i issledovaniyu svoystv vodozashchitnykh mnogofunktsional'nykh tekstil'nykh materialov dlya odezhdy]. *Kostyumologiya = Costumology*, Vol. 9, No. 4 (In Russian).
- Pankevich, D.K. and Tsuran, A.A. (2017). Influence of multi-cycle mechanical loads on the water permeability of materials for water-protective clothing [Vliyanie mnogotsiklovyykh mekhanicheskikh nagruzok na vodonepronitsaemost' materialov dlya vodozashchitnoy odezhdy]. *Materialy dokladov 50-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavatelej i studentov posvyashchyonnoj godu nauki = Proceedings of the 50th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students Dedicated to the Year of Science*. Vol. 2, pp. 169–172. (In Russian).
- Prorokova, N.P., Kumeeva, T.Yu. and Kiryukhin, D.P. (2025). Hydrophobization of polyester fabrics using tetrafluoroethylene telomers [Gidrofobizatsiya poliefirnykh tkaney s ispol'zovaniem telomerov tetraftoretilena]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Vitebsk State Technological University*, No. 1 (51), pp. 101–110 (In Russian).
- Tashmukhamedov, F.R. and Shardarbek, M.Sh. (2019). Sol-gel fixation method for obtaining a hydrophobic coating [Zol'-gel' sposob fiksatsii v poluchenii gidrofobnogo pokrytiya]. *Nauka i novye tekhnologii = Science and New Technologies*, No. 2 (140), pp. 99–108 (In Russian).
- Ghezal Imene, Moussa Ali, Imed Ben Marzoug, Ahmida el achari, Christine Campagne and Sakli Faouzi (2019). Evaluating the Mechanical Properties of Waterproof Breathable Fabric Produced by a Coating Process. *Clothing and Textiles Research Journal*. Vol. 37, No. 4
- Jay R. Ghonia, Nidhi G. Savani, Vimalkumar Prajapati and Bharatkumar Z. Dholakiya (2024). A review on polyurethane based multifunctional materials synthesis for advancement in textile coating applications. *Journal of Polymer Research*, Vol. 31, No. 3.
- Lutz, C., Rödel, F. and Eibl, S. (2024). Comparison of ePTFE membranes with fluorine-free alternatives considering durability of laminated fabrics. *Textile Research Journal*. Vol. 94, No. 23–24.
- Padleckienė, I. and Petrušis, D. (2010). Monitoring Flexing Fatigue Damage in the Coating of a Breathable-Coated Textile. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, Vol. 18, No. 2 (79), pp. 73–77.

Williams, J. (2017). *Waterproof and Water Repellent Textiles and Clothing*. Cambridge: The Textile Institute, England.

Yu, X., Wu, W., Xu, G., Wang, L., Yu, H., Kan, C.W., Yan, J., Wang, X., Wang, Z., Wu, Y., Wen, L. and Zhou, Q. (2024). Thermostable, water-repellent, moisture-permeable Nomex nanofibrous membranes with a connected PTFE network for personal protective fabrics. *Colloid and Interface Science Communications*. Vol. 60, 100782.

Zelová, K. and Glombikova, V. (2024). The effect of cyclic wrinkling on the durability of waterproof breathable functional outdoor materials for sportswear. *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 116, No. 1, pp. 1–14.

### Информация об авторах

### Information about the authors

#### Ивашко Екатерина Игоревна

Магистр технических наук, начальник отдела «Испытательный центр», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: ivashkokatrinka@mail.ru

#### Буркин Александр Николаевич

Доктор технических наук, профессор кафедры «Техническое регулирование и товароведение», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: trt@vstu.by

#### Katsiaryna I. Ivashko

Master of Technical Sciences, Head of the Department «Testing Center», Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: ivashkokatrinka@mail.ru

#### Alexander N. Burkin

Doctor of Science (in Engineering), Professor of the Department "Technical Regulation and Commodity Science", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: trt@vstu.by

**Моделирование и прогнозирование потребительских свойств тканей с полиуретановым покрытием****Ю. И. Марущак, Н. Н. Ясинская,  
А. Н. Бизюк, А. А. Кузнецов***Витебский государственный технологический университет,  
Республика Беларусь*

**Аннотация.** В статье представлены результаты моделирования и прогнозирования потребительских свойств тканей с пористым полиуретановым покрытием одежного назначения. Объектом исследования являлись хлопчатобумажные ткани саржевого переплетения с нанесенным на них шаберным способом полиуретановым покрытием. В результате проведения двухфакторного эксперимента при варьировании кратности пены (1,5–2,5), величины зазора между опорным валом и шабером (0,3–0,7 мм), а также температуры (60–100 °С) и продолжительности сушки (180–300 с) получены математические модели, адекватно описывающие зависимости воздухопроницаемости, паропроницаемости, жесткости и стойкости к истиранию от технологических режимов формирования покрытия. Установлено, что увеличение зазора повышает воздухопроницаемость и жесткость, а рост кратности пены снижает жесткость и стойкость к истиранию. Рекомендуемыми параметрами для производства тканей с полиуретановым покрытием, предназначенных для одежды второго слоя, являются кратность пены 2,0 и зазор 0,5 мм. Установлено, что увеличение температуры и длительности сушки приводит к росту жесткости материала вследствие уплотнения полимерной структуры, при этом максимальная стойкость к истиранию достигается в области 80–90 °С и 300 с. Наибольшая воздухопроницаемость (до 32,8  $\text{dm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{с})$ ) наблюдается при минимальных температуре и времени, а максимум паропроницаемости (11,2  $\text{mg}/(\text{см}^2\cdot\text{ч})$ ) при средних температурах и увеличенной продолжительности сушки.

На основе полученных уравнений регрессии решена обратная задача – определены технологические параметры по заданным единичным показателям качества. Экспериментальная проверка подтвердила адекватность моделей, относительная погрешность прогнозирования не превысила 5 %. Результаты могут быть использованы при проектировании тканей с полиуретановым покрытием с заданными гигиеническими и эксплуатационными свойствами.

**Ключевые слова:** полиуретановое покрытие, вспененная композиция, сушка, прогнозирование свойств, математическое моделирование, шаберный способ.

**Информация о статье:** поступила 24 марта 2026 года.

**Modeling and forecasting consumer properties of fabrics with polyurethane coating****Yulia I. Maruschak, Natallia N. Yasinskaya,  
Andrey N. Bizyuk, Andrey A. Kuznetsov***Vitebsk State Technological University,  
Republic of Belarus*

**Abstract.** This article presents the results of modeling and predicting the consumer properties of fabrics with a porous polyurethane coating for clothing. The study involved cotton twill fabrics with a polyurethane coating applied using a doctor blade. A two-factor experiment, involving varying foam expansion ratio (1.5–2.5), gap size between the support roller and doctor blade (0.3–0.7 mm), temperature (60–100 °C), and drying time (180–300 s), resulted in the development of mathematical models that adequately describe the dependence of air permeability, vapor permeability, rigidity, and abrasion resistance on the coating formation process conditions. It was found that increasing the gap increases air permeability and rigidity, while increasing foam expansion ratio reduces rigidity and abrasion resistance. The recommended parameters for the production of polyurethane-coated fabrics intended for second-layer clothing are a foam expansion ratio of 2.0 and a gap of 0.5 mm. It was found that increasing the drying temperature and duration leads to an increase in material stiffness due to the compaction of the polymer structure, with maximum abrasion resistance achieved at 80–90 °C and 300 s. The highest air permeability (up to 32.8  $\text{dm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ) is observed at minimum temperature and drying time, and the maximum vapor permeability (11.2  $\text{mg}/(\text{sm}^2\cdot\text{h})$ ) is achieved at moderate temperatures and increased drying duration.

Based on the resulting regression equations, an inverse problem was solved: process parameters were determined based on specified individual quality indicators. Experimental testing confirmed the adequacy of the models, with the relative prediction error not exceeding 5 %. The results can be used in the design of polyurethane-coated fabrics with specified hygienic and performance properties.

**Keywords:** polyurethane coating, foam composition, drying, properties prediction, mathematical modeling, scraping method.

**Article info:** received March 24, 2026.

### Введение

Одним из перспективных направлений развития легкой промышленности является расширение ассортимента отечественных текстильных материалов, способных конкурировать с импортными аналогами (Вишневецкая О.В., 2016). На сегодняшний день значительная доля современных материалов с полимерным покрытием, известных как экокожа, предназначенных для пошива одежды, ввозится из-за рубежа (Марущак Ю.И., Ясинская Н.Н., Скобова Н.В., 2023). В соответствии с этим разработка и совершенствование технологий получения тканей с полиуретановым покрытием является актуальным направлением, отвечающим стратегии импортозамещения (Ясинская Н.Н., Марущак Ю.И., Скобова Н.В., 2024).

Потребительские свойства тканей с полиуретановым покрытием определяются комплексом факторов: типом текстильной основы, природой полимерного связующего, а также технологическими параметрами нанесения и сушки покрытия. Варьирование данных параметров позволяет формировать материал с заданными свойствами. Поскольку рассматриваемые материалы предназначены для изготовления одежды второго слоя, приоритетными показателями качества являются воздухо- и паропроницаемость, обеспечивающие комфорт при носке, а также жесткость и стойкость к истиранию, определяющие формоустойчивость и долговечность изделий. Для управления технологическим процессом требуется установление зависимостей между входными факторами и выходными показателями. Это достигается методами математического моделирования.

Моделированием и прогнозированием свойств комбинированных текстильных материалов, в том числе с полимерными покрытиями занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Особый вклад в эту область внесли работы Шустова (Шустов Ю.С., 2003), Когана, Ясинской (Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И., Коган А.Г., 2015), Рыклина (Карнилов М.С., Рыклин Д.Б., 2024), Павутницкого (Павутницкий В.В., 2004; Старков, А.И. и др.,

2016), Киселева (Киселев А.М., 2010). Среди зарубежных исследователей следует отметить работы Чаттерджи, связанные с прогнозированием долговечности полиуретановых покрытий при атмосферных воздействиях (Chatterjee U., Patra S., Butola B.S., Joshi M., 2024). Однако большинство существующих работ ориентированы либо на использование поливинилхлоридных композиций, либо на текстильные материалы с покрытиями технического назначения (Gadeikyte A., Abraitiene A., Barauskas R., 2021; Goessens T., De Staelen R., Constaes D., 2015; Liu, J., et al., 2023). Получение тканей с полиуретановым покрытием одежного назначения с использованием вспененных композиций изучено в меньшей степени, а исследования зарубежных исследователей опираются на местную сырьевую базу, специфичные полимерные композиции и технологические процессы, которые отличаются от тех, что формируются и внедряются в Беларуси. Этот факт создает дополнительную актуальность исследования.

Особый интерес представляет технология получения таких материалов с использованием вспененных полимерных композиций (Теркалова Л.О., Павутницкий В.В., 2005; Kentta, E. et al., 2020). Такой способ формирования покрытия позволяет регулировать глубину проникновения полимера в структуру ткани, снижать расход полимера, управлять пористостью покрытия и, как следствие, влиять на гигиенические и эксплуатационные свойства готового материала. Указанные достоинства достигаются варьированием технологических параметров формирования покрытия. Однако, для формирования материала с заданными свойствами необходимо установить количественные зависимости между этими параметрами и показателями качества.

Целью данной работы является установление зависимостей влияния технологических режимов формирования покрытия на потребительские свойства готового материала, а также экспериментальное подтверждение адекватности полученных математических моделей и возможности использования их для прогнозирования

свойств тканей с полиуретановым покрытием.

**Объект и методы исследования**

Объектом исследования являются ткани с пористым полиуретановым покрытием одежного назначения. Нанесение полимерного покрытия осуществлялось шаберным способом (рисунок 1), который основан на удалении с поверхности ткани избытка полимерной массы с помощью специального ножа. Перед нанесением полимерная композиция подвергается механическому вспениванию до установленной кратности. Далее ткань с нанесенным покрытием подают в сушильную камеру, где осуществляется удаление избыточной влаги.

При нанесении полимерной композиции на ткань необходимо учитывать и задавать кратность пены  $\beta$ , величину зазора между опорным валом и шабером  $d$  (мм), температуру  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и продолжительность сушки  $T$  (с) (Марущак Ю.И. и др., 2023; Ясинская Н.Н. и др., 2024). В качестве основы использовали хлопчатобумажную ткань саржевого переплетения с поверхностной плотностью 270 г/м<sup>2</sup>. Для формирования полиуретанового покрытия применяли вспененную композицию, основным компонентом которой является анионная полиуретано-

вая дисперсия с массовой долей сухого вещества 40 %.

Для оценки влияния технологических режимов формирования покрытия на свойства готового материала проведен двухфакторный эксперимент с использованием матрицы Коно. Выходными параметрами выбраны: воздухопроницаемость, паропроницаемость, стойкость лицевого покрытия к истиранию, жесткость по основе и утку. Для проведения многофакторного эксперимента осуществлено кодирование натуральных значений входных факторов. Методика прогнозирования основана на результатах математического моделирования.

Оценку стойкости полимерного покрытия к истиранию осуществляли на приборе ДИТ-М. В качестве абразивного материала использовали серошинельное сукно (Кудринский, Тюрин, 2022). Испытания образцов тканей с покрытием проводили при скорости вращения рабочей головки прибора 100 об/мин. Результатом измерения считали количество циклов, при котором визуально фиксировалось разрушение полимерного слоя. Жесткость тканей с покрытием измеряли на приборе ПЖУ-12М, руководствуясь ГОСТ 8977-74 «Кожа искусственная и пленочные материалы. Методы определения

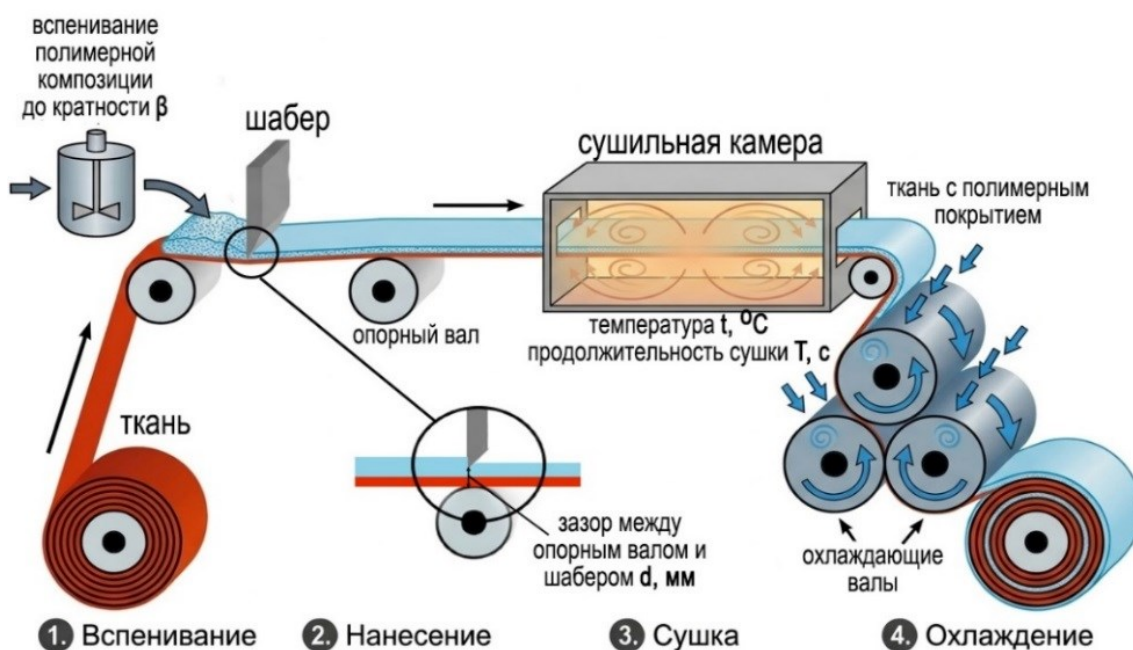


Рисунок 1 – Формирование тканей с полиуретановым покрытием шаберным способом

Figure 1 – Formation of polyurethane coated fabrics using the scraper method

гибкости, жесткости и упругости». Воздухопроницаемость материалов определяли согласно ГОСТ 12088-77 «Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения воздухопроницаемости». Определение паропроницаемости проводили гравиметрическим методом на анализаторе влажности «Radwag» М-50 в соответствии с требованиями ГОСТ 22900-78 «Кожа искусственная и пленочные материалы. Методы определения паропроницаемости и влагопоглощения», а также с учетом рекомендаций производителя прибора. В ходе эксперимента контролировали температуру в измерительной камере 40 °С (Марущак, Ясинская, 2024). Коэффициент паропроницаемости рассчитывали, как отношение массы водяных паров, прошедших через испытуемый образец, к площади образца и времени проведения испытания.

### Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Для исследования влияния кратности пены полиуретановой композиции и величины зазора между опорным валом и шабером на свойства готового материала выбраны интервалы и уровни варьирования входных факторов, представленные в таблице 1.

В результате обработки экспериментальных данных в программе Statistica for Windows получены теоретико-экспериментальные зависимости выходных параметров

от параметров технологического процесса нанесения (таблица 2).

Модели характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации ( $R^2 > 0,9$ ), что подтверждает их достоверность и позволяет использовать их для прогнозирования свойств материала (Бойко А.Ф., Воронкова М.Н., 2013). Воздухопроницаемость зависит от величины зазора ( $X_2$ ), причем зависимость имеет нелинейный характер, достигая максимума при зазоре 0,7 мм. Кратность пены ( $X_1$ ) также оказывает положительное влияние, но менее выраженное, максимум показателя отмечается при кратности 2,5. Стойкость к истиранию повышается с уменьшением кратности пены и увеличением зазора. Жесткость материала возрастает с увеличением зазора и снижается с ростом кратности пены до 2,5. Наибольший вклад в жесткость вносит величина зазора, что объясняется увеличением толщины покрытия и степени пропитки. Паропроницаемость демонстрирует зависимость от обоих факторов, причем зазор оказывает более сильное влияние, чем кратность пены. Максимальная паропроницаемость наблюдается при средних значениях зазора (0,5 мм) и высокой кратности пены (2,5). Назначение тканей с полиуретановым покрытием – одежда второго слоя, поэтому основными свойствами являются: высокая воздухо- и паропрони-

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов  
Table 1 – Levels and intervals of variation of factors

Факторы	нижний уровень (-1)	средний уровень (0)	верхний уровень (+1)	Интервал варьирования
Кратность пены ( $\beta_n$ , $X_1$ )	1,5	2	2,5	0,5
Величина зазора между опорным валом и шабером ( $h$ ), мм, $X_2$	0,3	0,5	0,7	0,2

Таблица 2 – Зависимости показателей тканей с покрытием от кратности и зазора  
Table 2 – Dependence of coated fabric properties on multiplicity and gap

Показатель	Модель зависимости от режимов сушки	$R^2$
Паропроницаемость ( $\Pi$ )	$\Pi = 13,64 + 0,628 \cdot X_1 + 1,735 \cdot X_2 - 0,608 \cdot X_2^2$	0,988
Воздухопроницаемость ( $B$ )	$B = 34,93 + 4,53 \cdot X_1 + 13,63 \cdot X_2 - 8,03 \cdot X_2^2$	0,993
Жесткость по основе ( $Go$ )	$Go = 7,02 - 0,62 \cdot X_1 + 0,78 \cdot X_2$	0,978
Жесткости по утку ( $Gu$ )	$Gu = 6,78 - 0,32 \cdot X_1 + 1,23 \cdot X_2 + 0,3 \cdot X_2^2$	0,996
Стойкость к истиранию ( $Is$ )	$Is = 263,78 - 58 \cdot X_1 + 35,17 \cdot X_2$	0,997

цаемость для обеспечения комфортного микроклимата, умеренная жесткость, достаточная для сохранения формы изделия и обеспечения драпируемости, достаточная стойкость к истиранию, соответствующая типичным эксплуатационным нагрузкам повседневной одежды. Указанным требованиям соответствует кратность пены композиции 2,0 и зазор между опорным валом и шабером 0,5 мм. Для одежных материалов кратность 2,0 обеспечивает значение показателей воздухопроницаемости 36,6  $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  и паропроницаемости 13,2  $\text{мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ . Зазор между опорным валом и шабером в 0,5 мм обеспечивает оптимальную жесткость материала по основе и по утку 7 сН.

Однако для получения тканей с полимерным покрытием с заданными свойствами важно определять не только параметры нанесения покрытия, но и режимы сушки. Для оценки влияния температуры и продолжительности сушки выбраны интервалы и уровни варьирования входных факторов, представленные в таблице 3.

В результате обработки экспериментальных данных получены теоретико-экспериментальные зависимости выходных параметров от параметров технологического процесса нанесения (таблица 4). Достоверность моделей подтверждается рассчитанным значением коэффициента детерминации ( $R^2 > 0,9$ ).

Анализ представленных данных позволяет сделать выводы, что воздухопроницаемость зависит как от температуры, так и от продолжительности сушки. Минимальные значения достигаются в области высоких температур (100 °С) и продолжительной сушки (300 с), что связано с уплотнением полимерного слоя. Модель паропроницаемости указывает на наличие максимума в области средних температур (75–80 °С) и увеличенного времени сушки (300 с). Это позволяет предположить, что формирование оптимальной пористой структуры, ответственной за диффузию паров воды, требует не только умеренного воздействия температуры, но и достаточной длительности для завершения структурообразования. Жесткость по основе и утку обладает положительной линейной зависимостью от обоих факторов. Регрессионные модели подтверждают, что повышение температуры и продолжительности сушки приводит к увеличению плотности покрытия и, как следствие, к росту его жесткости. Уравнение стойкости к истиранию описывает функция отклика с максимумом в области температуры 80–90 °С и длительности 300 с. Достижение оптимальной износостойкости требует достаточной температуры (85–90 °С) и времени (300 с) для формирования покрытия с хорошей адгезией, но не превышения порога, за которым полимер становится хрупким. При снижении

Таблица 3 – Уровни и интервалы варьирования входных факторов

Table 3 – Levels and intervals of variation of input factors

Факторы	нижний уровень (-1)	средний уровень (0)	верхний уровень (+1)	интервал варьирования
Температура сушки, $t$ (°С), $X_3$	60	80	100	20
Продолжительность сушки, $T$ (с), $X_4$	180	240	300	60

Таблица 4 – Зависимости выходных параметров от режимов сушки

Table 4 – Dependence of output parameters on drying modes

Показатель	Модель зависимости от режимов сушки	$R^2$
Паропроницаемость [П2]	$П2 = 9,78 - 1,3 \cdot X_3 + 0,53 \cdot X_4 + 0,45 \cdot X_3 \cdot X_4$	0,989
Воздухопроницаемость [В2]	$В2 = 24,63 - 3,37 \cdot X_3 - 1,75 \cdot X_4 + 2,77 \cdot X_3^2$	0,984
Жесткость по основе [Gо2]	$Gо2 = 12,63 + 1,8 \cdot X_3 + 1,1 \cdot X_4$	0,950
Жесткость по утку [Gи2]	$Gи2 = 10,19 + 0,77 \cdot X_3 + 0,55 \cdot X_4$	0,952
Стойкость к истиранию [Is2]	$Is2 = 403,33 + 50,8 \cdot X_3 + 30 \cdot X_4 - 85,83 \cdot X_3^2$	0,954

температуры до 60 °С стойкость к истиранию уменьшается до 350 циклов. Предполагаемому назначению соответствует область режима: температура сушки 70–75 °С, продолжительность сушки 200–230 с. Данный режим позволяет достичь показателей: воздухопроницаемость на уровне 27–30 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с), паропроницаемость в диапазоне 10,5–11,0 мг/(см<sup>2</sup>·ч), жесткость по основе 11,5–12,5 сН и по утку 9,5–10,0 сН, стойкость к истиранию 300–350 циклов.

Полученные математические модели и зависимости позволяют не только прогнозировать свойства материала при заданных технологических параметрах, но и решать обратную задачу: определять значения входных факторов для достижения требуемых значений единичных показателей [Орешина, О.А., 2021]. Такая задача решается путем преобразования уравнения регрессии относительно искомого фактора. Для процесса нанесения покрытия фиксируем кратность пены ( $X_1$ ), для процесса сушки – температуру ( $X_3$ ), соответственно зазор между опорным валом и шабером ( $X_2$ ) и продолжительность сушки ( $X_4$ ) рассчитываются.

Для определения значения входного фактора, обеспечивающего заданное значение выходного показателя, решена обратная задача – аналитическое преобразование уравнения регрессии относительно искомого фактора. При фиксированном значении одного фактора ( $X_1 = \text{const}$  или  $X_3 = \text{const}$ ) уравнение регрессии приводится к квадратному (или линейному) уравнению относительно второго фактора. Решение полученных уравнений выполнено в вычислительной среде Maple с использованием встроенной функции solve, обеспечивающей аналитическое нахождение корней алгебраических уравнений. Для каждого уравнения регрессии преобразование выполнено к виду, позволяющему выразить искомым фактор через фиксированный и заданное значение единичного показателя.

При решении квадратных уравнений относительно зазора ( $X_2$ ) получены по два действительных корня, что обусловлено квадратичной зависимостью показателей качества от данного фактора. Из полученных пар корней отбирается значение, лежащее внутри области варьирования фактора и технологически реализуемое. Для показателей, описываемых линейной зависимостью от зазора (жесткость по основе, стойкость к истиранию), решение обратной задачи дает единственное значение фактора.

В таблице 5 приведены уравнения для расчета величины зазора между опорным валом и шабером ( $X_2$ ) при фиксированной кратности пены ( $X_1$ ) и заданном единичном показателе. Модели получены с использованием кодированных значений. Область варьирования входных факторов: кратность пены  $X_1$  [-1;1], что соответствует натуральным значениям от 1,5 до 2,5. Величина зазора  $X_2$  [-1;1], что соответствует натуральным значениям от 0,3 до 0,7 мм. Температура сушки  $X_3$  [-1;1], что соответствует натуральным значениям от 60 до 100 °С. Продолжительность сушки  $X_4$  [-1;1], что соответствует натуральным значениям от 180 до 300 с.

В таблице 6 приведены уравнения для расчета продолжительности сушки ( $X_4$ ) при фиксированной температуре ( $X_3$ ) и заданном единичном показателе.

Для подтверждения достоверности полученных моделей необходимо сравнение теоретических значений, рассчитанных по уравнениям регрессии, с экспериментальными значениями. Значения входных факторов выбраны не входящие в план эксперимента при построении моделей, но лежащие внутри области варьирования.

При нанесении полиуретановой композиции в качестве фиксируемого фактора выбрана кратность пены  $X_1 = 0,4$ , что соответствует натуральному значению 2,2. Данное значение находится в области варьирования и не совпадает с уровнями, используемыми в основном

Таблица 5 – Уравнения для расчета величины зазора между опорным валом и шабером  $X_2$   
Table 5 – Equations for calculating the gap between the support shaft and the scraper  $X_2$

Заданный показатель	Уравнение
Паропроницаемость [П]	$1,427 \pm 0,00082\sqrt{3,618 \cdot 10^7 + 1,527 \cdot 10^6 X_1 - 2,432 \cdot 10^6 P}$
Воздухопроницаемость [В]	$0,849 \pm 0,00062\sqrt{1,308 \cdot 10^7 + 1,455 \cdot 10^6 X_1 - 3,212 \cdot 10^5 B}$
Жесткость по основе [Go]	$-9 + 0,795 \cdot X_1 + 1,282 \cdot Go$
Жесткость по утку [Gu]	$-2,05 \pm 0,017\sqrt{-66231 + 12000Gu + 3840 \cdot X_1}$
Стойкость к истиранию [Is]	$-7,5001 + 1,649 \cdot X_1 + 0,0284 \cdot Is$

Таблица 6 – Уравнения для расчета продолжительности сушки  $X_4$   
Table 6 – Equations for calculating drying time  $X_4$

Заданная величина	Уравнение
Паропроницаемость $\{П2\}$	$\frac{2 \cdot (-489 + 65 \cdot X_3 + 50 \cdot П2)}{53 + 45 \cdot X_3}$
Воздухопроницаемость $\{B2\}$	$14,074 - 1,93 \cdot X_3 + 1,583 \cdot X_3^2 - 0,57 \cdot B2$
Жесткость по основе $\{Go2\}$	$-12,39 - 1,64 \cdot X_3 + 0,91 \cdot Go2$
Жесткость по утку $\{Gu2\}$	$-18,53 - 1,4 \cdot X_3 + 1,82 \cdot Gu2$
Стойкость к истиранию $\{Is2\}$	$-13,44 - 1,69 \cdot X3 + 2,86 \cdot X_3^2 + 0,033 \cdot Is2$

эксперименте. В качестве контролируемого свойства выбрана воздухопроницаемость. Планируемое значение принято  $B_3 = 25,0 \text{ дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$ , которое находится в области варьирования экспериментальных значений и не совпадает с точками эксперимента. Решение уравнения обратной задачи для воздухопроницаемости дает два корня: 0,97 мм и 0,37 мм. Значение  $h = 0,97 \text{ мм}$  выходит за пределы области варьирования зазора (0,3–0,7 мм). Поэтому выбрано значение  $h = 0,37 \text{ мм}$ , которое находится внутри области варьирования и технологически реализуемо.

Таким образом, сформирован режим для процесса нанесения покрытия:

- кратность пены 2,2 ( $X_1 = 0,4$ );
- зазор между опорным валом и шабером 0,37 мм ( $X_2 = -0,63$ ).

С использованием вычислительной среды Maple рассчитаны прогнозируемые значения единичных показателей. Для проверочного режима подготовлены образцы тканей с полиуретановым покрытием. Для обеспечения корректного сравнения значений режим сушки образцов выбран с учетом установленных ранее зависимостей (Марущак Ю.И. и др., 2023; Ясинская Н.Н. и др., 2024) между кратностью пены и параметрами сушки. Установлено, что для кратности пены 2,0 рекомендуется режим температуры 80 °С и продолжительность 240 с, для кратности 2,5 – температура 60 °С и длительность 160 с. Для значения кратности пены 2,2 режим сушки определен методом линейной интерполяции – температура сушки 72 °С, длительность сушки 208 с. В качестве основы использована хлопчатобумажная ткань саржевого переплетения поверхностной плотности 270 г/м<sup>2</sup>. Результаты экспериментальных и теоретических значений представлены в таблице 7. Сравнение значений

выполнено путем расчета относительной погрешности.

Средняя относительная погрешность прогнозирования для всех исследованных свойств составила 4,0 %. Полученные результаты свидетельствуют об удовлетворительной сходимости теоретических и экспериментальных данных, относительная погрешность не превышает 5 %. Это позволяет сделать вывод об адекватности математических моделей для процесса нанесения покрытия.

Для подтверждения адекватности математических моделей процесса сушки проведена проверка по аналогичной схеме. В качестве фиксируемого фактора выбрана температура сушки  $X_3 = -0,5$ , что соответствует 70 °С. В качестве контролируемого фактора выбрана жесткость по основе  $Go2 = 12 \text{ сН}$ . Решение уравнения обратной задачи для жесткости по основе дает значения длительности сушки 200 с.

Режим для процесса сушки покрытия:

- температура сушки 70 °С ( $X_1 = -0,50$ );
- длительность сушки 200 с ( $X_2 = -0,67$ ).

С использованием вычислительной среды Maple рассчитаны прогнозируемые значения единичных показателей. Для проверочного режима подготовлены образцы тканей с полиуретановым покрытием при кратности пены 2,0 и толщине зазора между опорным валом и шабером 0,5 мм. Результаты экспериментальных и теоретических значений представлены в таблице 8.

Средняя погрешность составила 4,2 %. Полученные результаты свидетельствуют об удовлетворительной сходимости теоретических и экспериментальных данных, так как относительная погрешность не превышает 5 %. Делаем вывод об адекватности полученных математических моделей.

Таблица 7 – Значения показателей для принятого режима формирования  
Table 7 – Values of the indicators for the adopted formation mode

Показатель качества	Прогнозируемое значение	Экспериментальное значение	Относительная погрешность, %
Воздухопроницаемость, $\text{дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$	25,1	25,9	3,1
Паропроницаемость, $\text{мг}/\text{см}^2\cdot\text{ч}$	12,6	13,2	4,5
Жесткость по основе, сН	6,34	6,61	4,1
Жесткость по утку, сН	6,04	6,32	4,4
Стойкость к истиранию, цикл	218	210	3,8

Таблица 8 – Значения показателей для принятого режима формирования  
Table 8 – Values of indicators for the adopted formation mode

Показатель качества	Прогнозируемое значение	Экспериментальное значение	Относительная погрешность, %
Воздухопроницаемость, $\text{дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$	28,2	29,4	4,0
Паропроницаемость, $\text{мг}/\text{см}^2\cdot\text{ч}$	10,2	10,7	4,5
Жесткость по основе, сН	12,04	12,61	4,1
Жесткость по утку, сН	9,44	9,82	4,4
Стойкость к истиранию, цикл	336	320	3,8

## Выводы

В результате экспериментальных исследований получены достоверные математические модели ( $R^2 > 0,97$ ), описывающие влияние кратности пены и величины зазора между опорным валом и шабером на паропроницаемость, воздухопроницаемость, жесткость и стойкость к истиранию полиуретанового покрытия ткани. Установлено, что увеличение зазора повышает воздухопроницаемость и жесткость материала, а рост кратности пены снижает жесткость и стойкость к истиранию, при этом наибольшее влияние на свойства оказывает величина зазора. Рекомендуемыми параметрами для производства тканей с полиуретановым покрытием, предназначенных для одежды второго слоя, являются кратность пены 2,0 и зазор 0,5 мм. Установлены зависимости воздухопроницаемости и паропроницаемости, стойкости к истиранию и жесткости тканей с пористым полиуретановым покрытием от температурно-временных параметров сушки. Увеличение температуры и времени сушки приводит к росту жесткости материала вследствие уплотнения полимерной структуры. Максимальная стойкость к истиранию достигается в области

температур 80–90 °С и максимальной продолжительности сушки 300 с. Гигиенические свойства материала определяются режимом сушки нелинейно. Максимальные значения воздухопроницаемости (до  $32,8 \text{ дм}^3/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ) наблюдаются при минимальных температуре и времени (60 °С, 180 с). Паропроницаемость, напротив, достигает  $11,2 \text{ мг}/(\text{см}^2\cdot\text{ч})$  при средних температурах и увеличенной продолжительности процесса. Определен рациональный режим сушки для материалов одежного назначения: температура 70–75 °С, продолжительность 200–230 с.

Полученные математические модели, описывающие зависимость воздухопроницаемости, паропроницаемости, стойкости к истиранию и жесткости от технологических параметров формирования использованы для прогнозирования свойств, а также для решения обратной задачи – определения значений входных факторов по требуемым показателям качества. Преобразование уравнений регрессии выполнено с использованием вычислительной среды Maple.

Подтверждена адекватность полученных математических моделей. При сравнении экспериментальных

значений с теоретическими относительная погрешность не превысила 5 %. Предложенный подход прогнозирования свойств тканей с полиуретановым покрытием может быть использован при проектировании текстильных материалов с заданными свойствами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Бойко, А.Ф., Воронкова, М.Н. [2013]. *Теория планирования многофакторного эксперимента*. Белгород: Изд-во БГТУ, Российская Федерация.

Вишневецкая, О.В. [2016]. Современные методы нанесения покрытия на текстиль, *Вестник Казанского технологического университета*, № 18, С. 69–72.

Карнилов, М.С., Рыклин, Д.Б. [2024]. Определение рациональных режимов процесса нанесения нановолокнистого покрытия на водорастворимую пленку методом электроформования. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 4 (50), С. 69–80.

Киселев, А.М. [2010]. Математическое моделирование процесса сжатия волокнистых материалов в массе, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 5 (326), С. 14–17.

Марущак, Ю.И., Ясинская, Н.Н., Скобова, Н.В. и Сергеев, В.Ю. [2023]. Зависимость физико-механических свойств экокож от условий формирования полимерного покрытия. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 44 (1), С. 102–113.

Орешина, О.А., Марков, А.В. [2020]. Концепция математического моделирования свойств физико-механических характеристик композиционных, *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*, № 12, С. 3–6.

Павутницкий, В.В. [2004]. *Развитие теории и практики получения и применения низкократных пен в технологических процессах текстильного производства, автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.19.02*. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Старков, А.И., Копылов, А.И. и Матвеев, К.А. [2016]. Оценка физико-механических и технологических свойств поливинилхлоридных смол при производстве мягких искусственных кож, в условиях импортозамещения, *Дизайн и технология*, № 54 (96), С. 52–59.

Теркалова, Л.О., Павутницкий, В.В. [2005]. Влияние пенного способа нанесения отделочных препаратов в процессах заключительной отделки на физико-механические свойства тканей, *Вестник Димитровградского института технологии, управления и дизайна*, № 1, С. 1–3.

Шустов, Ю.С. [2003]. *Разработка методов прогнозирования строения и свойств текстильных материалов с использованием теории подобия и анализа размерностей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.19.01*. Москва. 281 с.

Ясинская, Н.Н., Марущак, Ю.И. и Скобова, Н.В. [2024]. Влияние кратности вспенивания полиуретановой композиции и толщины нанесенного слоя на потребительские свойства искусственных кож, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 2 (410), С. 225–232.

Ясинская, Н.Н., Ольшанский, В.И. и Коган, А.Г. [2015]. *Композиционные текстильные материалы : монография*. Витебск : УО «ВГТУ», Республика Беларусь.

Chatterjee, U., Patra, S., Butola, B.S. and Joshi, M. [2024]. Reliability modeling to predict in-service weatherability of polyurethane nanocomposite coatings: Approach, comparison and validation, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 64, No. 9, pp. 4551–4565.

Gadeikytė, A., Abraitienė, A. and Barauskas, R. [2021]. Prediction of air permeability coefficient and water-vapor resistance of 3D textile layer, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 112, No. 7, pp. 1–11.

Goessens, T., De Staelen, R. and Constaes, D. [2015]. Characteristic times and inverse problems for diffusion in coated textiles, *Applied Mathematics & Information Sciences*, Vol. 9, No. 2L, pp. 349–355.

Kentta, E., Kinnunen-Raudaskoski, K., Hjelt, T., Sarlin, E., Johansson, L.-S., Vartiainen, J. and Rautkoski, H. (2020). Foam coating of abrasive particles on textile substrates with the aid of cellulose nanocrystals, *Coatings*, Vol. 10, No. 11, p. 1034.

Liu, J., Recupido, F., Lama, G.C., Oliviero, M., Verdolotti, L. and Lavorgna, M. (2023). Recent advances concerning polyurethane in leather applications: an overview of conventional and greener solutions, *Collagen and Leather*, Vol. 5, No. 1, p. 8.

### REFERENCES

Boyko, A.F. and Voronkova, M.N. (2013). *Teoriya planirovaniya mnogofaktornogo eksperimenta* [Theory of planning a multifactor experiment]. Belgorod: Izd-vo BGTU, Russian Federation (In Russian).

Vishnevskaya, O.V. (2016). Modern methods of coating on textiles [Sovremennyye metody naneseniya pokrytiya na tekstil']. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Technological University*, No. 18, pp. 69–72 (In Russian).

Karnilov, M.S. and Ryklin, D.B. (2024). Determination of rational modes of the process of applying nanofibrous coating on a water-soluble film by electrospinning [Opredelenie ratsional'nykh rezhimov protsessa naneseniya nanovoloknistogo pokrytiya na rastvorimuyu plenku metodom elektroformovaniya]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, No. 4 (50), pp. 69–80.

Kiselev, A.M. (2010). Matematicheskoe modelirovanie protsessa szhatiya voloknistykh materialov v masse [Mathematical modeling of the process of compression of fibrous materials in mass], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, No. (326), pp. 14–17 (In Russian).

Oreshina, O.A., Markov, A.V. (2020). Konceptsiya matematicheskogo modelirovaniya svoystv fiziko-mekhanicheskikh karakteristik kompozitsionnykh [The concept of mathematical modeling of the properties of physical and mechanical characteristics of composites], *Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskij zhurnal = Flight. All-Russian scientific and technical journal*, № 12, pp. 3–6.

Pavutnitsky, V.V. (2004). *Razvitie teorii i praktiki polucheniya i primeneniya nizkokratnykh pen v tekhnologicheskikh protsessakh tekstil'nogo proizvodstva* [Development of the theory and practice of obtaining and using low-expansion foams in the technological processes of textile production]: Doctoral dissertation abstract. Saint Petersburg, Russian Federation (In Russian).

Starkov, A.I., Kopylov, A.I. and Matveev, K.A. (2016). Assessment of physical-mechanical and technological properties of polyvinyl chloride resins in the production of soft artificial leather, in the context of import substitution [Otsenka fiziko-mekhanicheskikh i tekhnologicheskikh svoystv polivinilkloridnykh smol pri proizvodstve myagkikh iskusstvennykh kozh, v usloviyakh importozameshcheniya]. *Dizayn i tekhnologii = Design and Technology*, No. 54 (96), pp. 52–59 (In Russian).

Terkalova, L.O. and Pavutnitsky, V.V. (2005). The influence of the foam method of applying finishing preparations in the processes of final finishing on the physical and mechanical properties of fabrics [Vliyanie pennogo sposoba naneseniya otdelochnykh preparatov v protsessakh zaklyuchitel'noy otdelki na fiziko-mekhanicheskie svoystva tkaney]. *Vestnik Dimitrovgradskogo instituta tekhnologii, upravleniya i dizayna = Bulletin of the Dimitrovgrad Institute of Technology, Management and Design*, No. 1, pp. 1–3 (In Russian).

Shustov, Yu.S. (2003). *Razrabotka metodov prognozirovaniya stroeniya i svoystv tekstil'nykh materialov s ispol'zovaniem teorii podobiya i analiza razmernostey* [Development of methods for predicting the structure and properties of textile materials using similarity theory and dimensional analysis] : Doctoral thesis in Engineering Sciences : 05.19.01. Moscow. 281 p.

Yasinskaya, N.N., Marushchak, Yu.I. and Skobova, N.V. (2024). Influence of foaming rate of polyurethane composition and thickness of applied layer on consumer properties of artificial leather [Vliyanie kratnosti vspenivaniya poliuretanovoy kompozitsii i tolshchiny nanesennogo sloya na potrebitel'skie svoystva iskusstvennykh kozh]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, No. 2 (410), pp. 225–232 (In Russian).

Yasinskaya, N.N., Olshansky, V.I. and Kogan, A.G. (2015). *Kompozitsionnye tekstil'nye materialy* [Composite textile materials]. Vitebsk: UO «VGTU», Republic of Belarus (In Russian).

Chatterjee, U., Patra, S., Butola, B.S. and Joshi, M. (2024). Reliability modeling to predict in-service weatherability of polyurethane nanocomposite coatings: Approach, comparison and validation. *Polymer Engineering and Science*, Vol. 64, No. 9, pp. 4551–4565.

Gadeikytė, A., Abraitienė, A. and Barauskas, R. (2021). Prediction of air permeability coefficient and water-vapor resistance of 3D textile layer. *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 112, No. 7, pp. 1–11.

Goessens, T., De Staelen, R. and Constaes, D. (2015). Characteristic times and inverse problems for diffusion in coated textiles. *Applied Mathematics & Information Sciences*, Vol. 9, No. 2L, pp. 349–355.

Kentta, E., Kinnunen-Raudaskoski, K., Hjelt, T., Sarlin, E., Johansson, L.-S., Vartiainen, J., and Rautkoski, H. (2020). Foam coating of abrasive particles on textile substrates with the aid of cellulose nanocrystals. *Coatings*, Vol. 10, No. 11, p. 1034.

Liu, J., Recupido, F., Lama, G.C., Oliviero, M., Verdolotti, L., and Lavorgna, M. (2023). Recent advances concerning polyurethane in leather applications: an overview of conventional and greener solutions. *Collagen and Leather*, Vol. 5, No. 1, p. 8.

### Информация об авторах

### Information about the authors

#### Марущак Юлия Игоревна

Аспирант, Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: tonk.00@mail.ru

#### Ясинская Наталья Николаевна

Доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Экология и химические технологии», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: yasinskaynn@rambler.ru

#### Бизюк Андрей Николаевич

Старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: biziuk.andrei@gmail.com

#### Кузнецов Андрей Александрович

Доктор технических наук, профессор, ректор Витебского государственного технологического университета, Республика Беларусь.

#### Yulia I. Maruschak

Postgraduate Student, Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: tonk.00@mail.ru

#### Natalia N. Yasinskaya

Doctor of Science (in Engineering), Associate Professor, Chair of the Department "Ecology and Chemical Technologies", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: yasinskaynn@rambler.ru

#### Andrey N. Biziuk

Senior Lecturer at the Department "Information Systems and Technologies", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: biziuk.andrei@gmail.com

#### Andrey A. Kuznetsov

Doctor of Science (in Engineering), Professor, Rector of Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

**Дентальные имплантаты, полученные методом селективного лазерного спекания-плавления**

**В. Н. Шут<sup>1</sup>, А. А. Кузнецов<sup>1</sup>,  
С. Е. Мозжаров<sup>1</sup>,  
Н. К. Толочко<sup>2</sup>,  
А. А. Кабанова<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Витебский государственный технологический университет,*

*<sup>2</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет,*

*<sup>3</sup>Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет,*

*Республика Беларусь*

**Аннотация.** Целью работы является исследование структуры и характеристик имплантатов зубных корней, полученных методом объединения селективного лазерного спекания и селективного лазерного плавления порошков титана.

Методом объединения селективного лазерного спекания и селективного лазерного плавления порошков титана получены имплантаты на основе порошков титана. Проведены исследования структуры и свойств материалов.

Установлено, что используемый метод позволяет формировать структуры, обладающие большой пористостью на поверхности и высокой плотностью в центре. Показано, что граница между спеченной и переплавленной зонами является размытой. Это обусловлено проникновением расплава в поры между частицами во время лазерной обработки. Пористая структура поверхности достаточно гомогенна (средняя пористость – 40–45 %, средний размер пор – 100–200 мкм). Полученные изделия были испытаны на животных семейства псовых. Установлено, что в поверхность титановых имплантатов прорастают костные балки. На границе контакта костной ткани и внутренних структур имплантата признаков дегенерации не обнаружено. Это является свидетельством высокой совместимости кости к искусственной структуре. Полученные результаты демонстрируют перспективность создания имплантатов из титановых порошков комбинированным методом спекания-плавления.

**Ключевые слова:** титановые имплантаты, лазерное спекание, лазерное плавление.

**Информация о статье:** поступила 5 февраля 2026 года.

**Dental implants made by selective laser sintering-melting method**

**Victor N. Shut<sup>1</sup>, Andrey A. Kuznetsov<sup>1</sup>,  
Sergey E. Mozzharov<sup>1</sup>,  
Nicolay K. Tolochko<sup>2</sup>,  
Arina A. Kabanova<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Vitebsk State Technological Universit,*

*<sup>2</sup>Belarusian State Agrarian Technical University,*

*<sup>3</sup>Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University,*

*Republic of Belarus*

**Abstract.** The aim of the work is to study the structure and characteristics of dental root implants made by combining selective laser sintering and selective laser melting of titanium powders. Implants based on titanium powders were made by combining selective laser sintering and selective laser melting of titanium powders. The structure and properties of the materials were studied.

It was found that the method allows to form structures with high porosity on the surface and high density in the center. It was shown that the boundary between the sintered and remelted zones is diffuse. This is due to the penetration of the melt into the pores between the particles during laser processing. The porous structure of the surface is homogeneous (average porosity is 40–45 %, average pore size is 100–200  $\mu\text{m}$ ). The resulting implants were tested on canine animals. It was found that bone beams grow into the surface of the titanium implants. No signs of degeneration were detected at the contact boundary of the bone and the internal structures of the implant. This is evidence of high compatibility of bone to the artificial structure. The results demonstrate the prospects of creating implants from titanium powders using a combined sintering-melting method.

**Keywords:** titanium implants, laser sintering, laser melting.

**Article info:** received February 5, 2026.

## Введение

С середины XX века активно развивается дентальная имплантология. В 1965 году титановый штифт был впервые установлен в челюсть пациента. Работы над совершенствованием дентальных имплантатов продолжают до сегодняшнего дня. Для их изготовления используются материалы с высокой биохимической инертностью (отсутствием негативной реакции биологических объектов на имплантационные материалы в виде различных ответов). Одним из наиболее распространённых материалов для изготовления имплантатов на сегодняшний день является титан и его сплавы, благодаря оптимальному сочетанию физико-химических свойств, высокой биологической инертности и достаточно низкой стоимости (Müller-Heupt et al., 2022). Титан, используемый в медицинских целях, имеет высокую антикоррозионную устойчивость, связанную с образованием прочной оксидной пленки на поверхности в кислородсодержащих средах. Традиционно, дентальные имплантаты изготавливают механической обработкой, литьем или методами порошковой металлургии. В современной стоматологии используются имплантаты корневидной формы, имеющий шероховатую поверхность с макроscopicкими углублениями и пиками (Ra-средняя глубина шероховатости поверхности, у большинства современных стандартных имплантатов составляет от 1,2 до 1,8 мкм), или пористой поверхностью (Yuan, Ding and Wen, 2018; Cao and Ding, 2022). Таким образом, наряду с наличием микрорезьбы, обеспечивается первичная механическая стабильность имплантата, достаточная для дальнейшей остеоинтеграции – врастания кости в микропоры на поверхности (Kassim and Alotaibi, 2023; Geetha et al., 2017). Кроме того, дентальный имплантат должен иметь плотное ядро, чтобы обеспечить механическую прочность конструкции протеза. Имплантаты, произведенные традиционными методами, упомянутыми выше, имеют гомогенную структуру. Используя такие методы, трудно или невозможно изготовить имплантат с градиентной структурой, обладающей высокой шероховатостью на поверхности и достаточной плотностью в центре (Krakhmalev et al., 2017; Kazantseva et al., 2022). Современные методы селективного лазерного спекания и селективного лазерного плавления позволяют минимизировать эти недостатки (Tolochko et al., 1998; Tolochko et al., 1995; Yadroitsev et al., 2021; Du Plessis et al., 2021; Revilla-León et al., 2021; Wang et al., 2016). Также представляет интерес использование комбинированного подхода, основанного на

объединении селективного лазерного спекания и селективного лазерного плавления титановых порошков.

Цель работы заключается в исследовании структуры и характеристик дентальных имплантатов, полученных методом объединения селективного лазерного спекания и селективного лазерного плавления порошков титана.

## Материалы и методы

Для экспериментов использовались сферические титановые порошки размером 160–200, 200–315 или 315–400 мкм. Для подачи порошков в зону спекания использовалось устройство, схема которого приведена на рисунке 1.

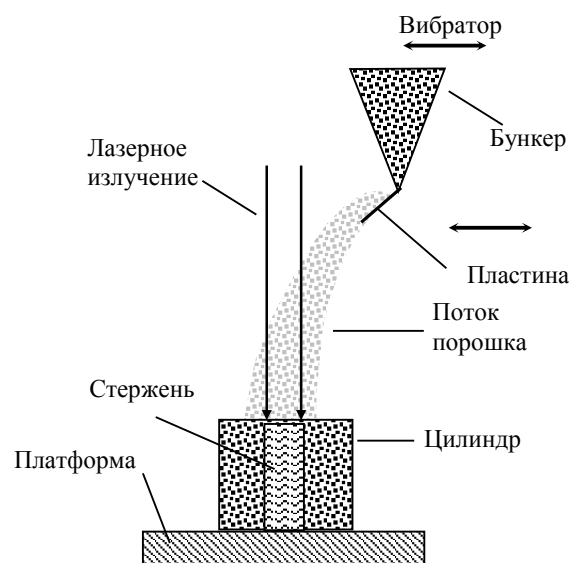


Рисунок 1 – Схема устройства для подачи порошка  
Figure 1 – Diagram of powder feed device

Устройство состоит из бункера в виде конуса, содержащего определенное количество порошка. Порошок вытекает из бункера под действием вибрации и попадает на пластину, также совершающую вибрацию. Порошок рассыпается широким потоком и падает на подложку, на которой установлена цилиндрическая емкость (диаметром 20 мм), в которой формируются плоские порошковые слои. Конструкция данного устройства дает возможность подавать порошок, как непрерывно, так и дискретно. В наших экспериментах порошок подавался порционно (последовательно).

Порошок обрабатывался в среде аргона излучением лазера ЛТН-103. мощность излучения, которого мо-

жет меняться от 10 до 250 Вт. Излучение воздействовало непрерывно в течение всего процесса формирования изделия. Сфокусированный лазерный луч был неподвижен относительно слоев порошка. В результате воздействия лазерного излучения на послойно наносимый порошок, в зависимости от параметров процесса, получались образцы в форме стержня или конуса. Полученные образцы подвергались дополнительной обработке в вакуумной печи, при следующих условиях: нагрев от комнатной температуры до 1200 °С в течение 6 часов, спекание при 1200 °С в течение 2 часов и охлаждение от 1200 °С до комнатной температуры в течение 4 часов.

Образцы цилиндрической формы изготавливались следующим образом. Титановый порошок со средним размером 300 мкм наносился в состоянии свободной насыпки на горизонтальную керамическую подложку последовательными слоями. Время нанесения каждого слоя 1 секунда, время между нанесением двух смежных слоев 3 секунды. Толщина слоев составляла порядка 900 мкм. Диаметр луча 5 мм, при мощности излучения 60 Вт. В результате формировалась комбинированная структура, состоящей из двух зон – центральной (переплавленная компактная структура, сформированная в результате лазерного плавления) и оболочки (спеченная пористая структура, сформированная в результате лазерного спекания). Образцы конической формы изготавливались аналогичным образом, но мощность излучения уменьшалась по мере перехода к очередному слою от 90 до 70 Вт. Полученные образцы так же подвергались дополнительной термообработке в вакуумной печи.

Исследование микроструктуры проводилось на сканирующем электронном микроскопе MIRA (TESCAN).

Образцы использовались для оценки остеоинтеграции на животных.

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 приведены микрофотографии титановых образцов, полученных методом спекания-плавления в виде цилиндрического стержня и конуса.

На рисунке 3 показано сечение цилиндрического образца (разрез по центру). Хорошо видна структура, состоящая из двух различных зон – центральной (компактной переплавленной) и оболочки (спеченной пористой структуры).

Типичная микроструктура спеченной и переплавленной зон показана на рисунке 4.

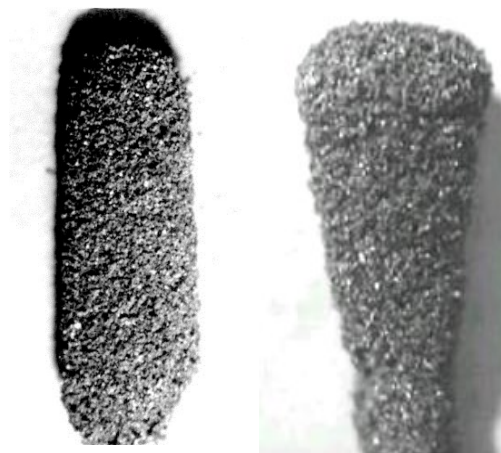


Рисунок 2 – Титановые образцы, полученные методом спекания-плавления в виде цилиндрического стержня и конуса:  
диаметр цилиндра  $\approx 7,5$  мм,  
диаметр основания конуса  $\approx 7$  мм

Figure 2 – Titanium samples produced by sintering-melting in the form of a cylindrical rod and a cone:  
cylinder diameter  $\approx 7,5$  mm,  
cone base diameter  $\approx 7$  mm



Рисунок 3 – Спечено/переплавленная структура титанового стержня (шлиф)

Figure 3 – Sintered-remelted structure of titanium rod (section)

Спеченная зона имеет гомогенную пористую структуру со средней пористостью 40–45 % и средним размером пор 100–200 мкм.

Обычно между спеченной и переплавленной зоной нет четкой границы из-за затекания расплавленной фазы в поры нерасплавленного порошка во время лазерной обработки. Поэтому между этими зонами возникает промежуточная зона – зона инфильтрации (рисунок 5).

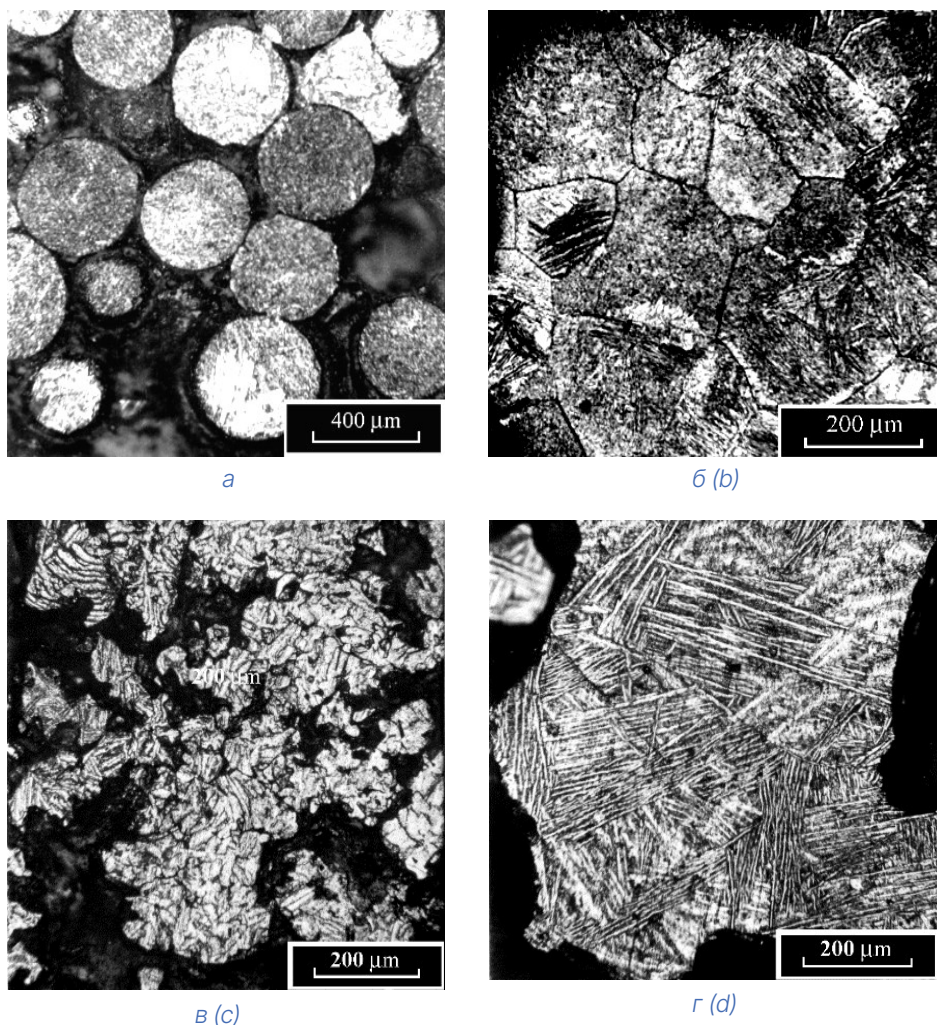


Рисунок 4 – Структура спеченной оболочки и переплавленной зоны в центре стержня:

а, в – спеченная зона; б, г – переплавленная зона

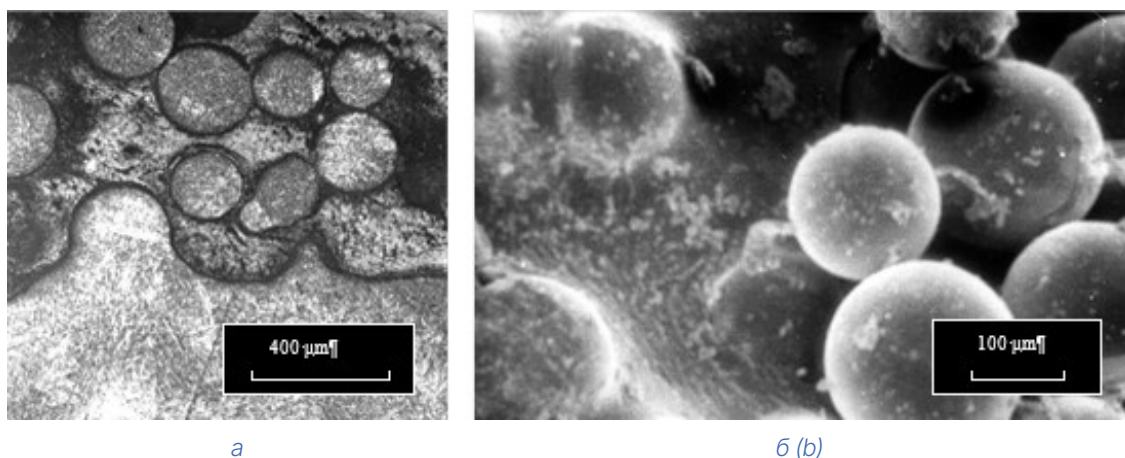
Figure 4 – Structure of the sintered shell and the remelted zone in the center of the rod:

a, c – sintered zone; b, d – remelted zone

Как уже отмечалось выше, образцы, полученные лазерной обработкой, подвергались дополнительной термообработке в вакуумной печи. Эксперименты показали, что такая обработка приводит к уменьшению пористости и размеров пор. То есть имеет место твердофазная диффузия и спекание поверхностных слоев. В то же время, видимого изменения в форме образцов не происходит. Второй причиной проведения дополнительной термообработки является отпуск температурных напряжений, неизбежно возникающих при лазерном

синтезе, что связано со значительными температурными градиентами. В результате пороговая сжимающая сила (одна из самых важных механических характеристик имплантата корня зуба) для некоторых образцов, подвергнутых такой обработке, достигала 1000 Н, что намного выше, чем требуется для применяемых имплантатов (320 Н).

Выполнены исследования биосовместимости полученных имплантатов с учетом того, что в процессе воздействия высокоэнергетического лазерного излучения



*Рисунок 5 – Структура промежуточной зоны:  
 а – оптическая фотография переплавленной зоны и зоны инфильтрации;  
 б – фотография на электронном микроскопе зоны инфильтрации и спекания*

*Figure 5 – Structure of the intermediate zone:  
 a – optical photograph of the remelted zone and infiltration zone;  
 b – electron microscope photograph of the infiltration and sintering zone*

происходит оплавление поверхности частиц порошка титана, что приводит к изменению его физико-химических свойств. Полученные изделия были испытаны на двух животных семейства псовых. Имплантаты вводились с обеих сторон челюсти. Во время операции и в послеоперационном периоде осложнений у животных не было. Эвтаназию проводили через 1 и 3 месяца после операции. После соответствующей подготовки образцов проводились их микроскопические исследования. В результате установлено, что после 3-х месячного срока наблюдения формируется зрелая костная ткань с концентрически расположенными костными пластинами и сформированными гаверсовыми системами. На границе контакта с имплантатом на всем протяжении, а также в порах имплантата, формировались ориентированные зрелые костные балки. Признаков воспаления и дегенеративных изменений, рассасывания костной ткани в зонах контакта с имплантатом не выявлено.

Современные исследования в области дентальных имплантатов, изготовленных методом селективного лазерного спекания-плавления, демонстрируют значительные успехи в улучшении их механических свойств, биосовместимости и клинической эффективности.

SLM-имплантаты из титановых сплавов обладают повышенной прочностью и оптимальной пористостью, что способствует лучшей остеоинтеграции. В работе (Singla et al., 2021) было установлено, что регулируемая пористость имплантатов улучшает васкуляризацию и ускоряет заживление костной ткани. Аналогичные результаты были получены в исследовании (Grzech-Leśniak et al., 2021) где отмечалось, что SLM-технология позволяет создавать конструкции с контролируемой шероховатостью поверхности, что усиливает адгезию остеобластов. В ряде работ подчеркивается, что SLM-имплантаты демонстрируют меньший риск отторжения по сравнению с традиционными методами изготовления. (Romanos, 2021) в своем обзоре указывает, что использование SLM снижает количество микродефектов, что минимизирует воспалительные реакции. Кроме того, (Aldelaimi et al., 2016) отмечают, что лазерная обработка поверхности имплантатов способствует снижению бактериальной адгезии, что особенно важно для профилактики периимплантита.

### **Заключение**

Получены имплантаты методом объединения селективного лазерного спекания и селективного лазерного плавления порошков титана. Исследованы их струк-

тура и характеристики. Показано, что используемый метод позволяет формировать материалы, обладающие большой пористостью на поверхности и высокой плотностью в центре. Четкая граница между спеченной и переплавленной зонами отсутствует. Это обусловлено проникновением расплава в поры между частицами во время лазерной обработки. Пористая структура достаточно гомогенна (средняя пористость – 40–45%, средний размер пор – 100–200 мкм). Установлено, что в поверхность пористых титановых имплантатов, полученных методом спекания-плавления, прорастают костные балки.

К третьему месяцу наблюдения зрелая костная ткань на границе контакта и внутренних структур имплантата была без признаков дегенерации и рассасывания тканей. Это является свидетельством высокой совместимости кости к искусственной структуре.

Полученные результаты демонстрируют перспективность создания имплантатов из титановых порошков комбинированным методом спекания-плавления и требует проведения дальнейших исследований в данном направлении, в том числе доклинических и клинических испытаний.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Aldelaimi, T.N. and Khalil, A.A. (2015). Clinical application of diode laser (980 nm) in maxillofacial surgical procedures. *J Craniofac Surg.*, vol. 26(4), pp. 1220–1223, doi:10.1097/SCS.0000000000001727.

Cao, D. and Ding, J. (2022). Recent advances in regenerative biomaterials. *Regen Biomater.*, vol. 9, pp. 1–37, doi:10.1093/rb/rbac098.

Du Plessis, A., Razavi, N., Benedetti, M., Murchio, S., Leary, M. and Watson, M. (2022). Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review. *Prog Mater Sci.*, vol. 125, pp. 2872–2888, doi:10.1016/j.pmatsci.2021.100918.

Geetha, M., Singh, A.K., Asokamani, R. and Gogia, A.K. (2009). Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants - A review. *Prog Mater Sci.*, vol. 54(3), pp. 397–425, doi:10.1016/j.pmatsci.2008.06.004.

Grzech-Leśniak, K., Matys, J., Jurczyszyn, K., Ziętek, M., Serafin, N. and Dominiak, M. (2018). Laser reduction of specific microorganisms in the periodontal pocket using Er:YAG and Nd:YAG lasers: a randomized controlled clinical study. *Lasers Med Sci.*, vol. 33(7), pp. 1461–1470, doi:10.1007/s10103-018-2491-z.

Kassim, A. and Alotaibi, K.F. (2023). Factors That Influence the Adoption of Digital Dental Technologies and Dental Informatics in Dental Practice. *Int J Online Biomed Eng.*, vol. 19, no. 15, pp. 103–126, doi:10.3991/ijoe.v19i15.43015.

Kazantseva, N.V., Krakhmalev, P.V., Yadroitsava, I.A. and Yadroitsev, I.A. (2021). Laser additive 3D printing of titanium alloys: current state, problems, and trends. *Phys Met Metallogr.*, vol. 122(1), pp. 8–30, doi:10.31857/S001532302101006X.

Krakhmalev, P., Yadroitsev, I., Yadroitsava, I. and de Smidt, O. (2017). Functionalization of biomedical Ti6Al4V via in situ alloying by Cu during laser powder bed fusion manufacturing. *Materials*, 10(10):1154, doi:10.3390/ma10101154.

Müller-Heupt, L.K., Schiegnitz, E., Kaya, S., Jacobi-Gresser, E., Kämmerer, P.W. and Al-Nawas, B. (2022). Diagnostic tests for titanium hypersensitivity in implant dentistry: a systematic review of the literature. *Int J Implant Dent.*, vol. 8(1), no. 29, pp. 1–11, doi:10.1186/s40729-022-00428-0.

Revilla-León, M., Gomez-Polo, M., Vyas, S., Barmak, A.B., Gallucci, G., Att, W. (2021). Artificial intelligence applications in implant dentistry: A systematic review. *J Prosthet Dentol.*, vol. 129(2), pp. 293–300, doi:10.1016/j.prosdent.2021.05.008.

Romanos, G.E. (2021). *Lasers in Periodontology. Advanced Laser Surgery in Dentistry.* John Wiley & Sons. doi:10.1002/9781119583318

Singla, A.K., Banerjee, M., Sharma, A., Singh, J., Bansal, A. and Gupta, M.K. (2021). Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments. *J Manuf. Process.*, vol. 64, pp. 161–187, doi:10.1016/j.jmapro.2021.01.009.

Tolochko, N.K., Khlopkov, Y.V. and Mozzharov, S.E. (1995). Main relationships governing laser sintering of loose single-component metallic powders. *J Adv Mater.* vol. 2(2), pp. 151–157, doi:10.1108/13552540310467077.

Tolochko, N.K., Yadroitsev, I.A., Mozzharov, S.E. and Michailov, V.B. (1998). Selective laser sintering: some questions of physics and technology. In: *Proceedings of the 1998 World Congress on Powder Metallurgy; Granada, Spain*, pp. 407–412.

Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M. and Choong, P. (2016). Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials*, vol. 83, pp. 127–141. doi:10.1016/j.biomaterials.2016.01.012.

Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Du Plessis, A. and MacDonald, E. (2021). *Fundamentals of laser powder bed fusion of metals*. Amsterdam, Elsevier, 654 p.

Yuan, L., Ding, S. and Wen, C. (2018). Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review. *Bioact Mater.*, vol. 4, pp. 56–70, doi:10.1016/j.bioactmat.2018.12.003.

### Информация об авторах

### Information about the authors

#### Шут Виктор Николаевич

Доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: shut@vstu.by

#### Кузнецов Андрей Александрович

Доктор технических наук, профессор, ректор Витебского государственного технологического университета, Республика Беларусь.

#### Мозжаров Сергей Евгеньевич

Научный сотрудник научно-исследовательской части, Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

#### Толочко Николай Константинович

Доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный аграрный технический университет, Республика Беларусь.

#### Кабанова Арина Александровна

Доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии с курсом ФПК и ПК, Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет, Республика Беларусь.

#### Victor N. Shut

Doctor of Science (in Physical and Mathematical), Professor, Professor of the Department "Automation of Technological Processes", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: shut@vstu.by

#### Andrey A. Kuznetsov

Doctor of Science (in Engineering), Professor, Rector of Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

#### Sergey E. Mozharov

Researcher of Research Sector, Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

#### Nicolay K. Tolochko

Doctor of Science (in Physical and Mathematical), Professor, Belarusian State Agrarian Technical University, Republic of Belarus.

#### Arina A. Kabanova

Doctor of Science (in Medical), Associate Professor, Chair of the Department of Maxillofacial Surgery and Surgical Dentistry with the Course of the Faculty of Advanced Training and Staff Retraining, Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, Republic of Belarus.

## Термохимическое поведение полиакрилонитрильных волокон, модифицированных высокодисперсными материалами

Л. А. Щербина, И. С. Радковский,  
И. А. Будкоте

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь

**Аннотация.** С целью оценки влияния высокодисперсных частиц на термохимическое поведение, модифицируемой ими терморезактивной структуры полиакрилонитрильных волокон, осуществлено изучение методом синхронного термического анализа изменение характера теплового потока и потери массы образцами волокон при варьировании в них содержания частиц CuO, ZnO, MgO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Ni от 0 до 5,0 % (масс.), имеющих размер от 20 до 110 нм и удельную площадь поверхности от 5 до 40 м<sup>2</sup>/г.

Установлены существенные различия во влиянии природы и содержания наноразмерных частиц на протекание термохимических процессов в терморезактивной структуре наномодифицированных полиакрилонитрильных волокнистых материалов. Наиболее активное, но антибатное, влияние, на термохимическое поведение полиакрилонитрильных волокон оказывают наноразмерные частицы CuO, MgO, а наименее заметное влияние – ZnO и Ni.

Отмечена закономерность, проявляющаяся в том, что введение в полиакрилонитрильные волокна наноразмерных в количестве до 0,5 % (масс), как правило, приводит к большему удельному изменению температур начала, максимума, окончания и величин тепловых эффектов, а также потери массы при термохимическом превращении в процессах полициклизации и термоокислительной деструкции полимерной структуры волокон, чем последующее увеличение содержания этих наночастиц в волокне.

Получены данные, указывающие на перспективность эффективного применения наноразмерных модификаторов для направленного модифицирования терморезактивных свойств и огнестойкости полиакрилонитрильных волокнистых материалов как при разработке прекурсоров углеродных волокнистых материалов, содержащих активные включения, так и материалов с пониженной горючестью или повышенной теплостойкостью.

**Ключевые слова:** высокодисперсная частица, наночастица, полиакрилонитрил, волокно, термический анализ, термоокислительная стабилизация, полициклизация, горение, теплота, потеря массы.

**Информация о статье:** поступила 19 ноября 2025 года.

Статья подготовлена по материалам доклада Международной научно-технической конференции «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2025)», которая состоялась 18–19 ноября 2025 года в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» (Республика Беларусь).

## Thermochemical behavior of polyacrylonitrile fibers modified with highly dispersed materials

Leonid A. Shcherbina, Ivan S. Radkovsky,  
Iryna A. Budkute

Belarusian State University of Food and Chemical Technologies,  
Republic of Belarus

**Abstract.** To assess the influence of highly dispersed particles on the thermochemical behavior of the thermosetting structure of polyacrylonitrile fibers they modify, a research was carried out using synchronous thermal analysis to determine changes in the nature of heat flow and mass loss in fiber samples with varying particle contents of CuO, Zn, ZnO, MgO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, and Ni from 0 to 5.0 % (wt.), with sizes ranging from 20 to 110 nm and specific surface areas ranging from 5 to 40 m<sup>2</sup>/g.

Significant differences were found in the influence of the nature and content of nanoscale particles on the thermochemical processes in the thermosetting structure of nanomodified polyacrylonitrile fibrous materials. Nanoscale CuO and MgO particles exert the most active, yet antibate, influence on the thermochemical behavior of polyacrylonitrile fibers, while ZnO and Ni particles exert the least noticeable influence. A pattern has been noted whereby the introduction of nanoscale

modifiers in amounts of up to 0.5% [by weight] into polyacrylonitrile fibers typically leads to a greater specific change in the onset, maximum, and end temperatures and magnitudes of thermal effects, as well as mass loss during thermochemical transformation during polycyclization and thermal-oxidative degradation of the fiber's polymer structure, than a subsequent increase in the content of these nanoparticles in the fiber.

Data have been obtained indicating the potential for the effective use of nanoscale modifiers for targeted modification of the thermosetting properties and fire resistance of polyacrylonitrile fibrous materials, both in the development of precursors for carbon fibrous materials containing active inclusions and in materials with reduced flammability or increased heat resistance.

**Keywords:** fine particle, nanoparticle, polyacrylonitrile, fiber, thermal analysis, thermo-oxidative stabilization, polycyclization, combustion, heat, mass loss.

**Article info:** received November 19, 2025.

The article summarizes the research materials presented at the International Scientific and Technical Conference "International Conference on Textile and Apparel Innovation" (ICTAI-2025), held on November 18–19, 2025 at Vitebsk State Technological University (Republic of Belarus).

## Введение

Без сомнения, модифицирование структуры может служить оптимальным вариантом расширения спектра свойств материалов на основе уже выпускаемых промышленностью волокнообразующих полимеров, а также корректировки их целевых характеристик. Для этого современные технологии все больше обращаются к явлениям, связанным с особым физическим влиянием наноразмерных структур на свойства матриц композитных систем. Эти тенденции не обошли стороной и полимерные материалы, в том числе анизотропные волокнистые структуры. Исследователи отмечают влияние наноразмерных частиц (НЧ) на физико-химические, механические, теплофизические, электрические и другие свойства материалов (Блохин и др., 2012; Ленартович и др., 2024).

Например, наноразмерные частицы ZnO, CuO, MgO, а также Si и Zn проявляют антибактериальные эффекты (Мацакова и Симакова, 2020; Дмитриевская, 2017; Тамаю et al., 2015; Bindhu et al., 2016). Медь используется в каталитических реакциях (Воробьева, 2022) и для создания электропроводящих материалов (Жабин и Няфкин, 2022). Применимость никеля и других металлов для модификации волокнистых материалов принципиально аналогична меди и цинка. Высокодисперсный MgO также находит применение в гетерогенном катализе в органическом синтезе (Jun et al., 2015; Selim et al., 2015). Помимо этого, он представляет интерес в производстве датчиков влажности и газов кислотного характера, в процессах водо- и газоочистки от газов кислотного характера, примесей кислотного характера (Rizwan et al.,

2007), для дезактивации химического оружия и боевых отравляющих веществ, нейтрализации токсических выбросов (Zeyneb, Sema, and Sabriye, 2012). Электрофизическую активность волокнистым материалам могут придавать оксиды железа (Важенина и др., 2023). Повышение огне- и термостойкости полимерных материалов можно ожидать при введении в них наночастиц оксида и бората цинка, MgO (Хай и др., 2018; Буй и др., 2019; Хархуш и др., 2019).

Это указывает на перспективность расширения ассортимента полимерных волокнистых материалов путем их модификации на наноразмерном уровне. К числу таких материалов можно отнести полиакрилонитрильные (ПАН) волокна, в том числе используемые в качестве прекурсоров углеродных волокнистых материалов (УВМ) и текстильных материалов.

Введение наноразмерных модификаторов в структуру ПАН волокон текстильного и технического назначения или УВМ должно позволить изменить их поведение в энергетических полях различной природы, а также скорректировать их физико-химическую, электрофизическую, биологическую активность, придать им каталитические свойства и другие характеристики.

Отсутствие достаточных сведений о том, как повлияют наноразмерные частицы на стабильность протекания технологических процессов получения и переработки ПАН волокнистых материалов, сдерживает широкое внедрение перспективных наноразмерных модификаторов в производственную практику.

Специфической отличительной особенностью ПАН волокон от большинства других видов распространенных

волокнистых материалов является то, что их полимерная структура термореактивна. Это можно рассматривать как их недостаток, так и их достоинство. Объясняется это тем, что в результате нагревания в таких материалах активируется экзотермический процесс полициклизации первичной структуры полиакрилонитрила, который активно распространяется на более высокие уровни его структурной организации. При этом к недостаткам ПАН волокон можно отнести то, что выделяющаяся тепловая энергия по автотермическому механизму может приводить к воспламенению оказавшихся в тепловом поле полиакрилонитрильных материалов. Это осложняет разработку негорючих изделий на основе волокнообразующих сополимеров акрилонитрила. Тем не менее, разработка технологических решений по управлению автотермическим процессом полициклизации полимерной структуры полиакрилонитрильных материалов перспективна для практического использования их важнейшего преимущества перед другими видами волокон в качестве ценного предшественника углеродных волокнистых материалов.

С этих позиций представляет практический интерес рассмотрение влияния наноразмерных частиц различной природы на внутрискруктурные превращения полиакрилонитрильного субстрата в воздушной среде: и при его термоокислительной стабилизации (полициклизации) в результате нагревания, и при его термоокислительной деструкции в процессе горения.

Для проведения таких исследований хорошо подходит метод синхронного термического анализа, позволяющий в процессе нагревания исследуемых образцов контролировать фактическое изменение их температуры и массы. Это позволяет в одном акте эксперимента оценить влияние наноразмерных частиц не только на процесс превращения полиакрилонитрильных прекурсоров в углеродные волокнистые материалы со специальными свойствами, но и на негорючесть полиакрилонитрильных волокон, используемых в бытовых изделиях (трикотаже, ковровых изделиях и др.).

Исходя из имеющихся данных, в качестве наноразмерных модификаторов были использованы оксиды меди (CuO), цинка (ZnO), магния (MgO), которые потенциально способны изменить протекание термоокислительных процессов в полиакрилонитрильном волокне, а также оксид железа ( $Fe_3O_4$ ) и никель (Ni) для придания УВМ на основе полиакрилонитрильных прекурсоров специфической электрофизической активности. Не-

смотря на большое количество источников, посвященных применению рассматриваемых веществ для модификации свойств полимерных материалов, информация о влиянии наноразмерных частиц CuO, ZnO, MgO,  $Fe_3O_4$ , Ni на термореактивное поведение полиакрилонитрильных волокнистых материалов при нагревании практически отсутствует.

Поэтому целью данной работы стала оценка методом синхронного термического анализа влияния указанных наноразмерных частиц на процесс термохимического превращения в воздушной среде полиакрилонитрильных волокон, как при термообработке, так и при термоокислительной деструкции в процессе горения, для подтверждения потенциальных направлений использования наноразмерных модификаторов.

#### Методы и средства исследований

В качестве модифицированных наноразмерными частицами модельных образцов были использованы ПАН волокна на основе волокнообразующего терсополимера (ВТП) поли[акрилонитрил (АН) (91) – со – метилакрилат(МА) (8) – со – 2-акриламид-2 метилпропансульфо кислота (АМПС) (1 % (масс))], сформованные из прядильных растворов, содержащих наноразмерные частицы никеля (Ni), оксидов меди (CuO), цинка (ZnO), магния (MgO) или железа ( $Fe_3O_4$ ), имеющих размер от 20 до 110 нм, удельную площадь поверхности от 5 до 40 м<sup>2</sup>/г и полученные методом взрыва проводника в инертной или кислородсодержащей среде (таблица 1).

Получение ПАН волокон с линейной плотностью 0,33 текс осуществляли аналогично [Щербина и др., 2023] из (21,0 ± 0,3) % (масс.) растворов ВТП в диметилформамиде (ДМФ). Содержание модификаторов в прядильных растворах (здесь и далее по тексту в % от массы системы «ВТП–НЧ») составляло: 0; 0,1; 0,5; 5,0. После формования и пластификационного вытягивания в 5 раз при температуре (96 ± 2) °С гель-волокна сушили при (20 ± 5) °С.

При исследовании термохимического поведения экспериментальных образцов использовали термоанализатор ZCT-A (КНР). Для этого образец волокна массой до (10 ± 3) мг помещали в керамические тигли, предварительно прокаленные в течение часа в муфельной печи при 1000 °С и охлажденные в эксикаторе. Далее тигель с образцом и пустой тигель сравнения помещали в ячейку весов термоанализатора. Регистрацию изменения массы и теплофизических процессов, происходящих с образцом, осуществляли при скорости подъема

Таблица 1 – Свойства высокодисперсных модификаторов  
Table 1 – Properties of highly dispersed modifiers

Материал	Удельная площадь поверхности (м <sup>2</sup> /г)	Размер частиц (нм)	Насыпная плотность (г/см <sup>3</sup> )	Чистота (%)
Оксид меди (CuO), смесь (CuO и Cu <sub>2</sub> O)	20 ± 2	50–90	2,22	≥ 99,8
Оксид цинка (ZnO)	10 ± 3	20–40	0,48	≥ 98
Оксид магния (MgO)	40 ± 10	20–30	0,15	≥ 99,9
Оксид железа (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	10 ± 2	80–110	1,03	≥ 98
Никель металлический (Ni)	5,2 ± 0,8	70–80	0,66	≥ 99,8

температуры 10 °С/мин.

### Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

В качестве примера на рисунках 1 и 2 представлены термограммы модельных образцов ПАН волокон, модифицированных наноразмерными частицами ZnO и MgO. Во всех случаях на термограммах отсутствовали тепловые эффекты, связанные с фазовыми переходами, но четко проявлялись характерные для ПАН экстремумы экзотермических эффектов. Первый экзотермический

эффект связан с активным протеканием процесса полициклизации в структуре нагреваемого полиакрилонитрильного волокна. Второй экзотермический эффект вызван процессом горения ПАН материала в воздушной среде (рисунки 1 б и 2 б). Во всех случаях эти экзотермические процессы сопровождались уменьшением массы модельных образцов (рисунки 1 а и 2 а).

Потеря массы полиакрилонитрильным волокном в температурной области протекания процесса полициклизации вызвана выделением побочных продуктов ре-

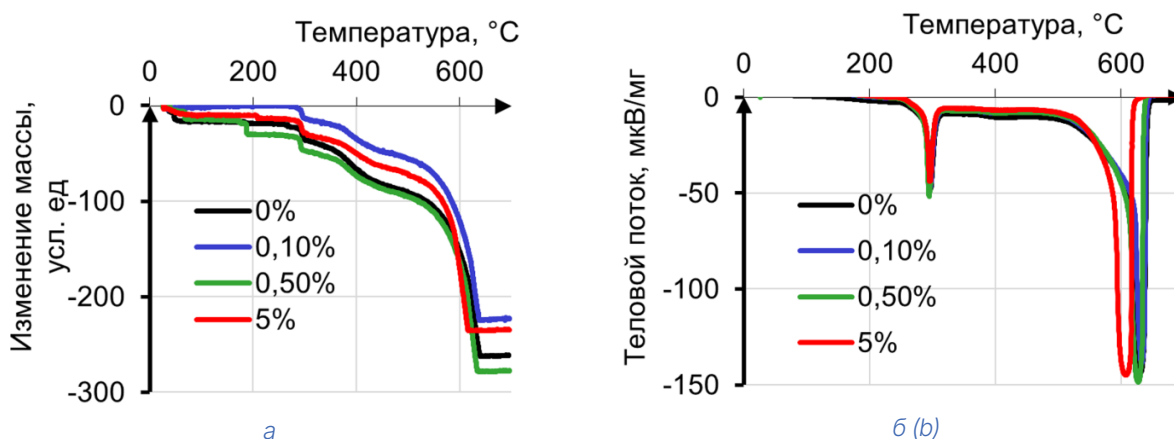


Рисунок 1 – Термограммы образцов полиакрилонитрильных волокон, содержащих наноразмерные частицы оксида цинка:  
а – изменение массы; б – термический эффект

Figure 1 – Thermograms of polyacrylonitrile fiber samples containing nanosized zinc oxide particles:  
а – weight loss; б – thermal effect

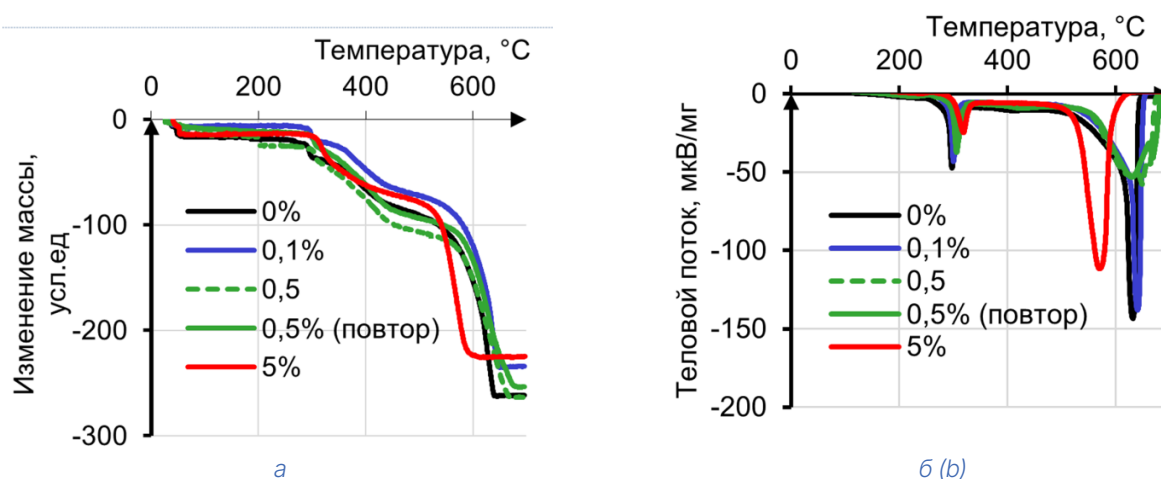


Рисунок 2 – Термограммы образцов полиакрилонитрильных волокон, содержащих наноразмерные частицы оксида магния:  
а – изменение массы; б – термический эффект

Figure 2 – Thermograms of polyacrylonitrile fiber samples containing nanosized magnesium oxide particles:  
a – weight loss; b – thermal effect

акций перестройки химической структуры полимерного субстрата, в диапазоне температур горения – прежде всего его окислительной деструкцией и возгонкой продуктов деструкции.

Анализ термограмм модельных образцов модифицированных волокон показывает, что природа наночастиц и их содержание в структуре полиакрилонитрильного субстрата оказывает влияние на его термохимическое поведение.

На основе анализа экстремумов экспериментально полученных термограмм образцов модифицированных волокон были определены фактические значения температур начала ( $T_{нач}$ ), максимума ( $T_{макс}$ ) и окончания ( $T_{кон}$ ) экзотермических эффектов при термическом превращении полиакрилонитрильной матрицы волокон, модифицированных с наноразмерными частицами (рисунок 3).

Изменения значений тепловых эффектов, оцениваемых по площадям пиков, и потери массы образцами модельных волокон в результате введения в них наночастиц различной природы можно проследить по данным, представленным на рисунке 4.

В результате анализа полученных экспериментальных результатов установлено, что введение и увеличе-

ние содержания от 0,1 до 5,0 % наноразмерных частиц  $\text{CuO}$  наиболее существенно в рассматриваемой серии экспериментов снижает температуры максимума и начала процесса полициклизации в структуре полиакрилонитрильных волокон, а также температурные диапазоны процесса горения.

При этом введение до 0,5 % наноразмерных частиц  $\text{CuO}$  в структуру полиакрилонитрильных волокон снижает тепловой эффект полициклизации, а до 0,1% – тепловой эффект горения. Дальнейшее увеличение содержания наноразмерных частиц  $\text{CuO}$  приводит к возрастанию тепловых эффектов полициклизации и горения вплоть до максимальных значений из всей серии экспериментов. При этом изменение массы образцов, содержащих наноразмерные частицы  $\text{CuO}$ , в результате протекания полициклизации и горения находится в диапазоне среднестатистических значений во всей серии экспериментов. Исключением является введение 5,0 % наноразмерных частиц  $\text{CuO}$ , что приводит к наибольшим потерям массы модифицированными волокнами при горении.

В противоположность влиянию наноразмерных частиц  $\text{CuO}$ , выражающемуся в кажущемся снижении потенциального барьера термохимических превращений в полиакрилонитрильных волокнах, введение наночастиц

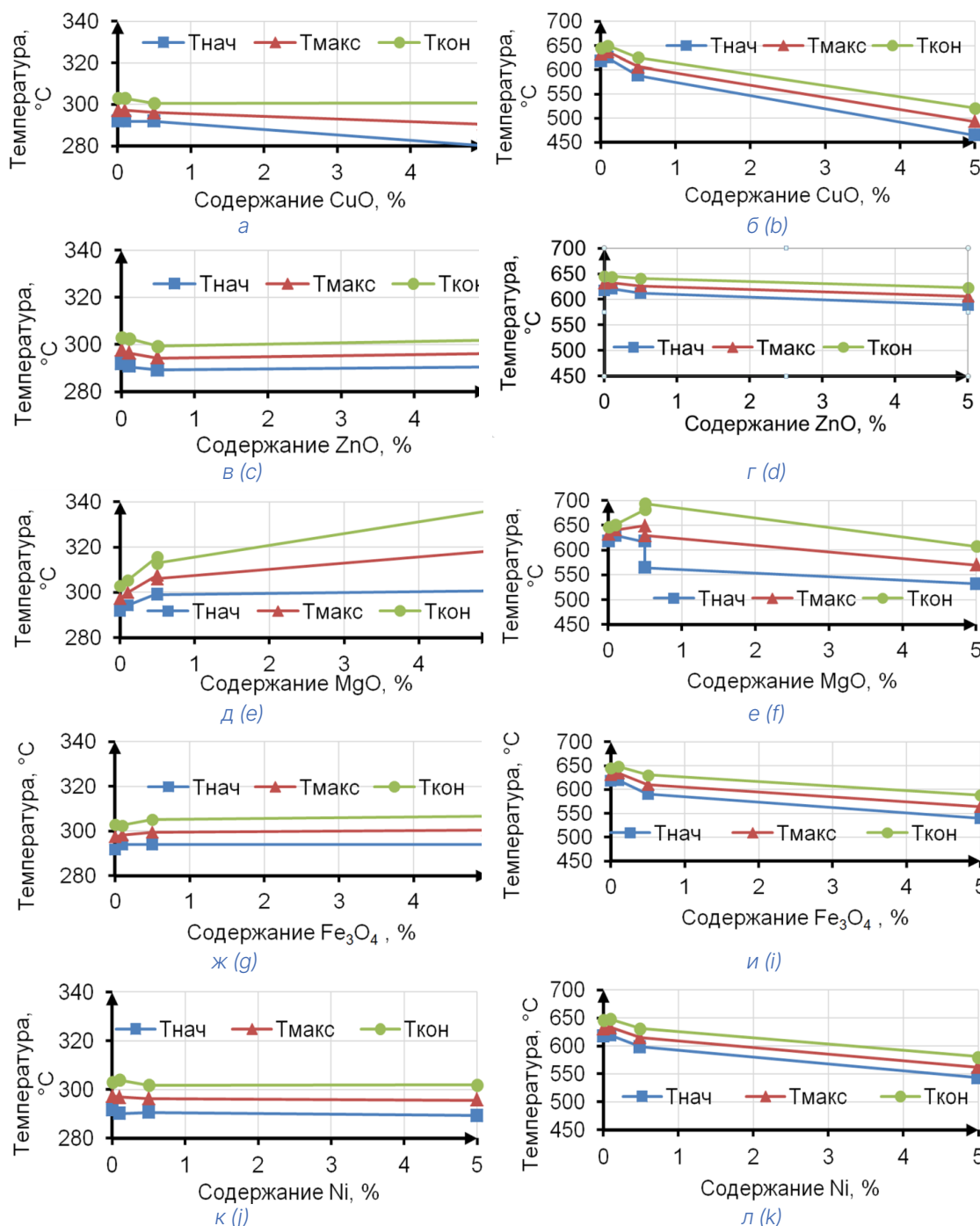


Рисунок 3 – Влияние содержания наноразмерных частиц (в % от массы волокна) на температуры начала ( $T_{нач}$ ), максимума ( $T_{макс}$ ) и окончания ( $T_{кон}$ ) пиков экзотермических эффектов полициклизации (а, в, д, ж, к) и горения (б, г, е, и, л) полимерной структуры наномодифицированных полиакрилонитрильных волоконт  
 Figure 3 – Effect of the content of nanosized particles (in % of the fiber mass) on the temperature of the onset ( $T_{initial}$ ), maximum ( $T_{max}$ ), and end ( $T_{final}$ ) of the peaks of the exothermic effects of polycyclization (a, c, d, g, j) and combustion (b, d, f, i, k) of the polymer structure of nanomodified polyacrylonitrile fibers

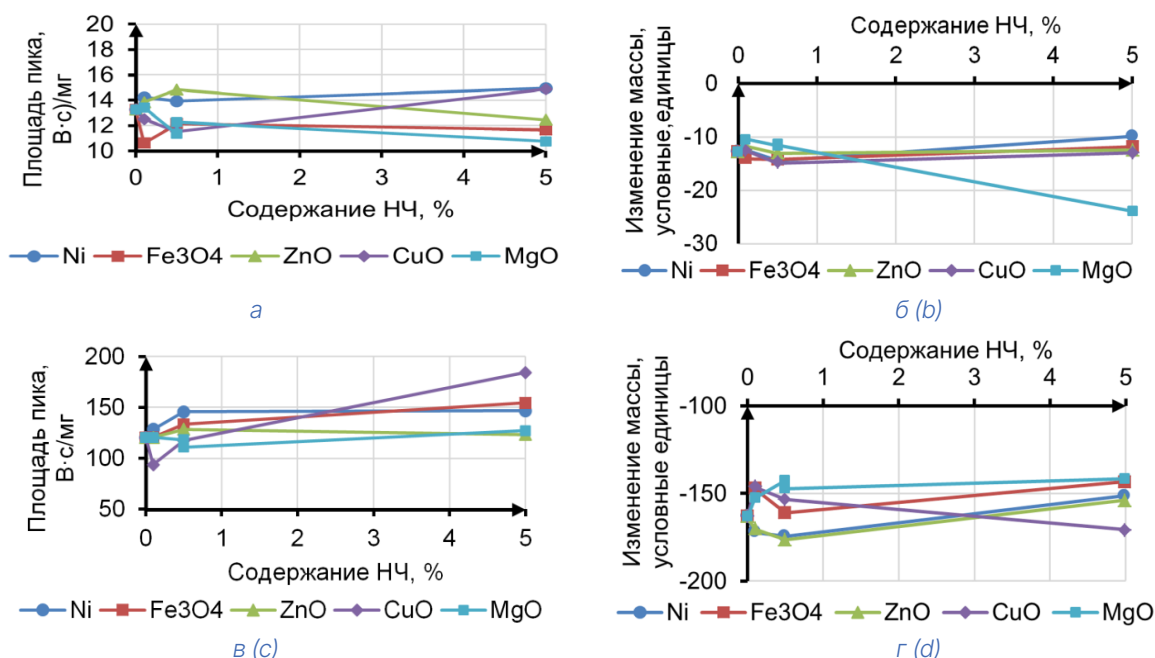


Рисунок 4 – Влияние содержания наноразмерных частиц (в % от массы волокна) на площади пиков и потерю массы при экзотермических эффектах полициклизации (а, б) и горения (в, г) полимерной структуры наномодифицированных полиакрилонитрильных волокон  
 Figure 4 – Influence of nanosized particles content (in % of the fiber mass) on the peak areas and mass loss during of polycyclization exothermic effects (a, b) and combustion (c, d) of the nanomodified polyacrylonitrile fibers polymer structure

MgO приводит к наибольшему смещению протекания процесса полициклизации в область более высоких температур, в наибольшей степени расширяя температурный диапазон проявления данного процесса, а также температурный диапазон процесса горения. Эти экспериментальные данные указывают на увеличение потенциального барьера термохимических процессов в присутствии наноразмерных частиц MgO.

При этом введение наночастиц MgO и увеличение их содержания до 5,0 % (масс.) вызывает максимальное снижение теплового эффекта и максимальное снижение массы образцов модифицированных волокон в процессе полициклизации (в данном исследовании). Вместе с тем, существенного влияния наноразмерных частиц MgO в количестве 5,0 % (масс.) на протекание процесса горения модифицированных волокон не отмечено.

Таким образом, наноразмерные частицы CuO, по-видимому, способствуют «облегчению» протекания процессов полициклизации и горения ПАН материалов.

А наноразмерные частицы MgO затрудняют протекание процессов полициклизации и горения, и, видимо, направляют процесс полициклизации по иной кинетической схеме, делая его менее теплотворным и приводя к более значительной потере атомов углерода в виде побочных летучих продуктов.

Полученные результаты позволяют рассматривать наноразмерные частицы CuO в количестве до 0,5 % (масс.) как потенциальный регулятор процесса термоокислительной стабилизации полиакрилонитрильных прекурсоров при получении УВМ. При этом наноразмерные частицы MgO в количестве до 0,5 % (масс.) целесообразно апробировать в качестве замедлителя горения полиакрилонитрильных волокнистых материалов.

Введение наноразмерных частиц Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в количестве до 0,5 % также, как и в случае введения частиц MgO, повышает температуру протекания процесса полицикликации, но это повышение не столь значительно и практически не отмечается при дальнейшем увеличении

содержания наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в структуре волокон до 5,0 % [масс.].

Наноразмерные частицы  $\text{ZnO}$  и  $\text{Ni}$ , по-видимому, оказывают наименьшее (из всех рассматриваемых вариантов) влияние на процесс полициклизации. При этом увеличение содержания наноразмерных частиц  $\text{ZnO}$  до 0,5 % все же незначительно снижает температуры начала, максимума и окончания процесса полициклизации и незначительно повышает его тепловую отдачу. Дальнейшее повышение содержания  $\text{ZnO}$  в структуре волокон существенно не влияет на данные температурные показатели процесса полициклизации, но незначительно снижает его тепловой эффект.

При введении наночастиц  $\text{ZnO}$  температурные показатели, характеризующие проявление процесса горения, снижаются, как и в присутствии большинства других рассматриваемых модификаторов. Однако это влияние наночастиц  $\text{ZnO}$  на горение ПАН волокон оказалось не столь значительным.

Увеличение содержания в структуре ПАН волокон наноразмерных частиц  $\text{Ni}$  от 0,5 до 5,0 % [масс.], в целом, не оказало достоверного влияния на температурный диапазон протекания процесса полициклизации, однако более существенно снизило его тепловой эффект, в сравнении с введением наночастиц  $\text{ZnO}$ .

Что касается влияния наноразмерных частиц  $\text{ZnO}$  и  $\text{Ni}$  на протекание процесса горения ПАН волокон, то в присутствии данных модификаторов не наблюдается влияния увеличения их содержания на тепловой эффект данного процесса. В то же время прослеживается следующая закономерность: при увеличении содержания наноразмерных частиц  $\text{ZnO}$  и  $\text{Ni}$  до 0,5 % [масс.] в структуре ПАН волокон имеется тенденция к существенному увеличению значения потери их массы, которая затем постепенно снижается при росте содержания наноразмерных частиц  $\text{ZnO}$  и  $\text{Ni}$  до 5,0 % [масс.].

Также важно отметить следующую наблюдаемую закономерность: введение наноразмерных частиц в количестве примерно до 0,5 % [масс.] в матрицу ПАН волокон, как правило, приводит к большему удельному изменению (росту или снижению, в зависимости от природы модификатора) всех рассматриваемых показателей при термохимическом превращении данной полимерной структуры, чем последующее увеличение содержания в ней тех же наноразмерных частиц до 5,0 % [масс.].

## Выводы

Установлено, что из всех апробированных в данной работе модификаторов только введение и увеличение содержания наноразмерных частиц  $\text{MgO}$  в матрице полиакрилонитрильных волокнистых материалов приводит к существенному увеличению температур начала, максимума и окончания температурной зоны протекания процесса полициклизации, а также расширению этой зоны в область более высоких температур. При этом только в присутствии наноразмерных частиц  $\text{MgO}$  было отмечено существенное расширение температурного диапазона процесса термоокислительной деструкции (горения, окисления) полиакрилонитрильной матрицы со смещением максимума и окончания данного процесса в область более высоких температур.

Наибольшее влияние на снижение температуры начала и максимума проявления теплового эффекта процесса полициклизации с расширением зоны этого процесса в область более низких температур, а также на наиболее существенное снижение температурной зоны проявления теплового эффекта горения оказывает присутствие в структуре полиакрилонитрильных волокон наноразмерных частиц  $\text{CuO}$ .

Наибольшее снижение величины теплового эффекта полициклизации наблюдалось при содержании в волокне 0,1 %  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и 5,0 %  $\text{MgO}$ . Наибольшее снижение теплоты горения наблюдалось при содержании в волокне 0,1 %  $\text{CuO}$ . Вместе с тем, повышение содержания наноразмерных частиц  $\text{CuO}$  до 5,0 % привело к максимальным из всей серии экспериментов выделениям тепловой энергии в процессе полициклизации и горения. Наименьшее влияние на тепловую отдачу при горении оказали наноразмерные частицы  $\text{ZnO}$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{Ni}$ .

Что касается изменения массы образцов в процессах полициклизации и горения, то его характер также связан с природой и содержанием наноразмерных частиц в полиакрилонитрильных волокнах. При этом в наибольшей степени имеются отличия во влиянии  $\text{Ni}$   $\text{MgO}$  на динамику изменения массы ПАН волокон при полициклизации. Этот процесс в присутствии наночастиц  $\text{MgO}$  протекает антибатно по отношению к вариантам с введением других наночастиц. Так, при введении в волокно до 0,1 %  $\text{MgO}$  сначала отмечается незначительное уменьшение потери массы образцов, по сравнению с другими образцами, а при дальнейшем увеличении содержания в полиакрилонитрильных волокнах  $\text{MgO}$  до 5,0 % – стремительный рост потери массы. Последнее

нежелательно, так как приводит к снижению выхода углерода при получении УВМ на основе полиакрилонитрильных прекурсоров.

Таким образом, исследование термического поведения наномодифицированных полиакрилонитрильных волокон позволяет отметить различия во влиянии природы и содержания наноразмерных частиц на протекающие термохимических процессов в термореактивной полимерной структуре волокон и дает возможность указать наиболее эффективные направления применения рассмотренных модификаторов полиакрилонитрильных волокнистых материалов:

- наноразмерные частицы MgO в количестве около 0,5 % (масс.), как модификатор, потенциально способный снизить горючесть полиакрилонитрильных волокнистых

материалов текстильного назначения;

- наноразмерные частицы CuO в количестве около 0,5 % (масс.), как модификатор, способный снизить тепловой эффект полициклизации с целью оптимизации процесса термоокислительной стабилизации полиакрилонитрильных прекурсоров в производстве углеродных волокнистых материалов;

- наноразмерные частицы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Ni в качестве модификаторов электрофизической активности углеродных волокнистых материалов, которые могут быть введены в структуру полиакрилонитрильных прекурсоров в количестве не менее 5 % (масс) без существенного нарушения процесса их термоокислительной стабилизации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Блохин, А.Н. Таров, В.П., Толстых, М.С. (2012). Влияние нанодисперсных частиц на прочностные свойства полимерных матриц. *Вестник ТГТУ*, Т18, № 3, С. 737–741.

Буй, Х.Х., Хоанг, В.А., Хархуш, А. А., Хоанг, Т.Х. и Юртов, Е.В. (2019). Исследование влияния наночастиц оксида цинка на огне- и термостойкость наноматериалов на основе ненасыщенной полиэфирной смолы. *Успехи в химии и химической технологии*, Т 33, № 10. С. 8–9.

Важенина, И.Г., Столяр, С.В., Тюменцева, А.В., Волочаев, М.Н., Исхаков, Р.С., Комогорцев, С.В., Пьянков, В.Ф. и Николаева, Е.Д. (2023). Исследование магнитных наночастиц оксида железа, покрытых оксидом кремния, методом ферромагнитного резонанса. *Физика твердого тела*, Т 65, № 6, С. 923–9275. DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55644.01N.

Воробьева, Е.В. и Борисов, И.М. (2022). Особенности окисления предельных углеводородов (C10-C15) в контакте с дисперсной медью, взаимосвязь процесса с физико-химическими показателями. *Известия вузов. Химия и хим. технология*, Т 65, № 7, С. 79–87. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6577.

Дмитриевская, А. А. (2017). Биоцидные свойства суспензий наночастиц металлов и их оксидов. *Бюллетень медицинских Интернет-конференций*, Т 7, № 6, С 876–878.

Жабин, А.Н. и Няфкин, А.Н. (2022). Волокнистые металлические композиционные материалы на основе меди (обзор). *Труды ВИАМ*, № 9 (115), С. 99–110. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-99-110.

Ленартович, Л. А., Прокопчук, Н.Р., Касперович, О.М., Петрушеня и А.Ф., Любимов, А.Г. (2024). Влияние наночастиц оксидов металлов на свойства полимерных материалов (обзор). *Труды БГТУ*, Серия 2, № 2, С. 65–76.

Мацакова, Е.Г. и Симакова, Д.И. (2020). Наночастицы, проявляющие антибактериальные эффекты: свойства, получение, механизм действия, применение. *Российские нанотехнологии*, Т 15, № 2, С. 238–243. doi: 10.1134/s1992722320020156.

Хай, Х.Т., Хархуш, А.А., Серцова, А.А., Маракулин, С.И. и Юртов, Е.В. (2018). Разработка антипиренов на основе наночастиц оксида и бората цинка для повышения огне- и термостойких характеристик пластифицированного ПВХ. *Успехи в химии и химической технологии*, Т 32, № 10, С. 59–61.

Хархуш, А.А., Хоанг, Т.Х., Сейткасымова, А.А. и Юртов, Е.В. (2019). Влияние концентраций оксида магния на огне- и термостойкость ненасыщенных полиэфирных смол. *Успехи в химии и химической технологии*, Т 33, № 10, С. 59–61.

Щербина, Л. А., Городнякова, И.С., Пчелова, Н.В., Будкуте, И. А. и Устинов, К.Ю. (2023). Структурно-морфологические особенности волокон, получаемых по диметилформамидной технологии из терсополимеров акрилонитрила, метилакрилата и итаконовой кислоты. *Полимерные материалы и технологии*, Т 9, № 2, С. 55–67. doi: 10.32864/

polymmattech-2023-9-2-55-67.

Tamayo, L.A., Zapata, P.A., Rabagliati, F.M., Azócar, M.I., Muñoz, L.A., Zhou, X., Thompson, G.E. and Páez, M.A. (2015). Antibacterial and non-cytotoxic effect of nanocomposites based in polyethylene and copper nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, No. 26 (3), pp. 129–135. doi: 10.1007/s10856-015-5475-6.

Bindhu, M.R., Umadevi, M., Micheal, M.K., Arasu, M.V. and Al-Dhabi, N.A. (2016). Structural, morphological and optical properties of MgO nanoparticles for antibacterial applications. *Materials Letters*, vol. 166, pp. 19–22.

Jun, Ch., Shuanghong, T., Jiang, L. and Ya, X. (2015). Catalytic performance of MgO with different exposed crystal facets towards the ozonation of 4-chlorophenol. *Applied Catalysis A: General*, 2015, vol. 506, pp. 118–125.

Selim, D., Selim, D., Öztürk, B., Erol, M., Yildirim, S., Yildirim, S., Yigit, E., Sancakoglu, O., Çelik, S. and Batar, T. (2015). Synthesis and comparison of the photocatalytic activities of flame spray pyrolysis and sol-gel derived magnesium oxide nano-scale particles. *Materials Science in Semiconductor Processing*, No. 34, pp. 154–161. DOI: 10.1016/j.mssp.2015.02.029.

Rizwan, W., Ansari, S.G., Mushtaq, A.D., Kim, Y.S. and Shin, H.-S. (2007). Synthesis of magnesium oxide nanoparticles by sol-gel process. *Materials Science Forum*, vol. 558–559, pp. 983–986. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.558-559.983.

Zeyneb, C., Sema, E. and Sabriye, Y. (2012). Magnesium Oxide Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Uranium Sorption Properties. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, vol. 31, No. 4, pp. 536–543.

## REFERENCES

Blokhin, A.N. Tarov, V.P. and Tolstykh, M.S. (2012). Influence of Nanodispersed Particles on the Strength Properties of Polymer Matrices [Vliyanie nanodispersnykh chastic na prochnostnye svoystva polimernykh matric]. *Vestnik TGTU = Bulletin of TSTU*, vol.18, No. 3, pp. 737–741 [in Russian].

Bui, H.H., Hoang, V.A., Kharkhush, A.A., Hoang, T.H. and Yurtov, E.V. (2019). Study of the effect of zinc oxide nanoparticles on the fire and heat resistance of nanomaterials based on unsaturated polyester resin [Issledovaniye vliyaniya nanochastits oksida tsinka na ogne- i termostoykost' nanomaterialov na osnove nenasyshchennoy poliefirnoy smoly]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*, vol. 33, No. 10. P. 8–9 [in Russian].

Vazhenina, I.G., Stolyar, S.V.; Tyumentseva, A.V., Volochaev, M.N., Iskhakov, R.S., Komogortsev, S.V., Pyankov, V.F. and Nikolaeva, E.D. (2023). Study of magnetic iron oxide nanoparticles coated with silicon oxide by the ferromagnetic resonance method [Issledovaniye magnitnykh nanochastits oksida zheleza, pokrytykh oksidom kremniya, metodom ferromagnitnogo rezonansa]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*, Vol. 65, No. 6, pp. 923–9275. DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55644.01H [in Russian].

Vorobyova, E.V. and Borisov, I.M. (2022). Features of oxidation of saturated hydrocarbons (C10–C15) in contact with dispersed copper, the relationship of the process with physicochemical parameters [Osobennosti okisleniya predel'nykh uglevodorodov (S10–S15) v kontakte s dispersnoy med'yu, vzaimosvyaz' protsessa s fiziko-khimicheskimi pokazatelyami]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = News of universities. Chemistry and chemical technology*, vol. 65, No. 7, pp. 79–87. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6577 [in Russian].

Dmitrievskaya, A.A. (2017). Biocidal properties of suspensions of metal nanoparticles and their oxides [Biotsidnyye svoystva suspenziy nanochastits metallov i ikh oksidov]. *Byulleten' meditsinskikh Internet-konferentsiy = Bulletin of Medical Internet Conferences*, vol. 7, No. 6, pp. 876–878 [in Russian].

Zhabin, A.N. and Nyafkin, A.N. (2022). Copper-based fibrous metal composite materials (review) [Voloknistyye metallicheskiye kompozitsionnyye materialy na osnove medi (obzor)]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, No. 9 (115), pp. 99–110. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-99-110 [in Russian].

Lenartovich, L.A., Prokopchuk, N.R., Kaspersky, O.M., Petrushenya, A.F. and Lyubimov, A.G. (2024). Vliyanie nanochastits metallov na svobstva polimernykh materialov (review) [Vliyanie nanochastits oksidov metallov na svoystva polimernykh materialov (obzor)]. *Trudy BGTU, = Bulletin of BSTU*, Series 2, No. 2, pp. 65–76 [in Russian].

Matsakova, E.G. and Simakova, D.I. (2020). Nanoparticles exhibiting antibacterial effects: properties, production, mechanism of action, application [Nanochastitsy, proyavlyayushchiye antibakterial'nyye efekty: svoystva, polucheniye, mekhanizm deystviya, primeneniye]. *Rossiyskiye nanotekhnologii = Russian Nanotechnologies*, vol. 15, No. 2, pp. 238–

243. doi: 10.1134/s1992722320020156 [in Russian].

Hai, H.T., Kharkhush, A.A., Sertsova, A.A., Marakulin, S.I., and Yurtov, E.V. (2018). Development of flame retardants based on zinc oxide and zinc borate nanoparticles to enhance the flame and heat resistance of plasticized PVC [Razrabotka antipirenov na osnove nanochastits oksida i borata tsinka dlya povysheniya ogne- i termostoykikh kharakteristik plastifitsirovannogo PVKH]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*, vol. 32, No. 10, pp. 59–61 [in Russian].

Kharkhush, A.A., Hoang, T.H., Seitkasymova, A.A., and Yurtov, E.V. (2019). Effect of magnesium oxide concentrations on the flame and heat resistance of unsaturated polyester resins [Vliyaniye kontsentratsiy oksida magniya na ogne- i termostoykost' nenasyshchennykh poliefirnykh smol]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*, vol. 33, No. 10, pp. 59–61 [in Russian].

Shcherbina, L.A., Gorodnyakova, I.S., Pchelova, N.V., Budkute, I.A. and Ustinov, K.Yu. (2023). Structural and morphological features of fibers obtained by dimethylformamide technology from tersopolymers of acrylonitrile, methyl acrylate and itaconic acid [Strukturno-morfologicheskiye osobennosti volokon, poluchayemykh po dimetilformamidnoy tekhnologii iz tersopolimerov akrilonitrila, metilakrilata i itakonovoy kisloty]. *Polimernyye materialy i tekhnologii = Polymer Materials and Technologies*, vol. 9, No. 2, pp. 55–67. doi: 10.32864/polymmattech-2023-9-2-55-67 [in Russian].

Tamayo, L.A., Zapata, P.A., Rabagliati, F.M., Azócar, M.I., Muñoz, L.A., Zhou, X., Thompson, G.E. and Páez, M.A. (2015). Antibacterial and non-cytotoxic effect of nanocomposites based in polyethylene and copper nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, No. 26 (3), pp. 129–135. doi: 10.1007/s10856-015-5475-6.

Bindhu, M.R., Umadevi, M., Micheal, M.K., Arasu, M.V. and Al-Dhabi, N.A. (2016). Structural, morphological and optical properties of MgO nanoparticles for antibacterial applications. *Materials Letters*, vol. 166, pp. 19–22.

Jun, Ch., Shuanghong, T., Jiang, L. and Ya, X. (2015). Catalytic performance of MgO with different exposed crystal facets towards the ozonation of 4-chlorophenol. *Applied Catalysis A: General*, 2015, vol. 506, pp. 118–125.

Selim, D., Selim, D., Öztürk, B., Erol, M., Yildirim, S., Yildirim, S., Yigit, E., Sancakoglu, O., Çelik, S. and Batar, T. (2015). Synthesis and comparison of the photocatalytic activities of flame spray pyrolysis and sol-gel derived magnesium oxide nano-scale particles. *Materials Science in Semiconductor Processing*, No. 34, pp. 154–161. DOI: 10.1016/j.mssp.2015.02.029.

Rizwan, W., Ansari, S.G., Mushtaq, A.D., Kim, Y.S. and Shin, H.-S. (2007). Synthesis of magnesium oxide nanoparticles by sol-gel process. *Materials Science Forum*, vol. 558–559, pp. 983–986. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.558-559.983.

Zeyneb, C., Sema, E. and Sabriye, Y. (2012). Magnesium Oxide Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Uranium Sorption Properties. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, vol. 31, No. 4, pp. 536–543.

#### Щербина Леонид Александрович

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химия и технология высокомолекулярных соединений», Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь.

E-mail: [htvms73@yandex.by](mailto:htvms73@yandex.by)

#### Радковский Иван Сергеевич

Ассистент кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений», Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь.

#### Будкоте Ирина Александровна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений», Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь.

#### Leonid A. Shcherbina

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor, Chair of the Department "Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds", Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus.

E-mail: [htvms73@yandex.by](mailto:htvms73@yandex.by)

#### Ivan S. Radkovsky

Assistant of the Department "Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds", Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus.

#### Iryna A. Budkute

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor of the Department "Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds", Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus.

## Онлайн-ландшафт рынка труда Республики Беларусь: результаты сравнительной оценки основных участников

**Е. В. Ванкевич,  
И. Н. Калиновская**

*Витебский государственный технологический университет,  
Республика Беларусь*

**Аннотация.** В условиях цифровой трансформации экономики Республики Беларусь особое значение приобретает эффективность функционирования государственных информационных систем, обеспечивающих взаимодействие основных участников рынка труда. Информационный портал Государственной службы занятости ([gsz.gov.by](http://gsz.gov.by)) является ключевым элементом национальной инфраструктуры рынка труда, призванным обеспечить эффективное согласование спроса и предложения рабочей силы. Согласно Указу Президента Республики Беларусь от 18.01.2024 г. № 27 «Об обеспечении занятости населения», все наниматели обязаны в течение пяти дней размещать информацию о вакансиях в общереспубликанском банке вакансий, что делает портал [gsz.gov.by](http://gsz.gov.by) центральным инструментом государственного регулирования рынка труда.

Вместе с тем параллельное функционирование коммерческих платформ, демонстрирующих более высокую популярность среди пользователей, ставит под сомнение эффективность государственного портала и требует комплексного научного анализа причин сложившейся ситуации.

Целью исследования является разработка методологии информационно-аналитического мониторинга функциональности и эффективности основных онлайн-провайдеров услуг на рынке труда Республики Беларусь в целях повышения эффективности деятельности основных участников онлайн-ландшафта рынка труда и выявления возможностей повышения конкурентоспособности портала [gsz.gov.by](http://gsz.gov.by) как инструмента реализации государственной политики занятости.

В результате исследования установлено, что портал Государственной службы занятости не в полной мере соответствует современным требованиям к цифровым платформам и по ряду параметров существенно уступает коммерческим аналогам, что обуславливает его технологическое отставание и неконкурентоспособность по сравнению с коммерческими платформами. Основными проблемами портала являются технические сбои, барьеры входа для нанимателей (обязательная электронная цифровая подпись), отсутствие мобильных приложений, минимальная функциональность. Несмотря на выявленные проблемы, портал обладает уникальными конкурентными преимуществами (официальный статус, законодательная поддержка, комплексная база данных вакансий), которые способны обеспечить его лидерство на рынке. Разработаны рекомендации по модернизации портала, реализация которых обеспечит его лидирующие позиции на рынке труда и будет способствовать повышению эффективности занятости и развитию цифровой экономики Республики Беларусь.

**Ключевые слова:** цифровая платформа, рынок труда, онлайн-портал по трудоустройству, цифровизация, информационный портал Государственной службы занятости.

**Информация о статье:** поступила 2 декабря 2025 года.

## The online landscape of the labor market of the Republic of Belarus: the results of the comparative assessment of the main participants

**Alena V. Vankevich,  
Iryna N. Kalinouskaya**

*Vitebsk State Technological University,  
Republic of Belarus*

**Abstract.** In the context of the digital transformation of the economy of the Republic of Belarus, the effectiveness of the functioning of state information systems that ensure the interaction of the main participants in the labor market is of particular importance. Information Portal of the State Employment Service ([gsz.gov.by](http://gsz.gov.by)) is a key element of the national labor market infrastructure designed to ensure effective matching of labor supply and demand. According to the Decree of the

President of the Republic of Belarus dated of 18.01.2024. No. 27 «On ensuring employment of the population», all employers are required to post information about vacancies in the nationwide vacancy bank within five days, which makes the gsz.gov.by portal the central instrument of state regulation of the labor market.

However, the parallel operation of commercial platforms, which demonstrate higher popularity among users, calls into question the effectiveness of the state portal and requires a comprehensive scientific analysis of the causes of the current situation.

The purpose of the study is to develop a methodology for information and analytical monitoring of the functionality and effectiveness of the main online service providers in the labor market of the Republic of Belarus in order to increase the efficiency of the main participants in the online labor market landscape and identify opportunities for improving the competitiveness of the gsz.gov.by portal as a tool for implementing state employment policy.

As a result of the study, it was revealed that the portal of the State Employment Service does not fully meet modern requirements for digital platforms and is significantly inferior in some parameters to its commercial counterparts, which causes its technological lag and uncompetitiveness in comparison with commercial platforms. The main problems of the portal are technical failures, entry barriers for employers (mandatory electronic digital signature), lack of mobile applications, minimal functionality. Despite the identified problems, the portal has unique competitive advantages (official status, legislative support, and a comprehensive job database) that can ensure its market leadership. Recommendations have been developed for the modernization of the portal, the implementation of which will ensure its leading position in the labor market and will contribute to increasing the efficiency of employment and the development of the digital economy of the Republic of Belarus.

**Keywords:** digital platform, labor market, online job portal, digitalization, information portal of the State Employment Service.

**Article info:** received December 2, 2025.

## Введение

Актуальность исследования обусловлена стремительным развитием цифровых технологий, в том числе в области управления человеческими ресурсами. Согласно исследованиям международных организаций (ILO<sup>1</sup>, OECD<sup>2</sup>), эффективные цифровые платформы занятости способны сократить среднее время поиска работы на 30–40% и время закрытия вакансий на 40–50%, что создает значительный экономический эффект. В Республике Беларусь онлайн-ландшафт рынка труда представлен Информационным порталом Государственной службы занятости (gsz.gov.by) и рядом негосударственных онлайн-порталов и генераторов вакансий и резюме, с разной степенью охвата и детализации характеризующими рынок труда. Поэтому актуальной теоретической и практической задачей становится разработка инструментов для проведения постоянного анализа функционирования онлайн-порталов с точки зрения полноты выполняемых ими функций, оперативности и результативности в целях разработки научно обоснованных рекомендаций по совершенствованию

их деятельности. Это имеет важное значение для повышения эффективности функционирования рынка труда и государственной политики занятости населения.

Целью исследования является разработка методики для информационно-аналитического наблюдения за функциональной наполненностью и результативностью деятельности основных онлайн-провайдеров услуг на рынке труда Республики Беларусь для повышения эффективности основных участников онлайн-ландшафта рынка труда и выявления резервов повышения конкурентоспособности портала gsz.gov.by как инструмента реализации государственной политики занятости населения. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- научно обосновать и разработать методику информационно-аналитического наблюдения за функциональной наполненностью и результативностью деятельности основных участников онлайн-ландшафта рынка труда в Республике Беларусь на основе изучения зарубежного опыта и с учетом национальной специфики;
- провести сравнительный анализ основных онлайн-провайдеров услуг на рынке труда Республики Беларусь с помощью авторской методики, для сравнения их технических характеристик, функциональной наполненности, производительности, стабильности, доступности;

<sup>1</sup> International Labour Organization [2020]. *Digital labour platforms and the future of work*. ILO.

<sup>2</sup> Job Creation and Local Economic Development [2020]. *Rebuilding Better*. OECD.

– разработать рекомендации по совершенствованию деятельности основных участников онлайн-ландшафта рынка труда в Республике Беларусь для повышения эффективности содействия занятости.

Гипотеза исследования: цифровая трансформация экономики и постоянное расширение использования цифровых технологий населением обуславливают необходимость перманентного развития функциональной наполненности и технической оснащённости онлайн-порталов вакансий, что формирует объективную потребность в разработке информационно-аналитического инструментария оперативной диагностики основных участников онлайн-ландшафта рынка труда в Беларуси для более полной реализации их уникальных преимуществ и повышения эффективности государственной политики содействия занятости населения.

#### Методология и эмпирическая база исследования

Методологические основы важности информационных порталов при реализации политики занятости и повышения эффективности функционирования рынка труда заложены имплементацией следующих неоклассических теорий в современной экономике: теории транзакционных издержек на рынке труда (Шаститко, 2024; Аузан и др., 2020; Gmyrek et al., 2023), информационной асимметрии (Якупова и Шульц, 2017; Голикова и др., 2025; Даровский, 2025; Скоробогатов и Свиридов, 2025), поисковой методологии (Mortensen & Pissarides, 1994). Современные исследования в области экономики труда (Autor, 2015; Kuhn & Mansour, 2014; Ettredge et al., 2005) демонстрируют, что цифровые платформы занятости играют ключевую роль в снижении транзакционных издержек поиска и подбора кандидатов на рынке труда. Согласно теории поискового поведения на рынке труда (Mortensen & Pissarides, 1994), эффективность согласования спроса и предложения рабочей силы определяется скоростью и качеством информационного обмена между участниками.

Исследования MOT<sup>3,4</sup> показывают, что внедрение эффективных цифровых платформ занятости способно:

<sup>3</sup> World Employment and Social Outlook: The role of digital labour platforms in transforming the world of work (2021). <https://www.ilo.org/publications/flagship-reports/role-digital-labour-platforms-transforming-world-work>.

<sup>4</sup> Public employment services and active labour market policies for transitions: Responses to mega trends and crises (2023). <https://www.ilo.org/resource/news/ilo-launches-first-global-report-public-employment-services-and-active>.

– сократить среднее время поиска работы на 28–42 %;

– уменьшить затраты работодателей на поиск персонала на 35–50 %;

– повысить качество соответствия кандидатов требованиям вакансий на 20–30 %.

В контексте информационной асимметрии на рынке труда (Ke, 2014; Смирнов и Лукьянов, 2020; Ванкевич и Калиновская, 2022; Волгин и Гимпельсон, 2022; Кузьминов и др., 2025) цифровые платформы выполняют функцию механизма сигнализации и отбора, снижая информационные риски для обеих сторон трудовых отношений.

На основе обобщения методологических подходов ОЭСР<sup>5,6</sup> к оценке эффективности государственных служб занятости авторами систематизированы следующие группы показателей оценки эффективности информационных систем содействия занятости:

1) технические показатели – доступность системы (uptime), скорость работы, стабильность функционирования;

2) функциональные показатели – полнота функционала, степень автоматизации процессов, наличие аналитических инструментов;

3) показатели использования – количество активных пользователей, интенсивность использования, коэффициент возврата;

4) показатели результативности – время закрытия вакансий, доля успешных трудоустройств через платформу, удовлетворенность пользователей;

5) экономические показатели – соотношение затрат и результатов, экономия транзакционных издержек, влияние на уровень безработицы.

Предметом исследования в данной статье являются функциональные, технические и экономические характеристики основных участников онлайн-ландшафта рынка труда Республики Беларусь (портала [gsz.gov.by](http://gsz.gov.by), [rabota.by](http://rabota.by), [praca.by](http://praca.by), [belmeta.com](http://belmeta.com)), оцененные в период с 20 по 25 ноября 2025 г. Исследование проведено с помощью следующих методов: сравнительный анализ, бенчмаркинг, SWOT-анализ, экспертная оценка.

<sup>5</sup> A New Dawn for Public Employment Services: Service Delivery in the Age of AI (2024). [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/06/a-new-dawn-for-public-employment-services\\_25e1e70e/5dc3eb8e-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/06/a-new-dawn-for-public-employment-services_25e1e70e/5dc3eb8e-en.pdf).

<sup>6</sup> Harnessing Digitalisation in Public Employment Services to Connect People with Jobs (2022). [https://www.oecd.org/en/publications/harnessing-digitalisation-in-public-employment-services-to-connect-people-with-jobs\\_367a51f3-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/harnessing-digitalisation-in-public-employment-services-to-connect-people-with-jobs_367a51f3-en.html).

Эмпирическая база исследования построена на основе:

1) веб-аналитики и технического тестирования функционала платформ на различных устройствах и браузерах (измерение времени загрузки страниц, оценка стабильности работы, анализ ошибок сервера);

2) сравнении возможностей платформ по единой методике с использованием чек-листов, охватывающих более 50 параметров для работодателей и соискателей;

3) экспертной оценке пользовательского опыта (UX/UI), процессов регистрации и использования функционала платформ;

4) анализе нормативных правовых актов, регламентирующих функционирование порталов, изучении материалов средств массовой информации, пользовательских отзывов. Критерии оценки информационных платформ сгруппированы в таблице 1.

В качестве объектов сравнительного анализа по результатам предыдущих исследований (Калиновская, 2024, с. 96–121; Зайцева, 2025) выбраны ведущие платформы по поиску работы в Республике Беларусь (таблица 2):

– [gsz.gov.by](http://gsz.gov.by) – Государственный портал службы занятости (основной объект исследования);

– [rabota.by](http://rabota.by) – крупнейшая коммерческая платформа, часть международной группы HeadHunter;

– [belmeta.com](http://belmeta.com) – агрегатор вакансий с различных источников;

– [grasa.by](http://grasa.by) – специализированная платформа с фокусом на средний бизнес.

Информационный портал Государственной службы занятости Республики Беларусь ([gsz.gov.by](http://gsz.gov.by)) создан в соответствии с постановлением Министерства труда и социальной защиты для обеспечения информационного взаимодействия между работодателями, соискателями и органами государственной службы занятости. Его основными заявленными функциями являются: размещение и поиск вакансий, размещение резюме соискателей, информирование о ситуации на рынке труда, предоставление информации о программах содействия занятости.

Методика сравнительной оценки эффективности онлайн-порталов вакансий разработана для объективной оценки и сопоставления наличия, качества функциональных возможностей цифровых платформ по поиску работы (подбору персонала) в Республике Беларусь для выявления основных проблем и определения направлений модернизации.

Оценка количества функций на каждой из отобранных онлайн-платформ рынка труда Республики Беларусь оценивается экспертным путем<sup>7</sup> по следующим

<sup>7</sup> Для обеспечения объективности оценки сформирована экспертная комиссия с различными профилями компетенций (эксперты в области рынка труда, цифрового развития, цифровых технологий, число экспертов – 6). Итоговая оценка рассчитана как средневзвешенное значение. оценок всех экспертов с учетом весовых коэффициентов.

Таблица 1 – Критерии оценки информационных платформ

Table 1 – Criteria for evaluating information platforms

Группа критериев	Параметры оценки	Метод измерения
Технические характеристики	Время загрузки, стабильность, доступность, совместимость	Автоматизированное тестирование, мониторинг
Функциональность	Количество и качество функций для работодателей и соискателей	Чек-листы, бенчмаркинг
Пользовательский опыт	Удобство регистрации, навигации, выполнения типовых задач	Экспертная оценка, UX-аудит
Мобильность	Наличие мобильных приложений, адаптивного дизайна	Тестирование на устройствах
Автоматизация	Наличие автоматических процессов, AI-технологий	Функциональный анализ

Источник: авторская разработка.

Таблица 2 – Основные участники онлайн-ландшафта рынка труда в Республике Беларусь  
Table 2 – Key participants in the online labor market landscape in the Republic of Belarus

Платформа	Тип	Год создания	База вакансий (на 11.12.2025)	База резюме (на 11.12.2025)	Особенности
gsz.gov.by	Государственная	~2015	166851	18090	Обязательная публикация вакансий, лидер по количеству вакансий
rabota.by	Коммерческая	2000	27680	3228051	Часть HeadHunter Group, лидер по количеству резюме
belmeta.com	Агрегатор	2009	117946	Нет информации	Агрегация вакансий с разных источников
praca.by	Коммерческая	~2010	13064	548391	Специализация на малом и среднем бизнесе

Источник: авторская разработка.

направлениям (таблицы 3–5):

- базовый функционал (размещение вакансий/резюме, поиск);
- коммуникации (чаты, отклики, уведомления);
- автоматизация (умный подбор, автоответы, автообновление);
- аналитика (статистика, отчеты, дашборды);
- мобильность (приложения, адаптивный дизайн);
- пользовательский опыт (UX/UI, персонализация);
- интеграции (API, социальные сети, HR-системы).

Оценка проведена экспертами по трехбалльной шкале (0 баллов – функция полностью отсутствует, 1 балл – функция реализована в базовом варианте, 2 балла – функция реализована полностью).

Экспертная оценка качества функциональных возможностей цифровых платформ проведена по 100-балльной шкале по следующим критериям:

- 1) техническая стабильность (20 баллов): отсутствие ошибок и сбоев, скорость работы, доступность системы;
- 2) удобство использования (25 баллов): интуитивность интерфейса, количество кликов для выполнения задачи, качество UX/UI дизайна;
- 3) полнота функционала (25 баллов): покрытие потребностей пользователей, наличие продвинутых возможностей, гибкость настроек;
- 4) инновационность (15 баллов): использование современных технологий (AI, ML), автоматизация процессов, уникальные возможности;

5) интеграционные возможности (15 баллов): API и экспорт данных, интеграция с внешними системами, мобильная экосистема.

Итоговая интегральная оценка рассчитывается как сумма результатов оценки количества функций и их качества, взвешенные на экспертную оценку их значимости в общей оценке: 0,6 и 0,4 (то есть 60 % – количественная оценка, так как она объективная, проверяемая, 40 % – экспертная оценка, которая учитывает качество реализации)<sup>8</sup>. Данное соотношение обеспечивает баланс между «что реализовано» и «как реализовано» (таблица 4). Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом:

- 80–100 баллов – отличный уровень функциональности;
- 60–79 баллов – хороший уровень с потенциалом развития;
- 40–59 баллов – средний уровень, требуется модернизация;
- 20–39 баллов – низкий уровень, критическое отставание;
- 0–19 баллов – неудовлетворительный уровень.

#### Результаты анализа

Результаты сравнительного анализа свидетельствуют о том, что наиболее функционально наполненными и технически оперативными являются негосударственные онлайн-порталы *rabota.by* (таблица 5), в то время

<sup>8</sup> Значение весовых коэффициентов определено экспертно.

Таблица 3 – Чек-лист функциональных возможностей цифровых платформ по поиску работы – оценка наличия функций для соискателей

Table 3 – Checklist of the functionality of digital job search platforms – assessment of the availability of functions for applicants

Функция	Описание	Базовая (1 балл)	Полная (2 балла)
Регистрация	Создание учетной записи	Email + пароль	Email/телефон/соцсети + верификация
Создание резюме	Размещение профиля	Текстовая форма	Конструктор + шаблоны + импорт
Поиск вакансий	Поиск подходящих вакансий	1-3 фильтра	10+ фильтров + булевый поиск
Просмотр вакансий	Детальная информация	Текстовое описание	Описание + фото/видео компании
Отклик на вакансию	Подача заявки	Форма отклика	Отклик в 1 клик + сопроводительное
Уведомления	Информирование о событиях	Email-рассылка	Email + SMS + Push + в приложении
Управление откликами	Отслеживание статуса	Список откликов	Статусы + история + комментарии
Избранные вакансии	Сохранение интересных	Список сохраненных	Папки + метки + заметки
Черный список	Блокировка компаний	Простая блокировка	Блокировка + причины + жалобы
Видимость резюме	Настройка доступа	Опубликовано/скрыто	Анонимное + исключения + расписание
Статистика просмотров	Кто смотрел резюме	Счетчик просмотров	Компании + должности + даты
Рекомендации вакансий	Подбор подходящих	По ключевым словам	AI-подбор по профилю + поведению
Сравнение вакансий	Анализ предложений	Нет	Таблица сравнения по критериям
Чат с работодателем	Коммуникация	Через email	Встроенный чат + история + файлы
Видеорезюме	Видеопрезентация	Нет	Запись + загрузка видео
Календарь интервью	Планирование встреч	Нет	Интеграция с календарем + напоминания
Аналитика зарплат	Сравнение с рынком	Нет	Статистика по должностям + регионам
Тесты и опросники	Оценка компетенций	Нет	Профтесты + личные тесты
Карьерные советы	Рекомендации по развитию	Нет	Статьи + видео + вебинары
Сертификаты и дипломы	Загрузка документов	Текстовый список	Загрузка файлов + верификация
Портфолио	Примеры работ	Нет	Галерея + ссылки + описания
Языки и навыки	Указание компетенций	Текстовый список	Уровни + тесты + подтверждение
Мобильное приложение	Доступ с мобильных	Нет/адаптивный сайт	Нативное приложение iOS+Android
Экспорт резюме	Выгрузка данных	Нет	PDF/Word/LinkedIn/JSON
Интеграция с соцсетями	Связь с профилями	Нет	Импорт из LinkedIn/Facebook

Источник: авторская разработка на основе анализа цифровых платформ по поиску работы.

Таблица 4 – Чек-лист функциональных возможностей цифровых платформ по поиску работы – оценка наличия функций для работодателей

Table 4 – Checklist of the functionality of digital job search platforms – assessment of the availability of functions for employers

Функция	Описание	Базовая (1 балл)	Полная (2 балла)
Регистрация компании	Создание корпоративного аккаунта	Email + реквизиты	Интеграция с госреестром + электронная цифровая подпись (опционально)
Профиль компании	Страница работодателя	Название + описание	Брендинг + фото + видео + отзывы
Размещение вакансий	Публикация объявлений	Текстовая форма	Конструктор + шаблоны + мультипостинг
Управление вакансиями	Редактирование объявлений	Список вакансий	Статусы + копирование + архив + статистика
Поиск резюме	Активный поиск кандидатов	1-3 фильтра	15+ фильтров + булевый + сохраненные запросы
Просмотр резюме	Изучение профилей	Базовая информация	Полный профиль + история + рекомендации
Приглашение кандидатов	Отправка предложений	Email-приглашение	Персональные приглашения + шаблоны
Управление откликами	Воронка найма	Список откликов	Статусы + комментарии + оценки + воронка
Чат с кандидатами	Коммуникация	Через email	Встроенный чат + массовые рассылки + шаблоны
Календарь интервью	Планирование встреч	Нет	Календарь + приглашения + напоминания
Оценка кандидатов	Рейтинги и заметки	Текстовые заметки	Оценки по критериям + сравнение + коллаборация
База кандидатов	Талант-пул	Нет	Сохранение резюме + метки + сегментация
Автообновление вакансий	Поддержание актуальности	Нет	Автопродление + напоминания
Автоответы	Автоматические уведомления	Нет	Настраиваемые триггеры + персонализация
Автоподбор резюме	Рекомендации кандидатов	Нет	AI-подбор + рассылка на email
Статистика вакансий	Аналитика эффективности	Счетчик просмотров	Просмотры + отклики + воронка + сравнение
Отчеты по подбору	Сводная аналитика	Нет	Дашборды + экспорт + визуализация
Сравнение с рынком	Бенчмаркинг	Нет	Сравнение зарплат + требований + конкурентов
Множественные пользователи	Командная работа	Один аккаунт	Роли + права доступа + логи
Брендинг вакансий	Визуальное оформление	Текст	Фото + видео + логотип + цвета
Тесты для кандидатов	Оценка компетенций	Нет	Встроенные тесты + результаты + отчеты
Видеоинтервью	Онлайн-собеседования	Нет	Встроенная видеосвязь + запись + расписание
API интеграция	Связь с HR-системами	Нет	REST API + вебхуки + документация
Мобильное приложение	Работа с мобильных	Нет/адаптивный сайт	Нативное приложение iOS+Android
Экспорт данных	Выгрузка информации	Нет	Excel/CSV/PDF + расписание + email

Источник: авторская разработка на основе анализа цифровых платформ по поиску работы.

Таблица 5 – Результаты экспертной оценки цифровых платформ занятости в Республике Беларусь  
Table 5 – Results of the expert assessment of digital employment platforms in the Republic of Belarus

Платформа	Наличие функций соискателей, %	Наличие функций работодателей, %	Экспертная оценка	Итоговая оценка	Интерпретация результата
gsz.gov.by	30	22	33	31	Низкий уровень
rabota.by	88	94	87	88	Отличный уровень функциональности
belmeta.com	56	28	52	53	Средний уровень, требует модернизации
praca.by	76	62	71	73	Хороший уровень с потенциалом развития

Источник: авторская разработка.

как у государственного портала gsz.gov.by сложилось определенное техническое отставание от коммерческих платформ. Вместе с тем, анализ позволяет выявить как сильные, так и слабые стороны государственного портала gsz.gov.by (таблица 6), что является основой для разработки рекомендаций для дальнейшего совершенствования направлений его деятельности.

Стратегические выводы SWOT-анализа (таблица 6):

1. Стратегия S-O (Сильные стороны – Возможности): использовать государственный статус и монопольное положение для привлечения финансирования и внедрения эксклюзивных интеграций с государственными системами (единый вход, автозаполнение данных, интеграция с образовательными программами).

2. Стратегия W-O (Слабые стороны – Возможности): использовать государственное финансирование для ликвидации технологического отставания, привлечь специалистов для модернизации платформы.

3. Стратегия S-T (Сильные стороны – Угрозы): использовать официальный статус для повышения доверия и создания уникальных сервисов, недоступных коммерческим платформам.

4. Стратегия W-T (Слабые стороны – Угрозы): стабилизация технической инфраструктуры и упрощение доступа. Без этого платформа рискует потерять пользователей.

#### Обсуждение результатов анализа

Невысокая эффективность портала gsz.gov.by создает негативные эффекты для национального рынка труда:

- 1) увеличение времени поиска работы;
- 2) рост издержек работодателей;
- 3) снижение качества согласования, так как отсутствие «умных» алгоритмов подбора приводит к худшему соответствию кандидатов требованиям, что снижает качество найма;
- 4) рост издержек на поддержание параллельной инфраструктуры (на офлайн-подразделения при неиспользовании онлайн-портала).

Поэтому представляется правомерным предложить перечень мероприятий по его модернизации и развитию, ранжированный по степени приоритетности, где уровень «критично» означает, что без этого функционал неприменим или критически ограничен; уровень «высокий» означает, что данное мероприятие существенно влияет на пользовательский опыт и конверсию; уровень «средний» – мероприятие улучшает функциональность и удобство использования; уровень «низкий» сигнализирует о дополнительных возможностях, улучшающих имидж платформы (таблица 7).

В качестве ожидаемых эффектов от модернизации можно назвать:

- повышение имиджа государственных услуг: современный, удобный портал повысит доверие к цифровым государственным услугам;
- улучшение инвестиционного климата: эффективный рынок труда привлекателен для инвесторов;
- прозрачность рынка труда: полная статистика и аналитика для государственного планирования;

Таблица 6 – Матрица SWOT-анализа портала Государственной службы занятости в Беларуси  
Table 6 – SWOT analysis matrix of Portal of the State Employment Service in Belarus

	Благоприятные факторы	Неблагоприятные факторы
Внутренние	<p><b>СИЛЬНЫЕ СТОРОНЫ:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Официальный государственный статус.</li> <li>2. Законодательное требование обязательной публикации вакансий.</li> <li>3. Полнота базы вакансий РБ.</li> <li>4. Бесплатность для всех пользователей.</li> <li>5. Потенциал интеграции с гос. системами.</li> <li>6. Связь с программами переподготовки и субсидирования.</li> <li>7. Доступ к официальной статистике.</li> <li>8. Использование общегосударственных классификаторов Республики Беларусь</li> </ol>	<p><b>СЛАБЫЕ СТОРОНЫ:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Критические технические проблемы.</li> <li>2. Минимальный функционал.</li> <li>3. Сложная регистрация через ЭЦП.</li> <li>4. Отсутствие мобильных приложений.</li> <li>5. Отсутствие автоматизации.</li> <li>6. Низкое качество UX/UI</li> </ol>
Внешние	<p><b>ВОЗМОЖНОСТИ:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Государственное финансирование модернизации.</li> <li>2. Эксклюзивные интеграции с гос. системами.</li> <li>3. Монополия на обязательную публикацию.</li> <li>4. Партнерство с вузами и учебными центрами.</li> <li>5. Использование гос. данных для аналитики</li> </ol>	<p><b>УГРОЗЫ:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Риск утраты монополии государства на информацию о реальном состоянии рынка труда.</li> <li>2. Потеря доверия пользователей.</li> <li>3. Формальное исполнение требований.</li> <li>4. Репутационные потери.</li> <li>5. Усиление технологического разрыва</li> </ol>

Источник: авторская разработка.

– развитие цифровой экономики: платформа станет примером успешной цифровизации.

В целом, апробация разработанной методики оценки онлайн-участников рынка труда в Республике Беларусь позволяет оценить функциональные возможности информационных порталов. Однако следует отметить, что методика имеет следующие ограничения:

– субъективность экспертных оценок: несмотря на применение взвешенного подхода, экспертная оценка в определенной степени субъективна и может варьироваться в зависимости от компетенций и опыта экспертов;

– статичность оценки: методика фиксирует состояние платформ на момент проведения исследования. Платформы могут обновляться, что требует периодической переоценки;

– фокус на функциональности: методика концентрируется на наличии и качестве функций, но не учитывает бизнес-модель, монетизацию и финансовую устойчивость платформ;

– равнозначность функций: все функции в чек-листе имеют равный вес, хотя их важность для пользователей

может различаться;

– контекстуальные факторы: методика не учитывает специфику законодательного регулирования, доступность финансирования и другие контекстуальные факторы, влияющие на развитие платформ.

Для повышения объективности и достоверности результатов рекомендуется проводить периодическую актуализацию чек-листа функций с учетом появления новых технологий и пользовательских потребностей, проводить дополнительные исследования для подтверждения экспертных оценок.

#### Заключение

В результате проведенного исследования разработана и апробирована методика информационно-аналитического наблюдения за функциональной наполненностью и результативностью деятельности основных онлайн-провайдеров услуг на рынке труда Республики Беларусь, которая продемонстрировала достаточно высокую диагностическую способность и чувствительность к прогрессу. В процессе апробации методики (на примере наиболее крупных представителей онлайн-провайдеров услуг на рынке труда Республики

Таблица 7 – Мероприятия по модернизации Информационного портала Государственной службы занятости  
Table 7 – Measures to modernize the Information Portal of the State Employment Service

Приоритет	Направление / Мероприятие	Описание	Ожидаемый результат	Срок, мес.	Важность
Приоритет 1 (0-3 мес.)	А. Техническая инфраструктура				
	Масштабирование серверных мощностей	Увеличение серверных ресурсов, балансировка нагрузки	Устранение ошибок, стабильная работа при любой нагрузке	1	Критично
	Оптимизация кода и БД	Рефакторинг кода, индексация БД, кэширование запросов	Ускорение загрузки страниц в 3-5 раз (до <2 сек)	2	Критично
	Внедрение CDN	Content Delivery Network для статических ресурсов	Улучшение доступности по регионам на 40-50 %	1	Критично
	Мониторинг 24/7	Система мониторинга, алерты, автоматическое масштабирование	Предотвращение сбоев, быстрое реагирование	0,5	Критично
	В. Упрощение доступа для работодателей				
	Вход через госпортал	Интеграция с портал.gosuslugi.by для авторизации	Упрощение входа на 80 %, рост пользователей	2	Критично
	Упрощенная регистрация для малого и среднего бизнеса	Email + загрузка свидетельства для компаний до 15 чел.	Увеличение регистраций на 300 %	1,5	Критично
	Видеоинструкции	Пошаговые видео по регистрации и работе с ЭЦП	Снижение обращений в поддержку на 60 %	1	Высокий
	Расширенная техподдержка	Горячая линия 8:00-20:00, онлайн-чат, база знаний	Повышение удовлетворенности на 40 %	1	Высокий
	С. Мобильная доступность				
	Мобильное приложение (iOS, Android)	Нативные приложения с полным функционалом	Охват 45-50 % пользователей, работающих с мобильных	3	Критично
	Адаптивный дизайн сайта	Полная адаптация для планшетов и смартфонов	Удобство использования на всех устройствах	2	Высокий
	Push-уведомления	О новых вакансиях, откликах, сообщениях	Увеличение активности пользователей на 40 %	2	Высокий

Продолжение таблицы 7 – Мероприятия по модернизации Информационного портала Государственной службы занятости

Continuation of the table 7 – Measures to modernize the Information Portal of the State Employment Service

Приоритет 2 (3-12 мес.)	А. Улучшения для соискателей				
	Мгновенные отклики	Отклик в 1 клик с резюме + сопроводительное письмо	Увеличение откликов на 200 %, повышение конверсии	4	Высокий
	Умный подбор (AI)	AI-рекомендации вакансий на основе резюме и поведения	Улучшение качества соответствия на 30 %	6	Высокий
	Статистика просмотров	Компании, смотревшие резюме; показы в поиске	Повышение мотивации, улучшение резюме	4	Высокий
	Настройки видимости	Анонимное резюме, черный список работодателей	Защита конфиденциальности, контроль доступа	5	Средний
	Встроенный чат с работодателями	Коммуникация внутри платформы, история переписки	Ускорение коммуникации в 3-4 раза	6	Высокий
	Аналитика зарплат	Сравнение с рынком, статистика по профессиям и регионам	Обоснованные зарплатные ожидания	8	Средний
	Конструктор резюме	Готовые шаблоны, проверка ошибок, советы	Повышение качества резюме на 40 %	6	Средний
	В. Улучшения для работодателей				
	ATS Light	Воронка найма (новый/интервью/предложение/отказ)	Систематизация процесса, экономия 30 % времени	6	Высокий
	Расширенный поиск по резюме	15+ фильтров, булевый поиск, сохранение запросов	Точность подбора +50 %, экономия времени	5	Высокий
	Встроенный чат с кандидатами	Коммуникация, шаблоны сообщений, массовая рассылка	Ускорение коммуникации, автоматизация	6	Высокий
	Автоподбор резюме	Автоматическая рассылка подходящих резюме на email	Экономия времени на поиске, проактивность	7	Средний
	HR-брендинг	Расширенная страница компании с фото, видео, отзывами	Привлечение качественных кандидатов +25 %	8	Средний
	Аналитика вакансий	Статистика, воронка конверсии, сравнение с рынком	Оптимизация вакансий, увеличение откликов	8	Высокий
Автоответы кандидатам	Автоматические ответы по критериям, персонализация	Улучшение опыта кандидатов, экономия времени	7	Средний	
API для интеграций	Интеграция с корпоративными HR-системами (1C, SAP)	Автоматизация обмена данными для крупного бизнеса	9	Средний	

Продолжение таблицы 7 – Мероприятия по модернизации Информационного портала Государственной службы занятости

Continuation of the table 7 – Measures to modernize the Information Portal of the State Employment Service

Приоритет 3 (6-18 мес.)	А. Дизайн и интерфейс				
	Современный UI/UX дизайн	Редизайн, user research, A/B тестирование	Повышение удовлетворенности на 50 %	8	Средний
	Интуитивная навигация	Упрощение меню, поисковая строка	Сокращение кликов на 40 %, ускорение задач	6	Средний
	Темы оформления	Светлая и темная темы, настройка интерфейса	Персонализация, комфорт использования	4	Низкий
	Адаптивные элементы	Персонализация дашборда, виджеты, настройки	Эффективность работы +20 %	7	Средний
	В. Контент и помощь				
	Интерактивные туры	Онбординг для новых пользователей, пошаговые подсказки	Снижение барьера входа на 50 %	3	Средний
	База знаний	FAQ с поиском, категоризация, рейтинги статей	Самообслуживание пользователей 70 %	5	Средний
	Видеоинструкции	Библиотека обучающих видео по всем функциям (50+ видео)	Повышение грамотности использования	8	Средний
	Онлайн-консультант	Чат-бот для типовых вопросов + операторы	Мгновенные ответы на 80 % вопросов	6	Средний
	Блог с советами	Статьи по поиску работы, HR-практикам, рынку труда	Повышение вовлеченности, SEO-трафик	6	Низкий
	С. Геймификация				
	Рейтинг резюме	Заполненность 0-100 % с советами по улучшению	Мотивация к качественному заполнению	4	Низкий
	Достижения за активность	Бейджи за выполнение действий, уровни пользователя	Повышение вовлеченности +25 %	5	Низкий
	Прогресс-бары	Визуализация прогресса в профиле, откликах	Мотивация к завершению действий	3	Низкий

Окончание таблицы 7 – Мероприятия по модернизации Информационного портала Государственной службы занятости

End of table 7 – Measures to modernize the Information Portal of the State Employment Service

Приоритет 4 (12-24 мес.)	Интеграции и экосистема				
	Учреждения образования	Автоподгрузка данных об образовании, ссылки на программы	Упрощение заполнения резюме, связь с обучением	12	Средний
	Центры переподготовки	Информация о курсах в вакансиях, быстрая запись	Переквалификация безработных, закрытие разрывов	12	Средний
	Социальные сети	Импорт профиля LinkedIn, публикация вакансий	Расширение охвата, привлечение пассивных кандидатов	10	Средний
	Корпоративные HR-системы	API для обмена данными с 1C, SAP и др.	Автоматизация для крупных компаний	14	Средний
	Платежные системы	Для платных услуг (продвижение вакансий, премиум)	Монетизация, дополнительный доход	8	Низкий
Калькулятор зарплаты	Расчет с учетом налогов и вычетов	Прозрачность оплаты труда	6	Низкий	

Источник: авторская разработка.

Беларусь) особое внимание было уделено анализу портала Государственной службы занятости gsz.gov.by как стратегически важному компоненту реализации государственной политики занятости в стране. Установлено, что в текущем состоянии он не в полной мере соответствует современным требованиям к цифровым платформам занятости и по отдельным параметрам (техническая стабильность, функциональность, пользовательский опыт) уступает коммерческим аналогам, что снижает его конкурентоспособность в сравнении с коммерческими платформами. Основными проблемами портала являются: технические сбои, высокий барьер входа для работодателей, отсутствие мобильных приложений, минимальный функционал. Это формирует риски для национальной экономики (риск потери монополии государства на информацию о состоянии рынка труда, риск роста транзакционных издержек на рынке труда и усиление информационной асимметрии).

Несмотря на выявленные проблемы, портал обладает уникальными конкурентными преимуществами (официальный статус, законодательная поддержка, полнота базы вакансий, использование общегосударственных

классификаторов), которые при условии модернизации могут обеспечить его лидерство на рынке. Реализация рекомендаций по модернизации портала является необходимым условием повышения эффективности национального рынка труда и достижения целевых показателей Стратегии развития цифровой экономики Республики Беларусь. Модернизация портала Государственной службы занятости представляет собой высокоэффективный проект с выраженным мультипликативным эффектом для национальной экономики. Успешная реализация предложенных мероприятий позволит не только повысить эффективность рынка труда, но и создаст положительный пример цифровой трансформации государственных услуг, что будет способствовать укреплению доверия граждан к электронным сервисам государства и повышению конкурентоспособности национальной экономики.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Аузан, А., Калягин, Г. и Дорошенко, М. (2020). *Институциональная экономика. Новая институциональная экономическая теория*. Москва: Проспект, Российская Федерация.
- Ванкевич, Е.В. и Калиновская, И.Н. (2022). Изменение подходов к анализу конъюнктуры рынка труда в условиях цифровизации экономики (на примере текстильной промышленности Республики Беларусь). *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 5 (401), с. 27–37. DOI 10.47367/0021-3497\_2022\_5\_27.
- Волгин, А.Д. и Гимпельсон, В.Е. (2022). Спрос на навыки: анализ на основе онлайн данных о вакансиях. *Экономический журнал Высшей школы экономики*, 3(26), с. 343–374.
- Голикова, В.В., Муковнин, С.К., Казун, А.П. и Ершова, Н.В. (2025). Дефицит квалифицированных рабочих в обрабатывающей промышленности: следствие неэффективности фирм или препятствие для роста эффективных. *Вопросы экономики*, 2, с. 39–65. DOI: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2025-2-39-65>.
- Даровский, И.Я. (2025). Реакция рынка труда на шоки в российской экономике. *Вопросы экономики*, 11, с. 79–101. DOI: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2025-11-79-101>.
- Зайцева, О.В. (2025). Онлайн-источники данных о рынке труда: классификация, характеристики и подходы к ранжированию. *Белорусский экономический журнал*, 3, с. 69–82.
- Калиновская, И.Н. (2024). *Развитие управления человеческими ресурсами организации в условиях цифровизации экономики: методология, теория, практика*. Витебск: УО «ВГТУ», Республика Беларусь.
- Кузьминов, Я.И., Кручинская Е.В., Кошель А.С. и Акиндинова Н.В. (2025). Вклад цифровых платформ в развитие российской экономики: моделирование эффектов регулирования. *Вопросы экономики*, 7, с. 5–24. DOI: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2025-7-5-24>.
- Скоробогатов, А.С. и Свиридов, О.И. (2025). Влияние искусственного интеллекта на структуру и содержание вакансий на российском рынке труда. *Вопросы экономики*, 1, с. 71–91. DOI: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2025-1-71-91>.
- Смирнов, Е.Н. и Лукьянов, С.А. (2020). Императивы управления глобальными цифровыми платформами. *Управленец*, 4(11), с. 59–69. DOI: 10.29141/2218-5003-2020-11-4-5.
- Шаститко, А.Е. (2024). *Новая институциональная экономическая теория*. Москва: ООО МАКС Пресс, Российская Федерация.
- Якупова, И.Н. и Шульц, Д.Н. (2017). Методы снижения асимметрии информации на региональном рынке труда. *Управленец*, 6(70), с. 10–27.
- Autor, D.H. (2015). Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation, *Journal of Economic Perspectives*, 29(3), pp. 3–30.
- Kuhn, P. and Mansour, H. (2014). Is Internet Job Search Still Ineffective? *The Economic Journal*, 124, pp. 1213–1233.
- Gmyrek, P., Berg, J. and Bescond, D. (2023). *Generative AI and jobs: a global analysis of potential effects on job quantity and quality*. ILO Working Paper, EU.
- Ettredge, M., Gerdes, J. and Karuga, G. (2005). Using web-based search data to predict macroeconomic statistics. *Communications of the ACM*, 11(48), pp. 87–92.
- Mortensen, D.T. and Pissarides, Ch. A. (1994). Job creation and job destruction in the theory of unemployment. *The Review of Economic Studies*, 3(61), pp. 397–415.
- Ke, L. (2014). Transaction cost, specialization and division of labor – a general equilibrium analysis of entrepreneurship under globalization. *Theoretical Economics Letters*, 4, pp. 34–42.

## REFERENCES

- Auzan, A., Kalyagin, G. and Doroshenko, M. (2020). *Institutional Economics. New Institutional Economic Theory* [Institucional'naya ekonomika. Novaya institucional'naya ekonomicheskaya teoriya]. Moscow: Prospekt, Russian Federation (In Russian).
- Vankevich, A. and Kalinouskaya, I. (2022). Changing approaches to analyzing labor market conditions in the context of digitalization of the economy (using the example of the textile industry of the Republic of Belarus) [Izmenenie podhodov k analizu kon'yunktury rynka truda v usloviyah cifrovizacii ekonomiki (na primere tekstil'noj promyshlennosti Respubliki Belarus)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, № 5 (401), Pp. 27–37. DOI 10.47367/0021-3497\_2022\_5\_27 (In Russian).
- Volgin, A.D. and Gimpelson, V.E. (2022). Demand for skills: analysis based on online job vacancy data [Spros na navyki: analiz na osnove onlajn dannyh o vakansiyah]. *HSE Economic Journal = Ekonomicheskij zhurnal Vysshej shkoly ekonomiki*, Vol. 26, № 3, Pp. 343–374 (In Russian).
- Golikova, V.V., Mukovnin, S.K., Kazun, A.P. and Ershova, N.V. (2025). Shortage of skilled workforce in manufacturing: A consequence of firms ineffectiveness or an obstacle for the growth of effective firms [Deficit kvalificirovannyh rabochih v obrabatyvayushchej promyshlennosti: sledstvie neeffektivnosti firm ili prepyatstvie dlya rosta effektivnyh]. *Voprosy Ekonomiki = Economic issues*, № 2, Pp. 39–65. DOI: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2025-2-39-65> (In Russian).
- Darovskii, I.Y. (2025). Labor market responses to shocks in the Russian economy [Reakciya rynka truda na shoki v rossijskoj ekonomike]. *Voprosy Ekonomiki = Economic issues*, № 11, Pp. 79–101. DOI: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2025-11-79-101> (In Russian).
- Zaitseva, O.V. (2025). Online sources of labor market data: classification, characteristics and approaches to ranking [Onlajn-istochniki dannyh o rynke truda: klassifikaciya, harakteristiki i podhody k ranzhirovaniyu]. *Belarusian Economic Journal = Belorusskij ekonomicheskij zhurnal*, № 3, Pp. 69–82 (In Russian).
- Kalinouskaya, I. (2024). *Razvitie upravleniya chelovecheskimi resursami organizacii v usloviyah cifrovizacii ekonomiki: metodologiya, teoriya, praktika* [Development of human resource management of an organization in the context of the digitalization of the economy: methodology, theory, practice]. Vitebsk: EI «VSTU», Republic of Belarus (In Russian).
- Kuzminov, Y.I., Kruchinskaya, E.V., Koshel, A.S. and Akindinova, N.V. (2025). The effect of digital platforms on the development of the Russian economy: A mathematical model of regulatory effects and empirical verification [Vklad cifrovyh platform v razvitie rossijskoj ekonomiki: modelirovanie effektov regulirovaniya]. *Voprosy Ekonomiki = Economic issues*, № 7, Pp. 5–24. DOI: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2025-7-5-24> (In Russian).
- Skorobogatov, A.S. and Sviridov, O.I. (2025). The artificial intelligence impact on Russian labor market [Vliyanie iskusstvennogo intellekta na strukturu i sodержanie vakansij na rossijskom rynke truda]. *Voprosy Ekonomiki = Economic issues*, № 1, Pp. 71–91. DOI: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2025-1-71-91> (In Russian).
- Smirnov, E.N. and Lukyanov, S.A. (2020). Imperatives of global digital platform management [Imperativy upravleniya global'nymi cifrovymi platformami]. *Upravlenets = The Manager*, Vol. 11, № 4, Pp. 59–69. DOI: 10.29141/2218-5003-2020-11-4-5 (In Russian).
- Shastitko, A.E. (2024). *New Institutional Economic Theory* [Novaya institucional'naya ekonomicheskaya teoriya]. Moscow: OOO MAKS Press, Russian Federation (In Russian).
- Yakupova, I.N. and Shults, D.N. (2017). Methods for Reducing Information Asymmetry in the Regional Labour Market [Metody snizheniya asimmetrii informacii na regional'nom rynke truda]. *Upravlenets = The Manager*, № 6(70), Pp. 10–27 (In Russian).
- Autor, D.H. (2015). Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation, *Journal of Economic Perspectives*, 29(3), pp. 3–30.
- Kuhn, P. and Mansour, H. (2014). Is Internet Job Search Still Ineffective? *The Economic Journal*, 124, pp. 1213–1233.

Gmyrek, P., Berg, J. and Bescond, D. (2023). *Generative AI and jobs: a global analysis of potential effects on job quantity and quality*. ILO Working Paper, EU.

Ettredge, M., Gerdes, J. and Karuga, G. (2005). Using web-based search data to predict macroeconomic statistics. *Communications of the ACM*, 11(48), pp. 87–92.

Mortensen, D.T. and Pissarides, Ch. A. (1994). Job creation and job destruction in the theory of unemployment. *The Review of Economic Studies*, 3(61), pp. 397–415.

Ke, L. (2014). Transaction cost, specialization and division of labor – a general equilibrium analysis of entrepreneurship under globalization. *Theoretical Economics Letters*, 4, pp. 34–42.

### Информация об авторах

### Information about the authors

#### Ванкевич Елена Васильевна

Доктор экономических наук, профессор кафедры «Экономика и электронный бизнес», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: alena.vankevich1966@gmail.com

#### Калиновская Ирина Николаевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика и электронный бизнес», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: i-kalinovskaya@yandex.by

#### Alena V. Vankevich

Doctor of Science (in Economics), Professor of the Department "Economics and Electronic Business", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: alena.vankevich1966@gmail.com

#### Iryna N. Kalinouskaya

Candidate of Science (in Engineering), Associate Professor of the Department "Economics and Electronic Business", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: i-kalinovskaya@yandex.by

## Феномен NEET-молодежи: особенности распространения и факторы формирования (межстрановой количественный анализ)

**И. В. Берестень, К. В. Ревяко,  
О. Н. Ерофеева**

*Белорусский государственный университет,  
Республика Беларусь*

**Аннотация.** Группа NEET-молодежи (молодые люди в возрасте 15–24 лет, которые не учатся, не работают и не приобретают профессиональных навыков) представляет собой ценный резерв роста занятости и обеспечения организаций национальной экономики кадрами требуемой квалификации. Продолжение неблагоприятных демографических тенденций (депопуляция, старение населения) еще более актуализируют задачу поиска путей смягчения проблемы NEET-молодежи. Значимость изучения особенностей формирования и способов снижения доли NEET молодежи заключается также в том, что этот показатель напрямую связан с качеством человеческого капитала и устойчивостью социально-экономического развития. Цель исследования – выявить и количественно оценить макрофакторы формирования феномена NEET-молодежи, в обобщенном виде интегрирующие влияние институциональных мер и отдельных направлений социально-экономической политики на динамику объекта исследования (доля NEET-молодежи). В качестве эмпирической базы исследования использованы данные Всемирного банка, Евростата, ОЭСР, ILOSTAT, Докладов о человеческом развитии, Всемирных отчетов о счастье. Методическую базу исследования составляют методы анализа и синтеза, сравнения, дедукции, моделирования, корреляционно-регрессионного анализа. В результате исследования с использованием корреляционно-регрессионного анализа по данным для 29 стран установлено статистически значимое влияние на распространение феномена NEET-молодежи (доля NEET-молодежи) инвестиций в образование, а также подтверждено положительное воздействие на сокращение доли NEET-молодежи увеличения средней продолжительности обучения. Важным выводом является эмпирическое подтверждение значимости волонтерства и благотворительности как дополнительных факторов, снижающих риск попадания молодежи в категорию NEET. Разработанные модели могут использоваться для прогнозирования показателей NEET, количественно определяют наиболее значимые факторы динамики исследуемого явления. Проведенное исследование расширяет понимание факторов формирования феномена NEET-молодежи и межстрановых особенностей этого процесса, показывает возможные направления разработки мер политики для сокращения доли NEET-молодежи.

**Ключевые слова:** NEET-молодежь, молодежная безработица, рынок труда, социально-экономическая политика, корреляционно-регрессионный анализ, волонтерство, благотворительность, обучение.

**Информация о статье:** поступила 27 января 2026 года.

## The NEET-youth phenomenon: peculiarities of prevalence and factors of formation (a cross-country quantitative analysis)

**Ivan V. Beresten', Kiryl V. Reviaka,  
Aksana N. Yerafeyeva**

*Belarusian State University,  
Republic of Belarus*

**Abstract.** The NEET youth group (young people aged 15–24 not in education, employment or training) represents a valuable reserve for employment growth and for providing of the national economy organisations with personnel of the required qualifications. The continuation of unfavourable demographic trends (depopulation, ageing) actualizes the task of finding ways to mitigate the NEET-youth problem. The importance of studying the characteristics of the formation and ways to reduce the NEET-youth rate also lies in the fact that this indicator is directly related to the human capital quality and the sustainability of socio-economic development. The aim of the research is to identify and quantitatively assess the macrofactors shaping the NEET youth phenomenon, which collectively integrate the influence of institutional measures and specific areas of socio-economic policy on the dynamics of the NEET youth rate. The empirical basis of the research are data from

the World Bank, Eurostat, OECD, ILOSTAT, Human Development Reports, and World Happiness Reports. The methodological basis comprises methods of analysis and synthesis, comparison, deduction, modelling, and correlation-regression analysis. Using correlation-regression analysis based on data from 29 countries, the statistically significant impact on the spread of the NEET youth phenomenon (the NEET youth rate) of the investment in education was identified, and the positive impact of the average length of education increase on reducing the NEET youth share was confirmed. An important conclusion is the empirical evidence of the volunteering and charity as additional factors that reduce the risk of young NEET status. The developed models can be used for NEET indicators forecasting and quantitatively determine the most significant factors of the studied phenomenon dynamics. The conducted research expands the understanding of the factors shaping the NEET youth rate and its cross-country peculiarities, indicating possible directions for policy measures developing to reduce the NEET-youth rate.

**Keywords:** NEET-youth, youth unemployment, labour market, social and economic policy, correlation-regression analysis, volunteering, charity, education.

**Article info:** received January 27, 2026.

## Введение

Термин «NEET-молодежь» (Not in Employment, Education or Training) характеризует формирование группы молодежи в возрасте 15–24 лет, которая не учится, не работает и не приобретает профессиональных навыков. Обозначение категории, изначально предложенное в Великобритании в конце 1980-х годов, широко распространилась в мире, а явление NEET-молодежи исследуется в экономике, экономике труда, экономике здравоохранения, политологии, социологии, культурологии, социальной антропологии, других научных направлениях. В ряде исследований вместо возрастного диапазона 15–24 лет используется расширенный диапазон до 35 лет, что отражает более длительный переход к взрослой жизни в некоторых странах (Petrescu et al., 2024; Gunnes et al., 2025).

Многие экономики мира сталкиваются либо ожидая в перспективе появления дефицита профессионалов и сокращения притока молодых кадров. Так, по материалам доклада Всемирного экономического форума «Будущее рабочих мест 2025»<sup>1</sup> 42 % компаний ожидают сокращения доступности талантов в 2025–2030 гг., и соответственно, все возрастающих сложностей при поиске и найме специалистов. Группа NEET-молодежи представляет собой ценный резерв роста занятости и обеспечения организаций национальной экономики кадрами требуемой квалификации. Продолжение неблагоприятных демографических тенденций (депопуляция, старение населения) еще более актуализируют за-

дачу поиска путей смягчения проблемы NEET-молодежи.

Значимость изучения NEET молодежи заключается также в том, что этот показатель напрямую связан с качеством человеческого капитала и устойчивостью социально-экономического развития. Высокая доля NEET свидетельствует о недоиспользовании потенциала молодежи, снижении потенциальной налоговой базы и росте социальной нагрузки, повышении потребности в социальной защите, социальных трансфертах. Кроме того, пребывание в статусе NEET повышает вероятность долгосрочной безработицы, утраты навыков, масштабирования этого явления в следующих поколениях.

Вышеизложенное определяет актуальность изучения феномена NEET-молодежи, особенностей его распространения и определения соответствующих эффективных мер политики.

Следует отметить существенные различия доли NEET-молодежи для стран с различным уровнем дохода, а также среди лиц мужского и женского пола. Так, на примере стран с различным уровнем дохода (согласно классификации Группы Всемирного банка) очевидно, что гендерный разрыв показателя NEET демонстрирует тенденцию к увеличению по мере снижения уровня дохода (таблица 1).

В ряде исследований, тем не менее, доказываемается отсутствие значимости фактора пола для угрозы риска попадания в категорию «NEET-молодежь» (например, Assmann and Broschinski, 2021; Marques et al., 2025). Это означает, что вероятность оказаться вне образования и занятости статистически одинакова для лиц обоих полов, однако причины, механизмы и последствия этого состояния часто кардинально различаются с учетом

<sup>1</sup> <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025>.

Таблица 1 – Доля NEET-молодежи (15–24 лет) по странам и полу в зависимости от уровня дохода (классификация Группы Всемирного банка), 2024 год

Table 1 – Share of NEET youth (aged 15–24) by country and gender according to income level (World Bank Group classification), 2024

Страна	Уровень дохода в стране	NEET всего, %	NEET мужчины, %	NEET женщины, %	Гендерный разрыв по показателю NEET, проц. пунктов (по модулю)
Соединённое Королевство Великобритании и Северной Ирландии	Высокий	14,3	15,5	13,1	2,4
Содружество Австралии	Высокий	8,5	9,1	8,0	1,1
Российская Федерация	Высокий	8,4	7,1	9,8	2,7
Аргентинская Республика	Выше среднего	16,3	14,7	18,1	3,4
Королевство Таиланд	Выше среднего	12,8	9,9	15,8	5,9
Монголия	Выше среднего	9,9	8,0	11,8	3,8
Объединённая Республика Танзания	Ниже среднего	12,8	7,8	17,7	9,9
Федеративная Республика Нигерия	Ниже среднего	11,9	10,5	13,4	2,9
Многонациональное Государство Боливия	Ниже среднего	8,0	4,9	11,1	6,2
Республика Малави	Низкий	39,4	32,8	45,4	12,6
Республика Руанда	Низкий	25,9	21,8	29,8	8,0
Буркина-Фасо	Низкий	21,6	15,8	26,3	10,5

Источник: составлено авторами на основе данных Группы Всемирного банка<sup>2</sup> и Международной организации труда<sup>3</sup>.

гендерного фактора.

Доля NEET-молодежи имеет высокую вариативность по регионам мира (рисунок 1).

Так, наибольшая распространенность феномена NEET за предшествующие 15 лет наблюдалась в Африке, Южной Америке и странах Азиатско-Тихоокеанского региона, а минимальная – зафиксирована в Австралии. При этом показатель имел тенденцию к росту в 2020 году в связи с влиянием пандемии COVID-19 во всех без исключения группах стран и регионов, а также при оценке показателя в разбивке по полу.

<sup>2</sup> <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/understanding-country-income--world-bank-group-income-classifica>.

<sup>3</sup> [https://rshiny.ilo.org/dataexplorer23/?lang=en&segment=indicator&id=SDG\\_0851\\_SEX\\_OCU\\_NB\\_A](https://rshiny.ilo.org/dataexplorer23/?lang=en&segment=indicator&id=SDG_0851_SEX_OCU_NB_A).

Существует компонент риска NEET, обусловленный статусом населенного пункта проживания, при этом однозначно утверждать, что ему подвержены только городские либо сельские жители, невозможно. Например, в Великобритании риск NEET выше за пределами Лондона, тогда как в Польше он выше в городских районах. Австрийские NEET также чаще живут в городских районах (Petrescu et al., 2024).

Широко распространившееся в мире явление NEET-молодежи создает вызовы для социально-экономической политики (в частности, для социальной защиты, развития систем образования, здравоохранения и обеспечения психологического здоровья и др.), политики на рынке труда. Длительное пребывание в категории NEET связано с риском бедности, психических проблем, социальной изоляции и маргинализации. При этом в

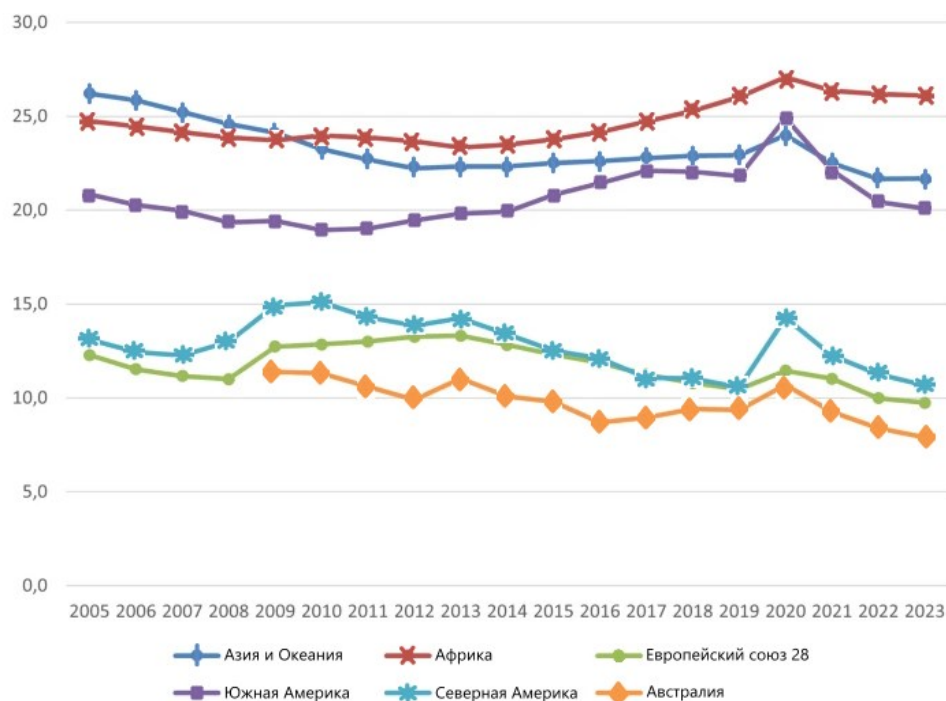


Рисунок 1 – Доля молодежи в возрасте 15–24 лет по всему миру, не обучающихся, не проходящих работу или обучение (NEET) 2005–2023 годы

Figure 1 – Global share of youth (aged 15–24) not in education, employment, or training (NEET), 2005–2023

Источник: показатель Целей устойчивого развития 8.6.1<sup>4</sup> и данные Международной организации труда<sup>5</sup>.

исследовании (Gunnes et al., 2025) подчеркивается, что «направление причинности часто бывает сложным и двусторонним».

В Республике Беларусь за 1999–2019 гг. произошел неблагоприятный демографический сдвиг – на фоне общего сокращения численности населения на 6,29 %, численность молодежи в возрасте 15–29 лет снизилась почти на треть (на 30,54 %) (Ванкевич и Зайцева, 2023, с. 76), при этом уровень молодежной безработицы остается значительным. В 2024 году ее уровень составил 7,5 % для мужчин и 5,6 % для женщин<sup>6</sup>.

В 2024 году удельный вес молодежи, которая не учится и не работает, в возрасте 15–24 лет в общей численности населения данной возрастной группы составил в Республике Беларусь 4,5 % (5,3 % у мужчин и 3,7 % у женщин), со значительным сокращением за период наблюдений с 2016 года. При этом уровень безработицы среди молодежи названной возрастной категории зафиксирован на уровне 10,1 % (11,1 % у мужчин и 9 % у женщин)<sup>7</sup>.

Доля молодежи в возрасте от 15 до 24 лет, которая не учится, не работает и не приобретает профессиональные навыки, включена в состав целевых индикаторов Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года<sup>8</sup>, и в 2040 году предполагается ее снижение до 2 %. Обеспечение быстрого входа на рынок труда молодежи опре-

деления быстрого входа на рынок труда молодежи опре-

<sup>4</sup> <https://unstats.un.org/sdgs/metadata/?Text=&Goal=8&Target=8.6>.

<sup>5</sup> <https://ilostat.ilo.org/>.

<sup>6</sup> <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/531/0md2pntes-3g2a57e7mp8wrzly6fh634.pdf>.

<sup>7</sup> <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/indikatory-dostoyanogo-truda/>, (дата обращения: 05.01.2026).

<sup>8</sup> <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-razvitiya-respubliki-belarus-na-period-do-2040-goda.pdf>.

делено в качестве одной из задач Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы<sup>9</sup>.

В Государственной программе «Сбалансированный рынок труда» на 2026–2030 годы<sup>10</sup> активизация молодежной занятости названа одним из способов минимизации демографических рисков на рынке труда Республики Беларусь. Соответствующий подход прослеживается и в региональных стратегических документах по социально-экономическому развитию. Так, например, в Региональной стратегии устойчивого развития Гродненской области на период до 2040 года<sup>11</sup> «ключевая стратегическая цель развития региона – обеспечение высокого качества жизни населения на основе устойчивого экономического роста, внедрения принципов «зеленой» и циркулярной экономики, социальной защиты уязвимых групп, стимулирования участия молодежи и рационального использования природных ресурсов», а центральная роль в достижении стратегической цели отводится решению таких задач, как развитие и укрепление человеческого потенциала путем увеличения занятости, обеспечения доступа к социальной инфраструктуре, стимулирования активного участия молодежи в социально-экономической и общественной жизни.

В имеющихся исследованиях (Зудина, 2020; Демиденко, 2022; Bal-Domańska, 2022; Verick, 2023 и др.) традиционно выделяются такие макроэкономические, институциональные и структурные факторы, влияющие на распространенность феномена NEET-молодежи, как: уровень безработицы, особенности систем социальной защиты (южноевропейская, континентальная и др.), наличие института минимальной заработной платы (с дифференциацией по возрасту либо без нее), уровень социального доверия и другие. В частности, исследования показывают, что критическую роль играют специфические конфигурации институциональных систем, создающие синергетический эффект. В частности, высокие уровни NEET-молодежи, несущей ответственность за уход за членами семьи, концентрируются в странах, где отсутствуют развитые социальные услуги в сферах основных семейных функций при одновременном дефиците услуг в секторе формального долгосрочного ухода (Assmann and Broschinski, 2021), что особенно характер-

но для многих стран Центральной и Восточной Европы. В противоположность этому, в странах Северной Европы высокие расходы на финансирование систем социальной защиты людей с инвалидностью при относительно низких активационных требованиях создают обратный стимул – молодые люди с ограничениями по здоровью предпочитают получать пособия, а не активно искать работу (Assmann and Broschinski, 2021).

Макроэкономические факторы NEET действуют не обособленно, а во взаимодействии с (не)гибкостью рынка труда и качеством образовательных систем. Высокие уровни защиты занятости в сочетании с недостаточным инвестированием в активные программы занятости и системы профессионального обучения характерны для стран Южной и отчасти Центральной и Восточной Европы, где проблемы молодежной безработицы проявляются наиболее остро. Напротив, системы, обеспечивающие высокий уровень профессионального обучения с практической составляющей, как в ФРГ и Австрии, позволяют обеспечить более легкий переход от школы к работе и значительно более низкие показатели NEET (Gunnæs et al., 2025).

В составе индивидуальных и личностных характеристик, выступающих возможными факторами попадания в категорию NEET-молодежи на микроуровне, анализируются, например, пол, место проживания, опыт пребывания в интернатных учреждениях, ранний отсев из школы, уровень образования индивида и его родителей, национальность, уровень развития «мягких навыков» и др. В исследовании (Assmann and Broschinski, 2021) выявлено, что существенно повышает вероятность NEET-статуса и семейное положение молодежи: наличие ребенка либо статус одинокого родителя создают дополнительные барьеры к трудоустройству, особенно в странах, где не развита система ухода за детьми, дошкольного образования и социальных услуг семье.

Таким образом, факторы формирования статуса NEET-молодежи многочисленны и взаимосвязаны, их взаимовлияние проявляется чрезвычайно вариативно.

Цель исследования – выявить и количественно оценить макрофакторы формирования феномена NEET-молодежи, в обобщенном виде интегрирующие влияние институциональных мер и отдельных направлений социально-экономической политики на динамику объекта исследования (доля NEET-молодежи). Проведенное исследование расширяет понимание факторов формирования NEET-молодежи и показывает возможные

<sup>9</sup> <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P925v0001>.

<sup>10</sup> <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500699>.

<sup>11</sup> [https://sdgs.by/wp-content/uploads/2025/11/grodno-region\\_strategy-2040.pdf?ysclid=mjskq5t1g1565188080](https://sdgs.by/wp-content/uploads/2025/11/grodno-region_strategy-2040.pdf?ysclid=mjskq5t1g1565188080).

направления разработки мер политики для сокращения доли NEET-молодежи.

#### Методы и средства исследований

Теоретической базой исследований являются труды белорусских и зарубежных ученых, а также публикации международных организаций по проблемам NEET-молодежи, молодежной занятости, формированию соответствующих мер политики [Ванкевич, Зайцева и Коробова 2016; Зудина, 2020; Giancaspro and Manuti, 2021; Assmann and Broschinski, 2021; Ванкевич и Горовой, 2022; Petrescu et al., 2024; Rahmani, H., Groot, and Rahmani, A., 2024; Serrière and Elder, 2025 и др.].

Эмпирическую базу исследования сформировали данные Группы Всемирного банка<sup>12</sup>, Евростата<sup>13</sup>, ОЭСР<sup>14</sup>, ILOSTAT<sup>15</sup>, Докладов о человеческом развитии<sup>16</sup>, Всемирных отчетов о счастье<sup>17</sup>. Количественное исследование проведено с использованием данных для 29 стран мира с различными уровнями дохода на душу населения (в скобках указаны значения доли NEET-молодежи в % (смоделированная оценка MOT) в 2021 г. по данным Группы Всемирного банка по состоянию на 10 июля 2025 года, страны расположены по возрастанию показателя): Нидерланды (3,079 %), Швеция (5,073 %), Беларусь (5,476 %), Бельгия (6,654 %), Дания (7,112 %), Казахстан (7,144 %), Португалия (7,744 %), Германия (7,868 %), Финляндия (8,492 %), Латвия (8,687 %), Венгрия (10,608 %), Эстония (10,921 %), Литва (11,314 %), Испания (11,484 %), Греция (12,048 %), США (12,205 %), Австрия (12,257 %), Польша (12,445 %), Хорватия (12,69 %), Молдова (13,55 %), Болгария (13,767 %), Кипр (13,774 %), Сербия (16,714 %), Украина (17,198 %), Румыния (18,015 %), Северная Македония (18,311 %), Италия (19,768 %), Армения (23,488 %), Албания (24,085 %).

Глубина исследований ограничена 2007 годом как начальной точкой в связи с ограничениями доступности сопоставимых макроэкономических и социальных индикаторов, а 2021 год взят как завершающий с полностью доступными и сопоставимыми данными по большинству индикаторов. Данные за 2022–2024 годы не были вклю-

чены в анализ по причине существенных пропусков в исходных базах данных на дату выполнения расчетов.

Методическую базу исследования составляют методы анализа и синтеза, сравнения, дедукции, моделирования, корреляционно-регрессионного анализа.

#### Результаты исследований

Для выявления макроэкономических факторов доли NEET-молодежи по названным ранее статистическим источникам и базам данных были отобраны индикаторы, для которых может быть теоретически обоснована (либо уже обоснована более ранними опубликованными исследованиями) связь с показателем доли NEET-молодежи и имеется достаточная глубина и полнота временных рядов данных для отобранных 29 стран.

Первоначально были выбраны 19 индикаторов, среди которых: ВВП на душу населения (в постоянных ценах 2015 г. в долл. США по ППС); расходы на конечное потребление домохозяйств и НКООДХ (% от ВВП); политическая стабильность и отсутствие насилия/терроризма: оценка Всемирного банка; коэффициент демографической нагрузки среди молодежи (% трудоспособного населения); всего работающих членов семьи (% от общей занятости); соотношение занятости и численности населения в возрасте 15–24 лет, %; общая безработица среди молодежи (% от общей численности рабочей силы в возрасте 15–24 лет); соотношение уровня участия женщин и мужчин в рабочей силе (%); общая безработица (% от общей численности рабочей силы); обязательное образование, продолжительность (лет); среднегодовой индекс счастья; индекс человеческого развития; средняя продолжительность обучения (из ИЧР), лет, а также ряд других.

После анализа корреляционной матрицы для построения первой регрессионной модели (далее – модель № 1) были отобраны пять объясняющих переменных, обозначенные как X1–X5 (представлены в таблице 2).

Показатель X1 представляет собой долю расходов на образование в структуре валового национального дохода. Для построения модели показатель введен с лагом в 11 лет, что определено на основании средней продолжительности обучения (из ИЧР) в исследуемых 29 странах, которая составила 11,37 года за рассматриваемый период (2007–2021 гг.). Этот лаг достаточен для трансляции импульса образовательных инвестиций в экономическую активность молодежи. Важный аспект в интерпретации заключается в том, что показатель X1

<sup>12</sup> [https://databank.worldbank.org/source/sustainable-development-goals-\(sdgs\)](https://databank.worldbank.org/source/sustainable-development-goals-(sdgs)).

<sup>13</sup> <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>.

<sup>14</sup> <https://www.oecd.org/en/data/indicators/youth-not-in-employment-education-or-training-neet.html>.

<sup>15</sup> <https://ilostat.ilo.org/>.

<sup>16</sup> <https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index#/indicicies/HDI>.

<sup>17</sup> <https://www.worldhappiness.report/>.

Таблица 2 – Признаки-факторы доли NEET-молодежи  
Table 2 – Factors determining the NEET-youth share

Обозначение	Показатель
X1	Расходы на образование (% от ВНД) – 1996–2010 гг.
X2	Ln (ВВП на душу населения [в постоянных ценах 2015 г. в долл. США] по ППС)
X3	Общая уязвимая занятость (% от общей занятости) (смоделированная оценка MOT)
X4	Общая безработица (% от общей численности рабочей силы) (смоделированная оценка MOT)
X5	Средняя продолжительность обучения (из ИЧР), количество лет

Источник: составлено авторами.

измеряет отложенное влияние через качественные изменения в формировании образовательных навыков молодежи. В модели наблюдается обратная связь между X1 и долей NEET-молодежи: при росте относительных расходов на образование с учетом принятого лага доля NEET-молодежи снижается в долгосрочной перспективе, поскольку повышается вероятность занятости молодежи или продолжения обучения.

Переменная X2 отражает уровень экономического развития страны через показатель логарифма ВВП на душу населения в постоянных ценах 2015 года по ППС. Количественная систематическая отрицательная связь соответствует основным макроэкономическим закономерностям.

Переменная X3 отражает структуру занятости через долю уязвимой занятости в общей занятости, по оценке MOT. Это форма трудоустройства в неформальном секторе, где работники лишены правовой и социальной защиты, а также стабильного дохода, включая неоплачиваемый семейный труд, работу без договора, неполную занятость и частичную занятость без гарантий. Направление связи с уровнем NEET-молодежи ожидаемо прямое: рост уязвимой занятости увеличивает вероятность того, что молодежь будет вовлечена в нестабильные формы занятости или же останется вне рынка труда и системы образования.

Переменная X4 представляет собой общую безработицу и отражает состояние совокупного спроса и способности экономики использовать трудовые ресурсы в производственном процессе. Направление связи с NEET ожидаемо прямое.

Переменная X5 фиксирует среднюю продолжительность обучения в годах по данным Индекса человеческого развития и выступает ключевым образователь-

ным измерением. В модели X5 рассматривается как фактор, который имеет обратную связь с NEET. Возможное влияние может быть описано двояко: через связь с формированием человеческого капитала (длительность обучения увеличивает навыки и квалификацию выпускников, повышая их шансы на трудоустройство) либо продолжительность периода до наступления активной трудовой деятельности (чем дольше продолжается формальное обучение, тем более отсроченным может быть этот момент).

Перед оценкой параметров регрессионной модели была проведена проверка на мультиколлинеарность. Использовались стандартные диагностические инструменты, такие как матрица парных корреляций (таблица 3) и коэффициент инфляции дисперсии (Variance Inflation Factor, VIF) для каждой регрессорной переменной.

Значения коэффициента инфляции дисперсии (VIF) для каждого включенного в модель регрессора существенно ниже критического порога: индивидуальные VIF варьируются в интервале примерно 1,33–1,84, что меньше граничного значения, равного 5, используемого в эконометрике для индикации потенциально проблемной мультиколлинеарности. Анализ парных корреляций между X1–X5 указывает на отсутствие устойчивых, высокоинтенсивных связей между независимыми факторами (парные корреляционные коэффициенты между независимыми переменными не превышают значения, равного по модулю 0,64).

Модель регрессии  $Y = -0,43X1 - 1,74X2 + 0,15X3 + 0,43X4 - 0,38X5 + 30,33$  показывает высокое качество и статистическую значимость коэффициентов при экзогенных переменных (рисунок 2). Коэффициент детерминации  $R^2$ , равный приблизительно 0,768, указывает на то, что

Таблица 3 – Корреляционная матрица анализируемых в модели № 1 показателей  
Table 3 – Correlation matrix of indicators analyzed in model № 1

	Y	X1	X2	X3	X4	X5
Y	1					
X1	-0,49348	1				
X2	-0,66404	0,334461	1			
X3	0,692413	-0,37942	-0,64091	1		
X4	0,633954	-0,38122	-0,27424	0,237442	1	
X5	-0,54307	0,353066	0,375386	-0,38439	-0,48912	1

Источник: составлено авторами.

Регрессионная статистика								
Множественный R	0,876275333							
R-квадрат	0,76785846							
Нормированный R-квадрат	0,765152847							
Стандартная ошибка	3,106219557							
Наблюдения	435							
Дисперсионный анализ		df	SS	MS	F	Значимость F		
Регрессия		5	13691,46446	2738,292891	283,8020965	1,4458E-133		
Остаток		429	4139,249373	9,648599938				
Итого		434	17830,71383					
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	30,32677722	2,736843229	11,08093328	2,88677E-25	24,94748689	35,70606756	24,94748689	35,70606756
X1	-0,433503189	0,135799257	-3,192235352	0,001515634	-0,700417867	-0,16658851	-0,700417867	-0,16658851
X2	-1,74219898	0,207909627	-8,379597431	7,6617E-16	-2,15084725	-1,333550711	-2,15084725	-1,333550711
X3	0,151262809	0,012960755	11,67083331	1,60212E-27	0,125788327	0,176737291	0,125788327	0,176737291
X4	0,432014531	0,029452101	14,66837737	9,00179E-40	0,374126158	0,489902905	0,374126158	0,489902905
X5	-0,384613976	0,145554875	-2,642398446	0,00853323	-0,670703411	-0,098524541	-0,670703411	-0,098524541

Рисунок 2 – Регрессионная статистика построенной модели № 1  
Figure 2 – Regression statistics for the fitted model № 1

Источник: составлено авторами.

полученный в процессе исследования набор из пяти регрессоров совместно объясняет более трех четвертей вариации зависимой переменной доли NEET-молодежи в наблюдениях и модель учитывает ключевые источники ее вариации.

Анализ коэффициентов свидетельствует о статистической значимости всех отобранных переменных модели. Все р-значения для коэффициентов X1-X5 меньше 0,05 (самое высокое – 0,0085 для X5), т.е. для каждого фактора можно отвергнуть гипотезу о нулевом влиянии с высокой степенью уверенности. Критически важно, что ни один из доверительных интервалов для значимых

коэффициентов не включает ноль – это свидетельствует об однозначном направлении влияния каждого фактора. Общая адекватность и надежность модели подтверждаются чрезвычайно высокой значимостью F-критерия.

Далее для достижения цели исследования было дополнительно оценено и изучено воздействие на долю NEET-молодежи благотворительности и волонтерства, измеренных с помощью Всемирного индекса благотворительности<sup>18</sup> и показателя доли населения, вовле-

<sup>18</sup> <https://www.cafonline.org/insights/research/world-giving-index>.

ченного в волонтерскую деятельность. Интерес к этому аспекту анализа обусловлен тем, что названные показатели дополняют понимание факторов феномена NEET-молодежи через процессы формирования социального капитала и «мягких навыков», а также через уровень гражданской вовлеченности, которые могут оказывать значимое влияние на долю NEET. Соответствующая аргументация приведена в исследованиях, посвященных анализу волонтерства (Федорова, 2021; Giancaspro and Manuti, 2021 и др.). Исследования демонстрируют, что благотворительность и волонтерство формируют особую среду социальной интеграции, где молодые люди получают возможность участвовать в общественно полезной деятельности, приобретать навыки, расширять социальные сети. Эти факторы способны компенсировать дефицит формальной занятости или образовательных возможностей.

Названные дополнительные факторы рассматриваются для тех же исследуемых 29 стран за период 2010–2021 гг., поскольку имеющиеся данные не публиковались за более ранние периоды и не охватывают более поздние годы.

Во вторую модель (далее – модель № 2) окончательно включены пять объясняющих переменных (таблица 4). Критериями для включения факторных переменных в модель послужили теоретическая обоснованность влияния и результаты корреляционного анализа.

В построенной модели № 2 сохраняется преемственность в интерпретации ряда переменных (X1 и X3), а также добавляются новые факторы, позволяющие расширить социальное измерение анализа.

Переменная X6 является оценкой качества политического и общественного климата, влияющей на ожидания экономических агентов, инвестиционные потоки и функционирование рынков труда. В модели политическая стабильность имеет обратную связь с NEET, то есть более высокий уровень стабильности ассоциируется со снижением доли NEET, поскольку уменьшаются барьеры для экономической активности, повышается мобильность ресурсов и растут возможности для институциональной поддержки молодежи.

Индекс человеческого развития (X7) имеет обратную связь с долей NEET. Более высокий ИЧР означает расширение возможностей для интеграции молодежи в экономическую и образовательную систему.

Особое внимание заслуживает динамика фактора X8 – доли людей, занимающихся волонтерством, который фактически характеризует уровень гражданской вовлеченности и социального капитала. Волонтерство создает дополнительные каналы социальной интеграции, формирует навыки, расширяет социальные сети и повышает мотивацию к дальнейшему обучению или трудоустройству. Волонтерство можно рассматривать как форму неформального образования и практического опыта, способствующую включению молодежи в активную социально экономическую жизнь.

Аналогично оценке параметров модели № 1 проведена проверка на отсутствие мультиколлинеарности.

Полученная регрессионная модель  $Y = -1,12X1 + 0,15X3 - 1,15X6 - 18,92X7 - 10,47X8 + 34,89$  имеет высокую степень надежности, оцененные экзогенные факторы статистически значимы (рисунок 3). Коэффициент детерминации  $R^2$  составляет около 0,627.

Таблица 4 – Факторы доли NEET-молодежи с учетом дополнительной оценки влияния благотворительности и волонтерства, включенные в модель № 2

Table 4 – Factors of the NEET-youth rate, incorporating the additional assessment of charity and volunteering impact, included in model № 2

Обозначение	Показатель
X1	Расходы на образование (% от ВВП) – 1999–2010 гг.
X3	Общая уязвимая занятость (% от общей занятости) (смоделированная оценка МОТ)
X6	Политическая стабильность и отсутствие насилия/терроризма: оценка Всемирного банка
X7	Индекс человеческого развития (ИЧР)
X8	Доля людей, занимающихся волонтерством

Источник: составлено авторами.

Регрессионная статистика								
Множественный R	0,79213715							
R-квадрат	0,627481264							
Нормированный R-квадрат	0,622035084							
Стандартная ошибка	3,866294061							
Наблюдения	348							
Дисперсионный анализ								
	df	SS	MS	F	Значимость F			
Регрессия	5	8611,295899	1722,25918	115,2149256	3,94074E-71			
Остаток	342	5112,294581	14,94822977					
Итого	347	13723,59048						
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	34,89125027	5,489717926	6,355745549	6,62791E-10	24,09338879	45,68911176	24,09338879	45,68911176
X1	-1,123643895	0,196270394	-5,724979064	2,2648E-08	-1,50969297	-0,737594821	-1,50969297	-0,737594821
X3	0,154190116	0,017853313	8,636498639	2,24351E-16	0,119073994	0,189306238	0,119073994	0,189306238
X6	-1,148879141	0,522800677	-2,197547157	0,028651396	-2,177188677	-0,120569605	-2,177188677	-0,120569605
X7	-18,92150425	6,473971674	-2,922704207	0,003701042	-31,65531869	-6,187689807	-31,65531869	-6,187689807
X8	-10,46906484	2,659186199	-3,93694313	0,000100011	-15,69948371	-5,238645965	-15,69948371	-5,238645965

Рисунок 3 – Регрессионная статистика построенной модели № 2  
Figure 3 – Regression statistics for the fitted model № 2

Источник: составлено авторами.

Общая состоятельность модели подтверждается результатами дисперсионного анализа, что свидетельствует о высокой надежности и адекватности построенной регрессионной модели № 2.

Далее в процессе достижения цели исследования проанализированы устойчивые закономерности формирования NEET-молодежи для отдельных групп стран (с наиболее высокой долей NEET, с наиболее низкой долей NEET и со «средневысоким» уровнем показателя), что позволяет дополнительно выявить специфические институциональные особенности, влияющие на динамику объекта исследования.

Для анализа доли NEET-молодежи в группе отобранных стран с наиболее высоким уровнем NEET за рассматриваемый период 2010–2021 гг. – Албании,

Армении и Северной Македонии – первоначально в ходе исследования рассматривался тот же широкий набор переменных, что и при построении общих моделей № 1 и № 2 для всех стран. Однако последующий статистический анализ (включая проверку на мультиколлинеарность, корреляционный и регрессионный анализ) выявил различия в значимости факторов для рассматриваемой группы стран. Ряд показателей, значимых в общей модели (например, X1 и X3), в контексте группы стран с высоким уровнем NEET не имеют статистической значимости для объяснения динамики доли NEET-молодежи. В результате были отобраны три ключевых фактора, которые продемонстрировали устойчивую и статистически значимую связь с уровнем NEET именно в этой группе стран (таблица 5).

Таблица 5 – Факторы доли NEET-молодежи, отобранные для моделирования показателя по данным группы стран с высоким значением показателя  
Table 5 – Factors of the NEET-youth rate, selected for modelling in high-NEET countries

Обозначение	Показатель
X9	Обязательное образование, продолжительность (лет)
X10	Индекс счастья, среднегодовой
X11	Всемирный индекс благотворительности

Источник: составлено авторами.

Продолжительность обязательного образования в годах (X9) выступает важным элементом формирования человеческого капитала. Чем дольше молодежь вовлечена в формальное обучение, тем выше вероятность приобретения базовых и профессиональных навыков, необходимых для успешного выхода на рынок труда.

Среднегодовой индекс счастья X10 отражает субъективное благополучие населения и уровень социальной интеграции. Обратная связь здесь обусловлена тем, что субъективное ощущение благополучия снижает риски социальной изоляции и способствует активному включению молодежи в экономические процессы.

Всемирный индекс благотворительности (X11) фиксирует уровень гражданской вовлеченности и социального капитала, выраженный через участие населения в благотворительных практиках и добровольной помощи,

связь с исследуемым показателем обратная.

Проведенные статистические проверки подтверждают устойчивость полученных результатов: как корреляционный анализ (таблица 6), так и регрессионные оценки (рисунок 4) свидетельствуют о значимости всех факторов частной модели № 1.

Каждый из включенных в модель  $Y = -0,82X9 - 3,64X10 - 23,22X11 + 59,35$  факторов оказывает воздействие на зависимую переменную. Доверительные интервалы не пересекают нулевую отметку, что позволяет однозначно интерпретировать направление влияния.

При построении частной модели № 2 для группы стран со средневысокой долей NEET (Молдова, США, Сербия) за рассматриваемый период 2010–2021 гг. процесс отбора объясняющих переменных осуществлялся с учетом исходных 19 макроэкономических и социаль-

Таблица 6 – Корреляционная матрица анализируемых в частной модели № 1 показателей

Table 6 – Correlation matrix of indicators analyzed in partial model № 1

	Y	X9	X10	X11
Y	1			
X9	-0,45338	1		
X10	-0,48185	-0,08277	1	
X11	-0,45725	0,134199	0,067825	1

Источник: составлено авторами.

Регрессионная статистика									
Множественный R	0,778732585								
R-квадрат	0,606424439								
Нормированный R-квадрат	0,56952673								
Стандартная ошибка	2,201963387								
Наблюдения	36								
Дисперсионный анализ									
	df	SS	MS	F	Значимость F				
Регрессия	3	239,0665076	79,68883588	16,43528712	1,2145E-06				
Остаток	32	155,1565683	4,848642758						
Итого	35	394,2230759							
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%	
Y-пересечение	59,34535869	4,926109343	12,04710544	1,97734E-13	49,31120232	69,37951507	49,31120232	69,37951507	
X9	-0,822429101	0,207533291	-3,962877948	0,000388694	-1,245160581	-0,399697622	-1,245160581	-0,399697622	
X10	-3,642171747	0,823052979	-4,425197212	0,000104653	-5,318675802	-1,965667691	-5,318675802	-1,965667691	
X11	-23,21814664	7,162130898	-3,241793116	0,002774675	-37,80692988	-8,629363405	-37,80692988	-8,629363405	

Рисунок 4 – Регрессионная статистика построенной частной модели № 1

Figure 4 – Regression statistics for the fitted model № 1

Источник: составлено авторами.

ных показателей и дополнительных переменных, характеризующих волонтерскую деятельность и благотворительность.

Была обнаружена высокая степень мультиколлинеарности между большинством потенциальных регрессоров. Поиск трех и более переменных для одновременного включения в модель не позволил получить статистически значимые зависимости. После последовательного исключения переменных на основе анализа корреляционной матрицы и проверки VIF была сформирована двухфакторная модель вида  $Y = -1,31X_2 - 0,61X_9 + 34,64$ .

Наибольшую объяснительную силу и устойчивость для рассматриваемой группы стран имеют два фактора: логарифм ВВП на душу населения ( $X_2$ ) и продолжительность обязательного образования ( $X_9$ ).

В группе стран с низким уровнем NEET за рассматриваемый период – Республике Беларусь, Нидерландах, Швеции – в результате корреляционного анализа выделены три фактора, влияние которых целесообразно оценить в процессе построения регрессионной модели (таблица 7).

Корреляционный анализ и регрессионные оценки подтвердили устойчивость полученных результатов. Все коэффициенты модели статистически значимы. Каждый из трех факторов, включенных в модель  $Y = 0,51X_4 - 1,51X_5 - 5,35X_{11} + 23,4$ , оказывает влияние на зависимую переменную. Доверительные интервалы позволяют однозначно определить направление воздействия.

**Анализ полученных результатов с точки зрения их научной новизны и в сопоставлении с соответствующими известными данными и высказанными при постановке задачи гипотезами**

Проведенное исследование, основанное на моделировании показателя доли NEET-молодежи, показывает,

что факторы образования и волонтерства играют системную и статистически значимую роль в объяснении динамики исследуемого показателя. Эти переменные не только включены в качестве объясняющих переменных в модель № 2 для всех 29 рассматриваемых стран, но и являются значимыми в спецификациях частных моделей для стран с высокой и низкой долей NEET-молодежи, что подтверждает их практическую значимость для выбора с целью формирования эффективной политики, направленной на снижение доли NEET-молодежи.

В обобщающей модели № 1 образование представлено двумя экзогенными переменными: расходами на образование (% от ВНД) и средней продолжительностью обучения. Расчеты свидетельствуют о долгосрочном положительном эффекте образовательных инвестиций для снижения доли NEET-молодежи на макроуровне. В модель № 2 наряду с названными факторами образования включен показатель волонтерства, который также статистически значимо влияет на долю NEET-молодежи (при увеличении доли людей, занимающихся волонтерством, доля NEET-молодежи сокращается, и наоборот). Это указывает на то, что волонтерская деятельность выступает как дополнительный канал социализации и профессиональной ориентации, компенсируя возможные пробелы формального образования и способствуя развитию социального капитала и «мягких навыков», особенно значимых для сокращения доли NEET-молодежи.

Важность этих факторов подтвердилась также при анализе показателей для отдельных групп стран и построении частных моделей № 1–3. В странах с наиболее высоким уровнем NEET, таких как Албания, Армения и Северная Македония, в частной модели значимыми оказались продолжительность обязательного образования и Всемирный индекс благотворительности. Это свидетельствует о том, что в контекстах, где проблема NEET стоит особенно остро, базовое образование и вовле-

Таблица 7 – Факторы, отобранные для моделирования показателя по странам с низкой долей NEET-молодежи  
Table 7 – Factors selected for modelling the indicator in countries with a low NEET-youth rate

Обозначение	Показатель
X4	Общая безработица (% от общей численности рабочей силы) (смоделированная оценка МОТ)
X5	Средняя продолжительность обучения (из ИЧР), лет
X11	Всемирный индекс благотворительности

Источник: составлено авторами.

ченность в общественную деятельность через благотворительность и волонтерство выступают ключевыми механизмами предотвращения социального исключения молодежи. В то же время, в странах с достаточно низким уровнем NEET (например, Беларусь, Нидерланды и Швеция), в ходе моделирования в качестве значимых факторов рассматриваемого явления также выделены продолжительность обучения и индекс благотворительности. Это позволяет интерпретировать их не только как инструменты возможного снижения доли NEET, но и как институциональные характеристики социальной системы, способствующие поддержанию благоприятной динамики.

Проведенное исследование, как и ряд других современных исследований (Petrescu et al., 2024; Gunnes et al., 2025; Marques et al., 2025), подтверждает, что уровень и качество образования, а также участие в волонтерской деятельности оказывают значимое воздействие на вероятность попадания молодежи в статус NEET.

Традиционно, уровень образования рассматривается в научной литературе как один из наиболее устойчивых факторов, определяющих вероятность попадания молодежи в категорию NEET. В работе Х. Рахмани были собраны результаты 43 эмпирических исследований, посвященных факторам риска NEET (Rahmani, H., Groot, and Rahmani, A., 2024), в которых авторы показали, что низкая успеваемость в школе и отсутствие профессиональной подготовки формируют устойчивую вероятность «выпадения» из сферы занятости и обучения. Подчеркивается, что образовательные программы, ориентированные на развитие профессиональных навыков, снижают риск социальной изоляции и повышают шансы на трудоустройство. Особое внимание уделяется тому, что именно сочетание академических знаний и практико-ориентированного обучения обеспечивает более устойчивую интеграцию молодых людей в экономическую активность.

В исследовании М. Джанкаспро и А. Манути (Giancaspro and Manuti, 2021) было проанализировано влияние волонтерства на развитие компетенций, необходимых для выхода на рынок труда. Авторы использовали концепцию «капитала трудоустройства», включающего мягкие навыки, социальные связи и опыт коллективной деятельности. На основе эмпирических данных показано, что участие в добровольческих инициативах способствует развитию коммуникативных и организационных способностей, укрепляет чувство

принадлежности к сообществу и расширяет социальные сети. Эти факторы напрямую повышают конкурентоспособность молодых людей на рынке труда, создают дополнительные возможности для трудовой интеграции и снижают вероятность попадания в категорию NEET. Волонтерство в данном контексте выступает как социальный механизм, позволяющий молодежи компенсировать недостаток опыта, облегчает переход между обучением и трудовой деятельностью.

Прогнозные данные для разработки мер политики по сокращению доли NEET-молодежи могут быть получены как на основании моделирования (в том числе использования разработанных в ходе настоящего исследования моделей), так и путем опросов. В частности, ряд результатов международных сравнительных исследований PISA и TIMSS (в меньшей степени, чем PISA) характеризует намерения относительно продолжения образования и карьерные планы обучающихся. Развита система соответствующих исследований, базирующихся на опросах старшеклассников, в США и странах Западной Европы (например, Career Interest Survey from the National Society of High School Scholars (NSHSS), The High School and Beyond Longitudinal Study of 2022, High School Longitudinal Study of 2009 и другие в США; исследование «Zukunft- und Berufspläne vor dem Abitur (ZuBAb)» (2016-2024) в ФРГ, опросы European Training Foundation по странам ЕС и др.).

На основе данных исследования PISA ОЭСР 2022<sup>19</sup>, обобщивших результаты среди 690 000 подростков в 81 стране, было установлено, что к возрасту 15 лет 39 % учащихся не имеют четкого представления о своих карьерных ожиданиях, что вдвое больше, чем десять лет назад. Каждый третий учащийся также указал, что школа не научила его тому, что может быть полезно в работе.

В странах ОЭСР порядка 20 % молодых людей, по данным исследования PISA 2022, рассчитывают работать по профессии, для которой обычно требуется высшее образование, но при этом не планируют продолжать обучение на соответствующем уровне образования после окончания средней школы. Среди молодых людей из наиболее благополучных социальных групп эта доля составляет 11 %, а наиболее уязвимых социальных групп – 34 % (в ряде стран – вплоть до половины принявших участие в исследовании молодых людей из назван-

<sup>19</sup> <https://doi.org/10.1787/d5f8e3f2-en>.

ной социальной группы).

Результативным для разработки мер политики может стать проведение аналогичных репрезентативных опросов выпускников белорусских школ.

Международный опыт демонстрирует разнообразные подходы к снижению уровня NEET-молодежи, каждый из которых отражает специфику национальной социальной и образовательной политики и показывает разную результативность. В Европейском Союзе ключевым инструментом борьбы с молодежной безработицей и неактивностью являются программы Youth Guarantee (2013), последующая Reinforced Youth Guarantee (2020)<sup>20</sup> и соответствующие национальные программы, уникальные для каждой страны. Общеввропейская инициатива предусматривает предоставление молодым людям качественных предложений по трудоустройству, образованию, стажировке или профессиональному обучению в течение четырех месяцев после потери работы или окончания образования. Одним из основных финансовых ресурсов для поддержки реализации общеввропейской программы является Youth Employment Initiative (YEI).

Инициатива Европейской комиссии ALMA<sup>21</sup> (Aim, Learn, Master, Achieve – Стремись, Учись, Овладей, Достигни) использует международную мобильность в качестве ключевого инструмента целевой поддержки NEET-молодежи, включая возможность получения опыта работы в другой стране ЕС и последующее сопровождение для интеграции на рынке труда. В рамках ALMA участники проходят интенсивное обучение в своей стране, затем получают опыт работы за рубежом и по возвращении получают поддержку для трудоустройства или продолжения образования<sup>22</sup>.

В Германии ключевую роль для снижения доли NEET-молодежи играет дуальная система образования<sup>23</sup>, объединяющая теоретическое обучение с практикой. В Польше действует программа развития знаний –

Lost Millennials – Policy Brief on 25+ NEETs in Poland<sup>24</sup>, поддерживающая молодежь на этапе выхода на рынок труда. В Испании реализуется программа Comprehensive Qualification and Employment Programme<sup>25</sup>, облегчающая переход из школы к работе. В Италии государственные программы и гранты, такие как Invest Your Talent in Italy<sup>26</sup>, позволяют NEET-молодежи получить высшее образование и квалификацию, однако зачастую выпускники стремятся трудоустроиться только на высокооплачиваемые места, а при неудаче снова пополняют группу NEET. В Японии реализуются программы реинтеграции социально изолированных молодых людей – Regional Youth Support Stations<sup>27</sup>.

В контексте рассматриваемой проблематики особо следует упомянуть целенаправленную политику по развитию волонтерства, проводимую во многих странах. В частности, в Российской Федерации принят Федеральный закон № 135-ФЗ «О благотворительной деятельности и добровольчестве (волонтерстве)», создана система взаимодействия образовательных учреждений с социально-ориентированными НКО, органами власти, социально ответственным бизнесом через платформу Добро.рф, подготовлен соответствующий учебник (Метелев и др., 2022), разработана и реализуется на всех уровнях образовательная программа «Обучение служением», осуществляются и многие другие мероприятия.

В докладе ОЭСР The State of Global Teenage Career Preparation<sup>28</sup> выдвинуто предложение о том, что даже простые мероприятия, такие как поощрение работодателями своих сотрудников к тому, чтобы они выделяли один час в год на беседы с молодежью о своей работе и возможностях в своей отрасли, могло бы помочь молодежи ориентироваться в тенденциях и возможностях на рынке труда.

Проведение информационных часов в рамках корпоративного волонтерства сотрудников белорусских организаций различных видов экономической деятель-

<sup>20</sup> [https://employment-social-affairs.ec.europa.eu/policies-and-activities/eu-employment-policies/youth-employment-support/reinforced-youth-guarantee\\_en](https://employment-social-affairs.ec.europa.eu/policies-and-activities/eu-employment-policies/youth-employment-support/reinforced-youth-guarantee_en).

<sup>21</sup> <https://ec.europa.eu/>.

<sup>22</sup> <https://www.interregeurope.eu/sites/default/files/2025-06/Policy%20brief%20on%20early%20school%20leavers%20and%20NEETs.pdf>.

<sup>23</sup> <https://germanhistorydocs.org/en/a-new-germany-1990-2023/the-dual-education-system-2017>.

<sup>24</sup> [https://lostmillennials.eu/wp-content/uploads/2024/04/Lost-Millennials\\_Policy-brief\\_Poland.pdf](https://lostmillennials.eu/wp-content/uploads/2024/04/Lost-Millennials_Policy-brief_Poland.pdf).

<sup>25</sup> [https://lostmillennials.eu/wp-content/uploads/2024/04/Lost-Millennials\\_Policy-brief\\_Spain.pdf](https://lostmillennials.eu/wp-content/uploads/2024/04/Lost-Millennials_Policy-brief_Spain.pdf).

<sup>26</sup> <https://www.unipi.it/en/education/registration/enrolment-and-registration/enrolment-for-international-students/invest-your-talent-in-italy-scholarships/>.

<sup>27</sup> <https://www.mhlw.go.jp/english/wp-hw5/dl/23010606e.pdf>.

<sup>28</sup> <https://doi.org/10.1787/d5f8e3f2-en>.

ности, создание соответствующих информационных материалов может стать результативным для обеспечения качественной профориентации белорусской молодежи и сокращения доли NEET-молодежи.

### Выводы

Проведенное исследование на основе анализа опубликованных работ и статистических данных по 29 странам подтверждает, что феномен NEET-молодежи определяется сложным взаимодействием экономических и социальных факторов макро- и микроуровня. Корреляционно-регрессионный анализ выявил статистически значимую зависимость между инвестициями в образование и долей NEET-молодежи, причем эффект от инвестиций проявляется с существенным временным лагом. Также установлено, что увеличение средней продолжительности обучения положительно влияет на сокращение доли NEET-молодежи. Важным выводом является эмпирическое подтверждение значимости волонтерства и благотворительности как дополнительных каналов социализации и профессиональной ориентации, снижающих риск социальной изоляции и попадания молодежи в категорию NEET. Анализ также подтвердил устойчивое однонаправленное изменение доли NEET-молодежи под воздействием таких факторов, как уязвимая занятость и общая безработица, и благоприятное воздействие на сокращение доли NEET-молодежи политической стабильности и уровня экономического развития страны. При этом воздействие названных ключевых факторов проявляется с разной интенсивностью в странах с высоким, средним и низким уровнем NEET, что подчеркивает необходимость дифференцированного подхода в политике, направленной на сокращение доли NEET-молодежи.

Результаты проведенного исследования и изучения соответствующих мер социально-экономической политики ряда развитых стран свидетельствуют, что наибо-

лее эффективные стратегии, направленные на сокращение масштабов NEET-молодежи и ее активизацию на рынке труда, должны носить комплексный характер, одновременно укрепляя образовательную систему, содействуя формированию и использованию социального капитала, в первую очередь – через развитие практик волонтерства, а также целенаправленную политику на рынке труда во взаимосвязи с системой образования.

Исходя из результатов исследования, разработка эффективной политики по сокращению доли молодежи, находящейся в статусе NEET, требует интегрированного подхода в рамках трех взаимосвязанных направлений: образовательное, социально-трудовое и институциональное. В образовательной сфере необходимы долгосрочное планирование и целенаправленное структурирование бюджетных расходов на образование с учетом прогнозных данных, а также внедрение практико-ориентированных моделей обучения. Для формирования эффективных мер государственной политики необходимо изучение намерений обучающихся старших классов относительно продолжения обучения в формальной системе образования и карьерных планов на основе технологии массовых опросов.

На рынке труда ключевыми задачами являются обеспечение социальной защиты занятых, сокращение уязвимых рабочих мест и создание целевых программ обучения, стажировок и трудоустройства. Высокий эффект демонстрируют меры политики, направленные на стимулирование межсекторного партнерства и развития социального капитала через поддержку волонтерства и благотворительности, которые обеспечивают альтернативные пути социализации и профессионального роста. Успех этих мер напрямую зависит от обеспечения макроэкономической и политической стабильности, создающей предсказуемые условия для инвестиций в человеческий капитал.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Ванкевич, Е.В. и Горовой, С.О. (2022). Исследование трудоустройства выпускников как дополнительный инструмент оценки востребованных навыков на рынке труда молодежи. *Белорусский экономический журнал*, № 2, С. 91–106. DOI:10.46782/1818-4510-2022-2-91-106.

Ванкевич, Е.В., Зайцева, О.В. и Коробова, Е.Н. (2016). Исследование проблем занятости и безработицы молодежи на региональном рынке труда. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 31, С. 134–144.

Ванкевич, Е.В. и Зайцева, О.В. (2023). Развитие рынка труда республики Беларусь на современном этапе: тенденции и приоритеты. *Общество и экономика*, № 5, С. 75–100. DOI:10.31857/S020736760025548-1.

Демиденко, С.Ю. (2022). *NEET-молодежь как социальное явление: структура, основания типологизации, подходы к исследованию. Саморегуляция в молодежной среде: типологизация и моделирование: монография*. Белгород: «Эпицентр», С. 116-127. DOI:10.19181/monogr.978-5-89697-382-9.2022.

Зудина, А.А. (2020). *Есть ли в России молодежь NEET? Траектории входа и выхода. Российский рынок труда через призму демографии: моногр.* Москва: Изд. дом Высшей школы экономики, С. 245–292.

Метелев, А.П., Горлова, Н.И., Белановский, Ю.С. и Мерсиянова, И.В. (2022). *Организация добровольческой деятельности и взаимодействие с социально ориентированными НКО*, Москва: Ассоциация волонтерских центров, Российская Федерация.

Федорова, М.Н. (2021). Волонтерство как нерыночная форма развития человеческого потенциала. *Вестник Института экономики Российской академии наук*, № 3, С. 146–157. DOI:10.52180/2073-6487\_2021\_3\_146\_157.

Assmann, M.L. and Broschinski, S. (2021). Mapping Young NEETs Across Europe: Exploring the Institutional Configurations Promoting Youth Disengagement from Education and Employment. *Journal of Applied Youth Studies*, no. 4, pp. 95–117. DOI:10.1007/s43151-021-00040-w.

Bal-Domańska, B. (2022). The impact of macroeconomic and structural factors on the unemployment of young women and men. *Econ Change Restruct*, no. 55, pp. 1141–1172. DOI:10.1007/s10644-021-09341-9.

Giancaspro, M.L. and Manuti, A. (2021). Learning to Be Employable Through Volunteering: A Qualitative Study on the Development of Employability Capital of Young People. *Frontiers in Psychology*, 12:574232. DOI:10.3389/fpsyg.2021.574232.

Gunnes, M., Thaulow, K. and Kaspersen, S.L. (2025). Young adults not in education, employment, or training (NEET): a global scoping review. *BMC Public Health*, no. 25, 3394. DOI:10.1186/s12889-025-24781-y.

Marques, M.J., Alves, R.F., Dias, S., Torri, E., Paza, A., Dantas, C. and Bertotti, M. (2025). A realist synthesis of interventions for youth not in education, employment or training (NEET): building programme theories for effective support. *International Journal of Adolescence and Youth*, 30(1). DOI: 10.1080/02673843.2025.2472022.

Petrescu, C., Voicu, B. and Heinz-Fischer, C. (2024). Conceiving of and politically responding to NEETs in Europe: a scoping review. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11, 226. DOI: 10.1057/s41599-024-02713-2.

Rahmani, H., Groot, W. and Rahmani, A.M. (2024). Unravelling the NEET phenomenon: a systematic literature review and meta-analysis of risk factors for youth not in education, employment, or training. *International Journal of Adolescence and Youth*, 29(1). <https://doi.org/10.1080/02673843.2024.2331576>.

Serrière, N. and Elder, S. (2025). *Handbook on policy areas to reduce youth in NEET status*. Geneva: International Labour Organization, Employment, Labour Markets and Youth Branch, 1st ed., 34 p. DOI: 10.54394/MMRV0675.

Verick, S.S. (2023). The Challenge of Youth Employment: New Findings and Approaches. *The Indian Journal of Labour Economics*, 66 (2), 421–437. <https://doi.org/10.1007/s41027-023-00438-5>.

## REFERENCES

Vankevich, A.V. and Gorovoi, S.O. (2022). A study of graduate employment as an additional tool for assessing the skills in demand on the youth labor market [Issledovanie trudoustrojstva vypusnikov kak dopolnitel'nyj instrument ocenki vostrebovannyh navykov na rynke truda molodezhi]. *Belorusskij ekonomicheskij zhurnal = Belarusian Economic Journal*, № 2, pp. 91–106. DOI:10.46782/1818-4510-2022-2-91-106 (In Russian).

Vankevich, A.V., Zajceva, O.V. and Korobova, E.N. (2016). A study of youth employment and unemployment problems in the regional labor market [Issledovanie problem zanyatosti i bezraboticy molodezhi na regional'nom rynke truda]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of the Vitebsk State Technological University*, № 31, pp. 134–144 (In Russian).

Vankevich, A.V. and Zajceva, O.V. (2023). Development of the labor market of the Republic of Belarus at the present stage: trends and priorities [Razvitie rynka truda respubliki Belarus' na sovremennom etape: tendencii i priority]. *Obshchestvo i*

*ekonomika = Society and Economy*, № 5, pp. 75–100. DOI:10.31857/S020736760025548-1 (In Russian).

Demidenko, S.Yu. (2022). *NEET youth as a social phenomenon: structure, grounds for typology, research approaches. Self-regulation in the youth environment: typology and modeling: monograph* [NEET-molodezh' kak social'noe yavlenie: struktura, osnovaniya tipologizacii, podhody k issledovaniyu. Samoregulyaciya v molodezhnoj srede: tipologizaciya i modelirovanie: monografiya]. Belgorod: «Epicentr», pp. 116–127. DOI:10.19181/monogr.978-5-89697-382-9.2022 (In Russian).

Zudina, A.A. (2020). *Is there NEET youth in Russia? Entry and exit trajectories. The Russian labor market through the prism of demography: monograph*. [Est' li v Rossii molodezh' NEET? Traektorii vkhoda i vyhoda. Rossijskij rynek truda cherez prizmu demografii: monogr.]. Moskva: Izd. dom Vysshej shkoly ekonomiki, pp. 245–292 (In Russian).

Meteliev, A.P., Gorlova, N.I., Belanovskij, Yu.S. and Mersyanova, I.V. (2022). *Organizaciya dobrovol'cheskoj deyatel'nosti i vzaimodejstvie s social'no orientirovannymi NKO* [Organization of volunteer activities and interaction with socially oriented non-profit organizations]. Moskva: Associaciya volonterskih centrov, Russian Federation (In Russian).

Fedorova, M.N. (2021). Volunteering as a non-market form of human potential development [Volonterstvo kak nerynochnaya forma razvitiya chelovecheskogo potenciala]. *Vestnik Instituta ekonomiki Rossijskoj akademii nauk = Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, № 3, pp. 146–157. DOI:10.52180/2073-6487\_2021\_3\_146\_157 (In Russian).

Assmann, M.L. and Broschinski, S. (2021). Mapping Young NEETs Across Europe: Exploring the Institutional Configurations Promoting Youth Disengagement from Education and Employment. *Journal of Applied Youth Studies*, no. 4, pp. 95–117. DOI:10.1007/s43151-021-00040-w.

Bal-Domańska, B. (2022). The impact of macroeconomic and structural factors on the unemployment of young women and men. *Econ Change Restruct*, no. 55, pp. 1141–1172. DOI:10.1007/s10644-021-09341-9.

Giancaspro, M.L. and Manuti, A. (2021). Learning to Be Employable Through Volunteering: A Qualitative Study on the Development of Employability Capital of Young People. *Frontiers in Psychology*, 12:574232. DOI:10.3389/fpsyg.2021.574232.

Gunnes, M., Thaulow, K. and Kaspersen, S.L. (2025). Young adults not in education, employment, or training (NEET): a global scoping review. *BMC Public Health*, no. 25, 3394. DOI:10.1186/s12889-025-24781-y.

Marques, M.J., Alves, R.F., Dias, S., Torri, E., Paza, A., Dantas, C. and Bertotti, M. (2025). A realist synthesis of interventions for youth not in education, employment or training (NEET): building programme theories for effective support. *International Journal of Adolescence and Youth*, 30(1). DOI: 10.1080/02673843.2025.2472022.

Petrescu, C., Voicu, B. and Heinz-Fischer, C. (2024). Conceiving of and politically responding to NEETs in Europe: a scoping review. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11, 226. DOI: 10.1057/s41599-024-02713-2.

Rahmani, H., Groot, W. and Rahmani, A.M. (2024). Unravelling the NEET phenomenon: a systematic literature review and meta-analysis of risk factors for youth not in education, employment, or training. *International Journal of Adolescence and Youth*, 29(1). <https://doi.org/10.1080/02673843.2024.2331576>.

Serrière, N. and Elder, S. (2025). *Handbook on policy areas to reduce youth in NEET status*. Geneva: International Labour Organization, Employment, Labour Markets and Youth Branch, 1st ed., 34 p. DOI: 10.54394/MMRV0675.

Verick, S.S. (2023). The Challenge of Youth Employment: New Findings and Approaches. *The Indian Journal of Labour Economics*, 66 (2), 421–437. <https://doi.org/10.1007/s41027-023-00438-5>.

### Информация об авторах

### Information about the authors

#### Берестень Иван Валерьевич

Студент, Белорусский государственный университет,  
Республика Беларусь.  
E-mail: vanekberesten@mail.ru

#### Ревяко Кирилл Викторович

Студент, Белорусский государственный университет,  
Республика Беларусь.  
E-mail: reviaiko@mail.ru

#### Ерофеева Оксана Николаевна

Кандидат экономических наук, доцент кафедры между-  
народного менеджмента, Белорусский государственный  
университет, Республика Беларусь.  
E-mail: erofeevaon@bsu.by

#### Ivan V. Beresten'

Student, Belarusian State University, Republic of Belarus.  
E-mail: vanekberesten@mail.ru

#### Kirył V. Reviaka

Student, Belarusian State University, Republic of Belarus.  
E-mail: reviaiko@mail.ru

#### Aksana N. Yerafeyeva

Candidate of Science (in Economics), Associate Professor  
of the International Management Department, Belarusian  
State University, Republic of Belarus.  
E-mail: erofeevaon@bsu.by

## Управление качеством жизни населения Китая на основе метода DEA-SBM и индекса Мальмквиста-Люенбергера

**В. М. Карпенко,  
Пан Цзыхань**

*Белорусский государственный университет,  
Республика Беларусь*

**Аннотация.** По мере перехода экономики Китая к этапу высококачественного развития повышение эффективности управления качеством жизни населения становится ключевым условием улучшения благосостояния и обеспечения устойчивого развития. Однако в условиях ресурсно-экологических ограничений вопрос о том, как научно оценивать и оптимизировать эффективность управления, по-прежнему остается практической проблемой. Большинство существующих исследований игнорируют влияние нежелательных выпусков на качество жизни и недостаточно глубоко анализируют причины изменений эффективности, что приводит к недостаточной адресности политических рекомендаций. Целью данной статьи является обоснование выбора инструментов управления качеством жизни в регионах Китая с помощью метода DEA-SBM и индекса Мальмквиста-Люенбергера. В связи с этим в статье используются модель SBM с учетом нежелательных выпусков и индекс Мальмквиста-Люенбергера для оценки эффективности управления качеством жизни населения в 31 провинции Китая за 2015–2023 гг. Результаты показывают, что совокупный уровень эффективности управления качеством жизни населения является относительно низким. Анализ по модели SBM свидетельствует, что основные «узкие места» обусловлены технической эффективностью на уровне управленческих практик и внедрения (использования) технологий, тогда как эффективность масштаба в целом близка к оптимальной. Анализ индекса Мальмквиста-Люенбергера показывает, что ключевой причиной снижения производительности является недостаточность технологического прогресса, а не деградация управленческой эффективности. Региональная неоднородность выражена существенно: Северо-Восток характеризуется технологически обусловленным ростом, Восток демонстрирует убывающую предельную отдачу при высоких ресурсных затратах, а на Западе более отчетливо проявляются технологические «узкие места». Исходя из этого, предлагается сместить фокус оптимизации управленческих инструментов с «наращивания ресурсных затрат» на «повышение эффективности конверсии (трансформации) ресурсов». Посредством декомпозиции эффективности и межрегионального сопоставления статья предоставляет эмпирические основания для дифференцированного проектирования политики, тем самым содействуя оптимизации распределения ресурсов и инновациям управленческих инструментов.

**Ключевые слова:** качество жизни населения; SBM; индекс Мальмквиста-Люенбергера; технологический прогресс; оптимизация управленческих инструментов.

**Информация о статье:** поступила 4 марта 2026 года.

## Quality of life management in China based on the DEA-SBM method and the Malmquist-Luenberger index

**Valeri M. Karpenka,  
Pan Zihan**

*Belarusian State University,  
Republic of Belarus*

**Abstract.** As the Chinese economy transitions to the stage of high-quality development, improving the efficiency of managing the quality of life of the population is becoming a key condition for improving well-being and ensuring sustainable development. However, in the context of resource and environmental constraints, the question of how to scientifically evaluate and optimize management effectiveness remains a practical problem. Most existing studies ignore the impact of unwanted releases on quality of life and do not analyze the causes of changes in effectiveness in sufficient depth, which leads to insufficient targeting of policy recommendations. The purpose of this article is to justify the selection of quality of life management tools in the regions of China using the DEA-SBM method and the Malmquist-Luenberger index. In this

regard, the article uses the SBM model, taking into account unwanted releases, and the Malmquist–Luenberger index to assess the effectiveness of quality of life management in 31 provinces of China in 2015–2023. The results show that the overall level of effectiveness of quality-of-life management is relatively low. An analysis using the SBM model shows that the main "bottlenecks" are caused by technical efficiency at the level of management practices and the introduction (use) of technologies, while the efficiency of scale as a whole is close to optimal. The analysis of the Malmquist–Luenberger index shows that the key reason for the decline in productivity is the lack of technological progress, rather than the degradation of managerial efficiency. Regional heterogeneity is expressed significantly: the Northeast is characterized by technologically driven growth, the East demonstrates decreasing marginal returns at high resource costs, and technological "bottlenecks" are more pronounced in the West. Based on this, it is proposed to shift the focus of optimizing management tools from "increasing resource costs" to "improving the efficiency of conversion (transformation) of resources." Through efficiency decomposition and inter-regional comparison, the article provides empirical grounds for differentiated policy design, thereby contributing to the optimization of resource allocation and innovation of management tools.

**Keywords:** quality of life of the population; SBM; Malmquist–Luenberger index; technological progress; optimization of management tools.

**Article info:** received March 4, 2026.

## Введение

На фоне того, что высококачественное развитие и общее благосостояние становятся основной целью управления, ориентированная исключительно на экономический рост оценка результативности уже не в состоянии всесторонне отразить реальное улучшение качества жизни населения. Хотя существующие исследования добились прогресса в построении индикаторов и измерении субъективного благополучия, сохраняются недостатки: процесс предоставления общественных услуг с множественными входами и выходами лишён эффективности как аналитической перспективы, что ведёт к игнорированию избыточности в распределении ресурсов и структурных узких мест; «нежелательные выпуски» часто обрабатываются имплицитно, вследствие чего управленческая результативность систематически завышается; отсутствуют динамические инструменты, способные во временном измерении отслеживать «перемещение фронта» и «эффект догоняния», что затрудняет предоставление чётких рычагов для непрерывного улучшения. В этой связи настоящая статья использует нерадиальную, неориентированную и способную к явной обработке нежелательных выпусков модель DEA-SBM для поперечной оценки эффективности.

Обзор предыдущих исследований. Zhaoding использовал модель DEA-SBM для анализа влияния формального и неформального экологического регулирования на энергоэффективность строительной отрасли [Zhiding & Xiaoyu, 2023]; Zhaoyang предложил новую трёхэтап-

ную модель виртуальной границы SBM-DEA для оценки устойчивой эффективности строительной отрасли [Zhao, Hong & Xiaoshan, 2022]; WeiWei на основе метода анализа оболочки данных (DEA) и внутренних механизмов производства и поставок электроэнергии построил систему индикаторов оценки экологической эффективности электроэнергетической отрасли, и применил двухэтапную модель сетевой релаксационной меры (NSBM), учитывающую нежелательные выпуски, для расчёта экологической эффективности электроэнергетической отрасли Китая [Wei et al., 2021]; Huang Haifeng построил трёхэтапную модель SBM и с двойной перспективой управления и окружающей среды провёл оценку и анализ совокупной факторной энергоэффективности (TFEE) городов Китая [Haifeng & Tao, 2017]; Yang Xueying использовал эту модель для исследования эффективности управления отходами сноса зданий [Xueying & Shiping, 2025]; Liu Yinying с применением модели нежелательных выпусков провёл анализ пространственно-временной дифференциации эффективности зеленых технологических инноваций и факторов влияния [Liu et al., 2025].

Существующие исследования заложили прочную методологическую основу для применения модели SBM в оценке энергетической, экологической и экономической эффективности различных отраслей, и эта практика уже распространилась на строительную отрасль, электроэнергетические системы и даже городской уровень. Эти успешные примеры предоставляют прямое методологическое руководство для данного исследования. Применение подобных моделей к новой сфере

управления качеством жизни населения, которая также характеризуется множественными вложениями, множественными желаемыми выпусками и нежелательными выпусками, обладает внутренней обоснованностью и значительным потенциалом. Исходя именно из этой предпосылки, данное исследование путём введения индекса Мальмквиста-Люенбергердля динамического анализа, декомпозирует динамическую эволюцию в период 2015–2023 гг., комплексно выявляя относительный вклад «изменений эффективности управления (ЕС)» и «технологического прогресса (ТС)»; на этой основе осуществляется оптимизация инструментов управления.

### Методы исследования

Метод DEA-SBM. Data Envelopment Analysis (DEA) является много-входовым и много-выходовым методом, то есть системным подходом к оценке относительной эффективности между факторными входами и выходами (Charnes, Cooper & Rhodes, 1978). Композитные индексы (например, расчёт качества жизни методом взвешенного среднего) требуют назначения весов вручную, что легко подвергается критике за субъективность. DEA посредством метода оптимальных весов автоматически подбирает для каждого региона наиболее благоприятные веса, максимизируя эффективность данного региона и тем самым обеспечивая объективность оценки. Традиционные применения DEA в основном сосредоточены на моделях CCR, BBC и др.; эти модели преимущественно исходят из желаемых выпусков и не учитывают проблему нежелательных выпусков. В современной оценке эффективности основные способы обработки нежелательных выпусков включают метод транспозиции «вход-выход» (Hailu & Veeman, 2001), метод преобразования атрибутов в положительные (Seiford & Zhu, 2002), метод функции направленного расстояния (Färe, Grosskopf & Pasurkajr, 2007) и др., однако эти подходы не решают проблему слеков по входам и выходам, вследствие чего результаты оценки нередко смещены. Предложенная Tone модель SBM (Slack-Based Measure), учитывающая нежелательные выпуски, напрямую вводит слековые переменные в целевую функцию. Под слеками в данном случае понимаются отклонения единицы принятия решений от эффективной границы, проявляющиеся в избытке входов, недостаточном объеме желательных выпусков или чрезмерном объеме нежелательных выпусков. Слековые переменные служат для количественного отражения этих отклонений и включают переменные по входам, желательным и нежелатель-

ным выпускам. Тем самым модель одновременно учитывает слеки по входам и выходам и позволяет оценивать эффективность при наличии нежелательных выпусков (Tone, 2001). Кроме того, она дает возможность количественно определить, какие входы подлежат сокращению, какие желательные выходы следует увеличить, а какие нежелательные выходы – уменьшить, по каждому конкретному показателю. В рамках SBM с учётом нежелательных выпусков эффективность оценивается при двух допущениях о масштабе: при **CRS** (фиксированная отдача от масштаба) получается совокупная техническая эффективность **TE**, при **VRS** (переменная отдача от масштаба) – чистая техническая эффективность **PTE**. Эти две величины удовлетворяют тождеству разложения  $TE_{CRS} = PTE_{VRS} \cdot SE$ , где **SE** – масштабная эффективность, характеризующая рациональность конфигурации масштаба. **PTE** отражает эффективность управления и использования технологий (насколько эффективна трансформация «вход–выход» при заданном масштабе), **SE** показывает, является ли масштаб завышенным или заниженным. Следовательно, недостаточность **TE** может быть далее атрибутирована «недостаточной управленческой эффективности (**PTE**)» или «недостаточной масштабной эффективности (**SE**)». Модель следующая:

$$\rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{io}}}{1 + \frac{1}{s_g} \sum_{r=1}^{s_g} \frac{s_r^{g+}}{y_{ro}} + \frac{1}{q} \sum_{l=1}^q \frac{s_l^b}{b_{lo}}}$$

$$\begin{cases} X\lambda + s^- = x_0 \\ Y^g\lambda - s^{g+} = y_0^g \\ Y^b\lambda + s^{b-} = y_0^b \end{cases}$$

$$\lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^{g+} \geq 0, s^{b-} \geq 0$$

где  $\rho$  – показатель эффективности модели SBM. Диапазон обычно  $0 < \rho \leq 1$ ,  $\rho = 1$  – эффективность оптимальна;  $\rho < 1$  – имеются избыточности или недостаточности, требуется улучшение;  $n$  – число оцениваемых единиц;  $m$  – число показателей входов;  $s$  – число желаемых выпусков;  $q$  – число нежелательных выпусков;  $X$  – значения входов;  $Y$  – значения желаемых выпусков;  $b$  – значения нежелательных выпусков;  $\lambda$  – весовые коэффициенты;  $s^-$  – избыточность по входам;  $s^{g+}$  – недостаточность желаемых выпусков;  $s^{b-}$  – избыточность нежелательных выпусков.

Целевая функция  $\rho$  строго монотонно убывает по  $s^-$ ,  $s^g$ ,  $s^b$ , и  $0 < \rho \leq 1$ . Для конкретной оцениваемой единицы

производственная единица полностью эффективна тогда и только тогда, когда  $\rho = 1$ , если  $\rho < 1$ , это указывает на потери эффективности, которые можно сократить путем оптимизации объемов входов, желаемых и нежелательных выпусков (Deng Mengjie, Li Yihua, Wu Luqing, Huang Wenjing and Zeng Wuxue, 2024).

Модель индекса производительности Мальмквиста-Люенбергера. Применяется для измерения совокупной факторной производительности между двумя периодами. В настоящей работе, опираясь на определение индекса производительности Malmquist для двух смежных периодов, предложенное Färe (Färe, Grosskopf & Linderdgrén, 1992) и др., и учитывая концепцию направленной функции расстояния, предложенную Shephard (Shephard, 1970), вводится индекс совокупной факторной производительности с учетом нежелательных выпусков, то есть индекс производительности Мальмквиста-Люенбергера. При динамической оценке эффективности качества жизни населения разложение индекса  $ML$  позволяет выявить источники изменения производительности.

Индекс может быть разложен на две части: изменение эффективности ( $EFFCH$ ) и технологическое изменение ( $TECH$ ).  $EFFCH$  отражает эффект догоняния относительно текущего производственного фронта и степень улучшения на управленческом или институциональном уровне.

Когда  $EFFCH$  больше 1, это означает, что соответствующий регион демонстрирует более высокие результаты в распределении ресурсов, эффективности предоставления общественных услуг и способности реализации политики, постепенно приближаясь к оптимальному фронту эффективности; если  $EFFCH$  меньше 1, это указывает на определенный регресс эффективности или расточительное использование ресурсов.

$TECH$  измеряет направление и величину перемещения производственного фронта между двумя периодами. Когда  $TECH$  больше 1, это означает внешнее смещение совокупного производственного фронта и то, что технологический прогресс способствовал повышению качества жизни населения, что может быть тесно связано с инновациями в медицинских технологиях, развитием информатизации образования, внедрением зеленой энергии и технологий экологического управления; если  $TECH$  меньше 1, это указывает на технологический регресс, сжатие совокупного фронта и

свидетельствует о том, что повышение качества жизни ограничено технологическими узкими местами.

В целом значение индекса  $ML$  больше 1 означает рост совокупной факторной производительности качества жизни населения в исследуемый период, который может быть обусловлен как улучшением управленческой эффективности, так и технологическим прогрессом. Напротив, когда индекс меньше 1, это свидетельствует о снижении производительности качества жизни населения, и необходимо искать пути улучшения как в управленческой оптимизации, так и в технологических инновациях.

Модель имеет следующий вид:

$$ML = \left[ \frac{\overline{D}^t(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g)}{\overline{D}^t(x_t, y_t, b_t; g)} \cdot \frac{\overline{D}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g)}{\overline{D}^{t+1}(x_t, y_t, b_t; g)} \right]^{1/2}$$

$$EFFCH = \frac{\overline{D}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g)}{\overline{D}^t(x_t, y_t, b_t; g)}$$

$$TECH = \left[ \frac{\overline{D}^t(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g)}{\overline{D}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g)} \cdot \frac{\overline{D}^t(x_t, y_t, b_t; g)}{\overline{D}^{t+1}(x_t, y_t, b_t; g)} \right]^{1/2}$$

где  $ML$  – Malmquist-Luenberger индекс;

$\overline{D}^t(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g)$  – направленная функция расстояния от периода  $t$  к периоду  $t+1$ ;

$g = (g^x, g^y, g^b)$  – вектор направления.

Модель SBM фокусируется на описании статической относительной эффективности, тогда как индекс  $ML$  измеряет динамику эффективности; тем самым оба подхода методологически взаимодополняют друг друга. С помощью модели SBM можно выявить структурные узкие места во взаимосвязи «вход-выход», тогда как индекс  $ML$  раскрывает тенденции эволюции эффективности и её движущие силы. Их сочетание позволяет всесторонне охватить проблемы эффективности качества жизни населения в поперечном (горизонтальном) и продольном (вертикальном) измерениях, предоставляя более адресные ориентиры для оптимизации управления (Zhao et al., 2016).

#### Отбор показателей и источники данных

Отбор показателей. С целью охарактеризовать механизм формирования качества жизни населения в измерениях «вход-выход-нежелательный выпуск» и обеспечить оценку эффективности SBM, в статье на провинциальном уровне (2015–2023 гг.) формируется следующая система показателей. С учётом непараметрического, нерадиального и неориентированного зада-

ния DEA все показатели приведены в расчёте «на душу населения/на единицу населения», чтобы обеспечить сопоставимость между различными годами (таблица 1).

По входным показателям: GDP на душу населения и расходы общего публичного бюджета на душу населения. GDP на душу населения отражает общую экономическую базу и ресурсную ёмкость региона и служит «фундаментом» для предоставления публичных услуг. Расходы общего публичного бюджета на душу населения отражают прямые государственные вложения в социальную сферу и публичные услуги и являются ключевым фискальным индикатором.

По желаемым выпускам: объём библиотечных фондов публичных библиотек в расчёте на единицу населения – доступность и потенциал культурных услуг; число коек в учреждениях здравоохранения на 1000 человек – ёмкость материальной базы медицины; число практикующих (ассистент-)врачей на 1000 человек (чел./1000 чел.) – уровень обеспеченности медицинскими кадрами; число студентов высших учебных заведений на 100 000 человек (чел./100 тыс.) – предложение высшего образования и накопление человеческого капитала; располагаемый доход на душу населения (юаней/чел.) – результирующий показатель благосостояния населения. Указанные желаемые выпуски охватывают четыре аспекта – культуру, здравоохранение, образование и доходы, – отражая совокупный результат «количества и качества» публичных услуг.

По нежелательному выпуску: коэффициент смертности постоянного населения (‰) – негативный результат, причём более высокие значения менее благоприятны. В качестве нежелательного выпуска в модели данный показатель при прочих равных должен быть по возможности снижен.

Источники данных. Векторные данные административных границ исследуемой территории получены из карты административного деления Атласа Китая масштаба 1:1 600 000; после сканирования они были векторизованы. Социально-экономические статистические данные Китая за 2015–2023 гг. заимствованы из изданий Государственного статистического управления КНР «Статистический ежегодник Китая 2014» – «Статистический ежегодник Китая 2024».

#### Результаты и их анализ

Модель эффективности SBM. Опираясь на программное обеспечение MaxDea8, проведён анализ 279 наблюдений по 31 провинции за 2015–2023 гг.

В выборочном периоде среднее значение национальной эффективности управления качеством жизни (*TE*) составило 0,767; в целом совокупная эффективность по провинциям в исследуемый период была заниженной, большинство регионов не достигли эффективного фронта.

Среднее значение технической эффективности (*PTE*) равно 0,821, что относительно высоко и указывает на наличие определённых преимуществ уровня

Таблица 1 – Показатели оценки эффективности SBM и индекса ML

Table 1 – SBM performance evaluation indicators and ML index

Параметры	Показатели оценки эффективности SBM и индекса ML	Единица измерения
Входы	GDP на душу населения	Юаней/чел.
	Расходы общего публичного бюджета на душу населения	Юаней/чел.
Желаемые выпуски	Объём библиотечных фондов публичных библиотек в расчёте на единицу населения	Экземпляров/10 тыс. чел.
	Число коек в учреждениях здравоохранения на 1000 человек	Коек/1000 чел.
	Число практикующих (ассистент-)врачей на 1000 человек	чел./1000 чел.
	Число студентов высших учебных заведений на 100 000 человек	чел./100 тыс. чел.
	Располагаемый доход на душу населения	Юаней/чел.
Нежелательные выпуски	Коэффициент смертности постоянного населения	‰

управления и использования технологий при заданных масштабах, однако сохраняется возможность для улучшений.

Среднее значение масштабной эффективности (*SE*) равно 0,935, то есть близко к 1, что свидетельствует о сравнительно рациональной конфигурации масштаба в большинстве регионов и о том, что размер вложений не является основным ограничителем. Это означает, что большинство регионов пока не находятся на границе эффективности: недостаток эффективности в основном обусловлен неэффективностью на уровне управления и использования технологий, тогда как конфигурация масштаба в целом близка к оптимальной и масштаб не является ключевой проблемой.

В рамках выборки 2015–2023 гг. выбраны четыре года – 2015, 2018, 2020, 2023 – и построены карты пространственной конфигурации значений эффектив-

ности повышения качества жизни для 31 провинции (рисунок 1).

В целом в 2015–2023 гг. эффективность SBM демонстрирует отчётливую нисходящую тенденцию, обусловленную снижением чистой технической эффективности и убывающей отдачей от масштаба. Старение населения, региональная неоднородность и шок пандемии дополнительно усилили спад эффективности, тогда как масштабная эффективность в целом стабильна, что указывает: ключевая проблема заключается не в недостатке масштаба вложений, а в относительном отставании распределения ресурсов и технологического прогресса. Следовательно, в будущем повышение эффективности качества жизни населения должно опираться прежде всего на улучшение эффективности конфигурации публичных услуг и уровня технологических инноваций, а не на простое наращивание бюджетных расходов.

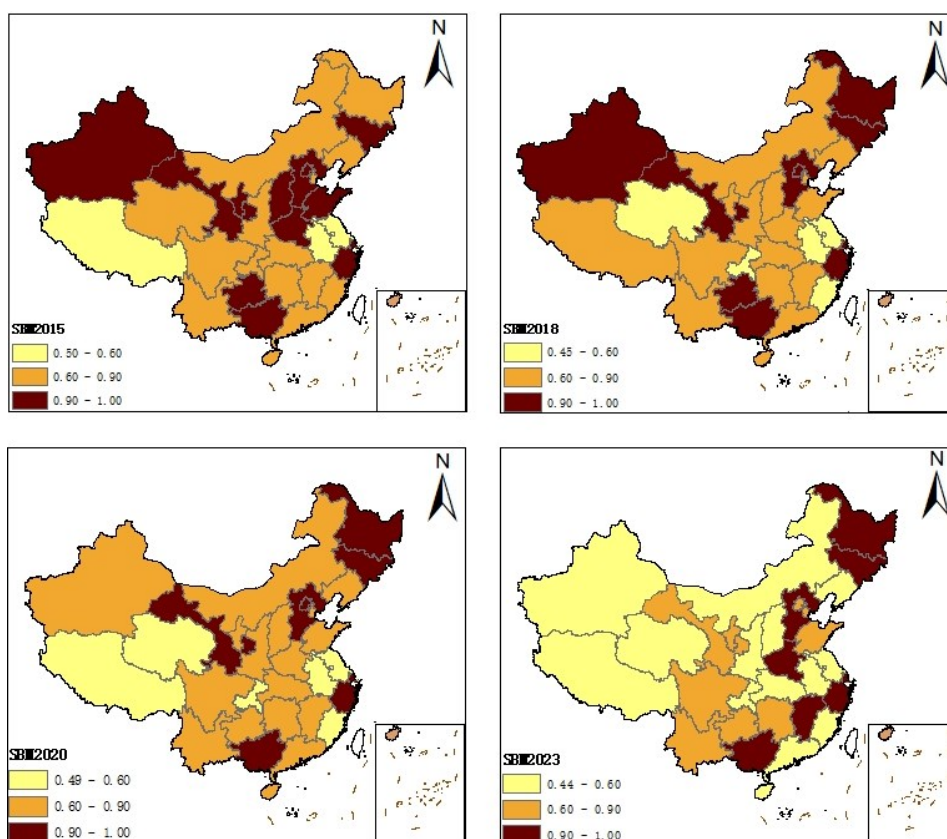


Рисунок 1 – Пространственная структура эффективности управления качеством жизни в регионах Китая  
 Figure 1 – Spatial structure of quality of life management effectiveness in China

С точки зрения регионов, на Востоке совокупная техническая эффективность в целом наивысшая, однако сохраняются колебания, связанные с недостаточностью чистой технической эффективности. В Центральном регионе показатели ниже общенационального среднего, дефицит совокупной эффективности выражен отчётливо. На Западе наблюдается значительная волатильность, в отдельные годы отмечается снижение чистой технической эффективности. Северо-Восток в целом удерживается на высоком уровне, значение *SE* близко к 1, масштабная конфигурация рациональна, что делает его «эталоном» в межрегиональном сопоставлении. Однако столь высокая эффективность в определённой мере является «относительной эффективностью» и не означает абсолютного лидерства по уровню качества жизни, а отражает преимущество коэффициента трансформации «вход–выход» по сравнению с другими регионами.

С точки зрения провинций, в первую пятёрку по значениям эффективности вошли Чжэцзян (0,988), Ганьсу (0,972), Гуанси (0,971), Цзилинь (0,962), Хэйлуцзян (0,956). В Чжэцзяне достаточны экономические и фискальные вложения: GDP на душу населения и расходы общего публичного бюджета находятся среди самых высоких по стране. Система публичных услуг развита, образовательные и медицинские ресурсы распределены сбалансированно, цифровое управление является передовым; уровень применения технологий высок: широкое распространение информатизации в медицине и образовании подтолкнуло *PTE* к значению, близкому к 1. В Ганьсу масштаб умеренный: несмотря на небольшой экономический объём, входы и выходы сравнительно согласованы, ресурсных перекосов немного; эффективность публичных услуг относительно высока, при ограниченных бюджетах образовательные и медицинские результаты относительно рациональны, что позволяет избегать потерь. В Гуанси средний масштаб населения и умеренная конфигурация ресурсов, расширяется охват медицинских и образовательных ресурсов; как ключевой регион западной зоны, получающий приоритетную поддержку, он, благодаря фискальным трансфертам, эффективно повысил качество жизни населения. В Цзилине и Хэйлуцзяне (Северо-Восток) имеются традиционные преимущества по образовательным и медицинским ресурсам; база систем образования и здравоохранения в Северо-Востоке относительно сильнее, а сокращение численности населения, напротив, улучшило показатели «на душу», что обусловило высокие значения *PTE*; *SE*

высока: масштаб относительно согласован, избыточной экспансии не наблюдается.

Пекин (0,928), Шанхай (0,953) и другие развитые регионы, хотя и демонстрируют высокие баллы эффективности, на этот раз не вошли в первую пятёрку. Причина в том, что при высоком уровне вложений значения эффективности SBM не поднялись в верхние позиции из-за масштабов населения, несбалансированного распределения ресурсов и убывающей предельной отдачи. Это отражает, что в условиях высоких вложений повышение коэффициента преобразования результатов публичных услуг остаётся ключевой задачей.

Последние пять мест занимают Фуцзянь (0,569), Тибет (0,562), Чунцин (0,56), Цзянсу (0,505), Аньхой (0,476). В Аньхое наблюдаются недостаточность бюджетных вложений и высокое демографическое давление; низкий уровень публичных расходов на душу населения и дефицит ресурсного обеспечения; выраженная городско-сельская дифференциация, межрегиональные различия в обеспечении публичными услугами снижают общий *PTE*. В Цзянсу высокие вложения не трансформировались в высокую эффективность: при развитой экономике и высоких расходах на душу населения прирост выпусков (образование, здравоохранение, улучшение доходов) относительно запаздывает, что указывает на неэффективное использование ресурсов и убывающую предельную отдачу. В Чунцине высокая плотность населения и сложный рельеф ограничивают пространственное распределение медицинских и образовательных ресурсов, повышая издержки доступа; масштабная эффективность недостаточна: *SE* относительно низка, расширение масштаба не привело к соразмерному выпуску. В Тибете крайняя дисперсность географии и расселения затрудняет покрытие публичных услуг, что приводит к низким значениям выпусков на душу; высокая зависимость от бюджета: несмотря на центральные трансферты, эффективность трансформации невысока. Во Фуцзяне при относительно сильной экономике социальные услуги отстают; обеспечение образованием и медициной на душу населения не является высоким; региональная неоднородность, значительный разрыв между прибрежными и горными районами обуславливают низкое суммарное значение *PTE*.

Значения slacks демонстрируют направления оптимизации по измерениям «входы–выходы–нежелательные выпуски» в модели SBM.

## Показатели входов

GDP на душу населения (показатель экономических вложений). В таких регионах с высокими вложениями, но невысокой эффективностью, как Пекин, Шанхай, Гуандун, Цзянсу, Фуцзянь, экономическое развитие уже находится на высоком уровне; дальнейшее чисто количественное наращивание вложений даёт ограниченный предельный эффект. Необходимо ослабить опору исключительно на стимулирование через GDP, перейти к качественно ориентированному развитию и оптимизировать экономическую структуру, а не расширять объём.

Расходы общего публичного бюджета на душу населения (фискальные вложения). В ряде восточных провинций (например, Цзянсу, Фуцзянь) наблюдается феномен «высокие вложения – низкая эффективность», что указывает на то, что бюджетные расходы не конвертируются в выпуск должным образом. Следует сокращать неэффективные и дублирующие траты, оптимизировать направления бюджетного финансирования и повышать результативность использования средств, а не просто увеличивать масштаб расходов.

## Показатели желаемых выпусков

Объём библиотечных фондов публичных библиотек в расчете на единицу населения (культурные услуги). В центральных и западных регионах и в некоторых густонаселенных провинциях (например, Хэнань, Аньхой) сохраняется недостаточность. Необходимо увеличить предложение базовой культурной инфраструктуры и цифровых библиотечных ресурсов, сократить городской-сельский культурный разрыв.

Число коек в учреждениях здравоохранения на 1000 человек и число практикующих врачей на 1000 человек (медицинские услуги). В западных регионах (например, Тибет, Гуйчжоу, Юньнань) явно наблюдается дефицит медицинских ресурсов. Следует усилить распределение медицинских ресурсов, особенно на уровне первичного звена и телемедицины, повысить сбалансированность.

Число студентов высших учебных заведений на 100 000 человек (уровень образования). В центральных и части западных регионов ресурсы высшего образования недостаточны. Необходимо расширять набор и масштабы учреждений, одновременно повышая качество образования, продвигать сбалансированное развитие высшего образования по регионам.

Располагаемый доход на душу населения (уровень доходов населения). В центральных, западных и северо-восточных регионах уровень доходов относительно

низок. Следует повышать доходы населения за счет индустриального обновления и поддержки занятости, сокращая региональные различия.

## Показатель нежелательных выпусков

Коэффициент смертности постоянного населения. В западных и части северо-восточных регионов (например, Тибет, Цинхай, Хэйлунцзян) уровень смертности повышен. Следует в приоритетном порядке улучшать доступность медицинской помощи и уровень общественного здравоохранения, снижая смертность от заболеваний. Согласно ранее приведённым значениям совокупной эффективности, в Северо-Востоке существует достаточно развитая база систем образования и здравоохранения. Однако Северо-Восток является одним из регионов Китая с наиболее выраженным старением населения; под воздействием структурных факторов – старение, отток населения, высокая распространённость хронических заболеваний и особенности поведенческого здоровья – коэффициент смертности постоянного населения остаётся повышенным. Это указывает на то, что преимущества в медицинских ресурсах не могут полностью компенсировать неблагоприятные демографические и медико-социальные структуры; в дальнейшем следует уделить больше внимания общественному здравоохранению, профилактике хронических заболеваний и управлению здоровьем.

## Индекс Мальмквиста-Люенбергер

Среднее по стране:  $ML = 0,983 (< 1)$ ,  $EFFCH = 1,006 (> 1)$ ,  $TC = 0,984 (< 1)$ . Основная причина снижения производительности заключается в недостаточности технологического прогресса ( $TECH < 1$ ), а не в деградации эффективности ( $EFFCH > 1$ ).

Согласно рисунку 2, в 2019 г. 71 % провинций имели  $MI > 1$ ; в 2017 г., самом слабом, лишь 6,5 % провинций имели  $MI > 1$ ; в 2020–2022 гг. показатели вновь ослабли (период пандемии), однако в 2023 г. доля случаев с  $TC > 1$  достигла 54,8 %, что указывает на признаки технологического восстановления.

В 2016–2018 гг. доля  $EFFCH > 1$  была относительно высокой, тогда как  $TC > 1$  – низкой; в 2019 г.  $EC$  и  $TC$  росли одновременно; в 2021 г. наблюдалось несоответствие вида « $TC > 1$ ,  $EC$  слабее», что указывает на технологическую диффузию при отставании управленческой эффективности. Необходимо усилить технологическую диффузию и институциональные инновации в сфере публичных услуг (цифровое государственное управление, иерархическая система медицинской помощи

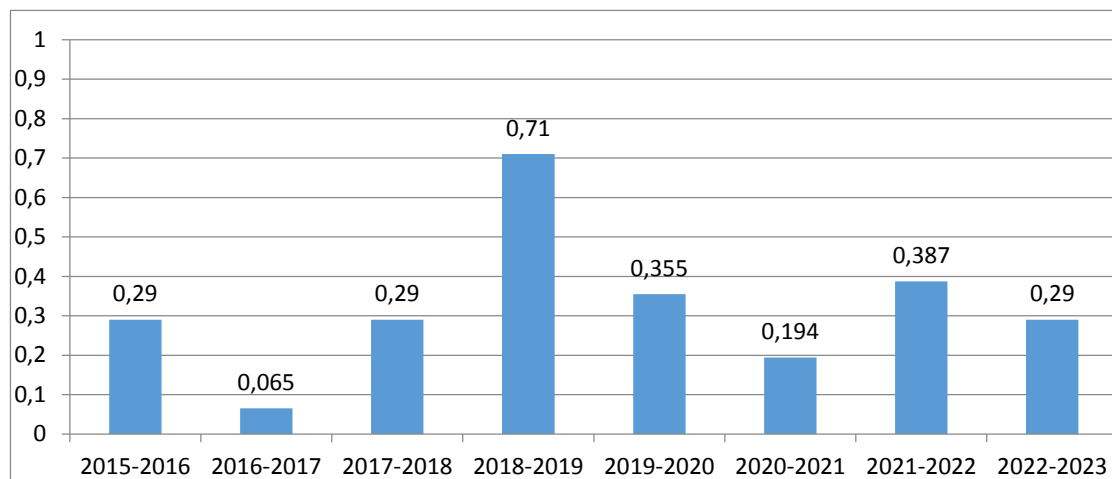


Рисунок 2 – Доля провинций с  $ML \geq 1$  по годам  
Figure 2 – Percentage of provinces with  $ML \geq 1$  by year

и телемедицина, информатизация образования, «зелёные» низкоуглеродные технологии), превращая «повышение управленческой эффективности» в «устойчивость технологического прогресса».

Рассматривая межпровинциальную структуру (при пороге  $EC \geq 1 / TC \geq 1$ ) тридцать одну провинцию можно разделить на четыре категории.

Категория 1 (прогресс по обоим показателям) включает 6 провинций: Цзилинь, Гуанси, Цзянси, Хэнань, Чжэцзян, Хэйлунцзян; управление и технологии выступают двойным драйвером; могут служить эталоном; необходимо сохранять темп реформ на стороне предложения и технологических вложений, обеспечивая демонстрационный эффект для прочих провинций.

Категория 2 (преимущественно управленческие улучшения) включает 17 провинций: Пекин, Шанхай, Юньнань, Тяньцзинь, Нинся, Аньхой, Гуандун, Синьцзян, Цзянсу, Хайнань, Хунань, Ганьсу, Фуцзянь, Тибет, Чунцин, Гуйчжоу, Цинхай.  $EC \geq 1$ ,  $TC < 1$ ; повышение управленческой эффективности «удержало» технологическую стагнацию; это наиболее многочисленный тип; требуется продвинуть замкнутый контур «наука – применение – сценарии».

Категория 3 (технологический прогресс при регрессе эффективности) включает 3 провинции: Хэбэй, Ляонин, Шэньси; технологический фронт смещается наружу, но управленческая конфигурация отстаёт; необ-

ходимо нарастить вложения в публичные услуги.

Категория 4 (двойной регресс) включает 5 провинций: Внутренняя Монголия, Сычуань, Шаньдун, Шаньси, Хубэй.  $EC$  и  $TC$  одновременно  $< 1$ ; приоритетные объекты управления; в первую очередь провести списочное упорядочение и оперативно скорректировать политику.

Межпровинциальная картина в основном характеризуется «преобладанием управленческих улучшений» в 15 провинциях из 31, что вновь подтверждает общенациональную недостаточность технологического прогресса.

#### Выводы и рекомендации

Исходя из измерения качества жизни населения Китая за 2015–2023 гг. с использованием SBM с учётом нежелательных выпусков и индекса Malmquist, исследование показывает: общий уровень эффективности занижен; совокупная эффективность управлением качеством жизни характеризуется  $TE = 0,767$ ; узкие места главным образом связаны с технической эффективностью на уровне управления и применения технологий ( $PTE = 0,821$ ), тогда как масштабная эффективность ( $SE = 0,935$ ) в целом близка к оптимальной; в динамике совокупная факторная производительность демонстрирует умеренное снижение ( $MI = 0,983$ ), разложение указывает на небольшое улучшение эффективности ( $EC = 1,006$ ), однако недостаточность технологических изменений ( $TC = 0,984$ ) становится доминирующим ограничением. Региональная структура демонстрирует

дифференцированную картину: «Северо-Восток – технологический драйвер; Восток – убывающая предельная отдача на фоне высоких вложений; Запад – более выраженные технологические узкие места»; на межпровинциальном уровне одновременно присутствуют провинции «с умеренными вложениями – высокой конверсией» и «с высокими вложениями – низкой конверсией». В целом повышение качества жизни населения в большей степени зависит от управленческих компетенций и применения технологий, а не от простого расширения масштабов предложения.

Соответственно, акцент оптимизации управленческих инструментов следует сместить от «наращивания вложений» к «повышению конверсии». В бюджетном управлении рекомендуется напрямую увязывать ключевые результаты публичных услуг (например, число врачей и коек на 1000 человек, число студентов вузов на 100 000 человек, рост располагаемых доходов на душу населения и снижение смертности) с распределением ресурсов, формируя замкнутый цикл результативности, ориентированный на результаты; в цепочке предоставления услуг продвигать иерархическую систему медицинской помощи, согласование образовательных и культурных сервисов и межведомственный обмен данными, сокращая ожидание и дублирование, и достигая большей доступности и качества при тех же вложениях; на технологическом уровне ускорять диффузию в сценариях с высокой предельной отдачей – телемедицина, сотрудничество в рамках медицинских объединений, информатизация образования и цифровые культурные платформы – чтобы внешнее смещение передовой практики стало нормой; одновременно реализовывать дифференцированные траектории в зависимости от комбинации  $EC \times TC$ : для регионов «двойного прогресса» – акцент на стандартизацию и тиражирование опыта; для регионов «с преобладанием управленческих улучшений» – усиление замкнутого контура «исследования и разработки – применение – сценарии»; для регионов «технологический прогресс при регрессе эффективности» – калибровка процессов и платёжных механизмов для реализации технологической ренты; для регионов «двойного регресса» – приоритетная списочная реструктуризация для оперативного восстановления базовых возможностей. В сочетании с диагностикой отдачи от масштаба следует умеренно корректировать объём предложения, избегая как избыточной экспансии, так и недостаточности.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности их использования государственными органами при управлении качеством жизни населения, распределении общественных ресурсов и оценке эффективности. Центральные и провинциальные органы управления могут использовать результаты модели SBM и индекса  $ML$  для динамического мониторинга эффективности управления качеством жизни населения в различных регионах, выявления основных узких мест по управленческой эффективности, масштабной конфигурации и технологическому прогрессу в отдельных провинциях, а также для обоснования оптимизации структуры бюджетных расходов, механизмов межбюджетных трансфертов и политики региональной координации. Местные органы власти, в свою очередь, могут на основе разложения  $PTE$ ,  $SE$ ,  $EC$  и  $TC$  определить, обусловлена ли недостаточная эффективность в регионе главным образом нерациональным распределением ресурсов, несоответствием масштаба или недостаточным технологическим прогрессом, и соответственно выбирать такие управленческие инструменты, как управление бюджетной эффективностью, оптимизация процессов, цифровое управление или корректировка масштаба. Поскольку система показателей, используемая в статье, охватывает такие измерения, как здравоохранение, образование, культура, доходы и здоровье, полученные результаты также могут служить ориентиром для соответствующих органов общественных услуг при совершенствовании распределения ресурсов, например в сферах здравоохранения, образовательных ресурсов, общественных культурных услуг и социального обеспечения, с акцентом на согласованность между затратами и результатами и повышение качества предоставляемых услуг. В целом, результаты исследования ориентированы на предоставление оценочной основы и направлений совершенствования управления качеством жизни населения на региональном уровне, содействуя более точному выявлению узких мест эффективности, оптимизации распределения ресурсов и непрерывному мониторингу результатов реализации политики.

Благодаря согласованному продвижению управленческих и технологических мер возможно без существенного увеличения вложений обеспечить устойчивое улучшение качества жизни населения и последовательную конвергенцию межрегиональных различий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Zhiding Chen, Xiaoyu Zheng (2023). Research on the influence of environmental regulation on the total factor energy efficiency of China's construction industry. *Environmental Research Communications*, Vol. 5, № 5, pp. 1–17, DOI 10.1088/2515-7620/acddb9.

Zhao Yang, Hong Fang and Xiaoshan Xue (2022). Sustainable efficiency and CO2 reduction potential of China's construction industry: application of a three-stage virtual frontier SBM-DEA model. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol. 21, № 2, pp. 605–618, DOI: 10.1080/13467581.2020.1869019.

Wei Wei, Shuangying Ding, Silin Zheng, Jingjing Ma, Tong Niu and Jinkai Li (2021). Environmental Efficiency Evaluation of China's Power Industry Based on the Two-Stage Network Slack-Based Measure Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 18, № 23, pp. 1–22.

Haifeng Huang, Tao Wang (2017). The Total-Factor Energy Efficiency of Regions in China: Based on Three-Stage SBM Model. *Sustainability*, Vol. 9, № 9, pp. 1–20.

Xueying Yang, Shiping Wen (2025). Spatial Correlation Network of Construction and Demolition Waste Management Efficiency: A Study Based on an Improved Three-Stage SBM-DEA Model in China. *Buildings*, Vol. 15, № 51, pp. 1–22.

Liu Yinying, Jiang Mingyue, Li Meng and Guo Mengying (2025). Research on the spatiotemporal differentiation and influencing factors of green technology innovation efficiency considering unexpected outputs. *Journal of Gansu Sciences*, Vol. 37, № 4, pp. 143–152.

Charnes A., Cooper W.W. and Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, № 2, pp. 429–444.

Hailu A., Veeman, T.S. (2001). Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: An application to the Canadian pulp and paper industry. *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 83, № 3, pp. 605–616.

Seiford, L.M., Zhu, J. (2002). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European Journal of Operational Research*, Vol. 142, № 1, pp. 16–20.

Färe, R., Grosskopf, S. and Pasurkajr, C.A. (2007). Environmental production functions and environmental directional distance functions. *Energy*, Vol. 32, № 7, pp. 1055–1066.

Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, Vol. 130, № 3, pp. 498–509.

Deng Mengjie, Li Yihua, Wu Luqing, Huang Wenjing and Zeng Wuxue (2024). Green development efficiency of cold chain logistics based on the super-SBM-GML index model. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, Vol. 44, № 4, pp. 189–199 (In Chinese).

Färe, R., Grosskopf, S. and Linderdgrén, B. (1992). Productivity changes in Swedish pharmacies 1980–1989: A nonparametric Malmquist approach. *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 3, № 1, pp. 85–101.

Shephard, R.W. (1970). Theory of cost and production functions. *Economic Journal*. Vol. 35, № 3, pp. 177–188.

Zhao Lin, Zhang Yushuo, Jiao Xinying, Wu Di and Wu Dianting (2016). An evaluation of Chinese marine economy efficiency based on SBM and Malmquist productivity indexes. *China Academic Journal Electronic Publishing House Resources Science*. № 3. pp. 461–475 (In Chinese).

### Информация об авторах

### Information about the authors

#### Карпенко Валерий Михайлович

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инноватика и предпринимательская деятельность», Белорусский государственный университет, Республика Беларусь.

E-mail: vmkarpenka@gmail.com

#### Пан Цзыхань

Аспирант кафедры «Международный менеджмент», Белорусский государственный университет, Республика Беларусь.

E-mail: 755549849@163.com

#### Valeri M. Karpenka

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor, Associate Professor at the Department "Innovation and Entrepreneurship", Belarusian State University, Republic of Belarus.

E-mail: vmkarpenka@gmail.com

#### Pan Zihan

Postgraduate Student at the Department "International Management", Belarusian State University, Republic of Belarus.

E-mail: 755549849@163.com

## Информационное обеспечение и инструменты оценки уровня цифрового развития организации

Т. В. Касаева,  
Ю. Ю. Жихар

*Витебский государственный технологический университет,  
Республика Беларусь*

**Аннотация.** Становление и развитие цифровой экономики, которая сочетает в себе ключевые особенности инновационной, информационной и сетевой экономик, стало общемировым трендом. Предпосылкой развития цифровой экономики послужил стремительный рост количества и качества применяемых информационно-коммуникационных технологий, внедрение которых является неотъемлемой частью стратегического развития современных организаций. На сегодняшний день не вызывает сомнения тот факт, что внедрение информационно-коммуникационных технологий (далее ИКТ) способствует росту эффективности бизнес-процессов, улучшает качество предоставляемых услуг и открывает новые возможности для развития конкурентных преимуществ на рынке. В связи с этим становится актуальным вопрос определения уровня цифрового развития организаций и сравнение этого уровня с национальным, региональным, отраслевым. Множество подходов, предлагаемых для оценки уровня цифрового развития организации, затрудняет выбор определенной методики в реальной практике экономических субъектов. Систематизация имеющихся в данной области разработок позволила сформулировать проблемы их практического применения, к числу которых, в первую очередь, отнесена проблема формирования необходимого информационного обеспечения. Вместе с тем, показатели внедрения ИКТ в организациях являются объектом государственных статистических наблюдений и публикуются с периодичностью в два года в сборнике Национального статистического комитета Республики Беларусь «Информационное общество в Республике Беларусь» на основе сводки и группировки показателей статистической отчетности респондентов по форме 6-икт «Анкета об использовании цифровых технологий в организации». В связи с этим, целью данного исследования является обоснование методического подхода и разработка инструментов оценки уровня цифрового развития организации на основе данных официальной статистики об использовании информационно-коммуникационных технологий экономическими субъектами. Разработаны инструменты оценки цифрового развития организации: карта оценки, шкала для определения рейтинга организации; предложена визуализация результатов оценки; разработан алгоритм построения карты оценки цифрового развития в Microsoft Excel.

**Ключевые слова:** цифровое развитие, информационно-коммуникационные технологии, информационное обеспечение, карта оценки цифрового развития, шкала рейтинга организации по уровню цифрового развития.

**Информация о статье:** поступила 10 марта 2026 года.

## Information support and tools for assessing the level of digital development of an organization

Tamara V. Kasayeva,  
Yulia Yu. Zhikhar

*Vitebsk State Technological University,  
Republic of Belarus*

**Abstract.** The emergence and development of the digital economy, which combines key features of the innovation, information, and network economies, has become a global trend. The rapid growth in the quantity and quality of information and communications technologies (ICTs), the implementation of which is an integral part of the strategic development of modern organizations, has served as a prerequisite for the development of the digital economy. Today, there is no doubt that the implementation of information and communications technologies (ICTs) facilitates the efficiency of business processes, improves the quality of services provided, and opens new opportunities for developing competitive advantages in the marketplace. Therefore, determining the level of digital development of organizations and comparing this level with national, regional, and industry standards has become a pressing issue. The multitude of approaches proposed for assessing an

organization's digital development makes it difficult to select a specific methodology for the real-world practice of economic entities. Systematization of existing research in this area has allowed us to identify challenges in their practical application, primarily the development of the necessary information support. At the same time, ICT implementation indicators in organizations are subject to state statistical observations and are published biennially in the collection of the National Statistical Committee of the Republic of Belarus "Information Society in the Republic of Belarus" based on a summary and grouping of indicators from respondents' statistical reporting in Form 6-IKT "Questionnaire on the Use of Digital Technologies in an Organization". Therefore, the objective of this study is to substantiate a methodological approach and develop tools for assessing the level of digital development of an organization based on official statistics on the use of information and communication technologies by economic entities. Tools for assessing the digital development of an organization have been developed: an assessment map and a scale for determining the organization's rating; a visualization of the assessment results has been proposed; and an algorithm for constructing a digital development assessment map in Microsoft Excel has been developed.

**Keywords:** digital development, information and communications technology, information support, digital development assessment chart, digital development rating scale.

**Article info:** received March 10, 2026.

## Введение

Развитие современной организации невозможно представить без цифровой трансформации, которая коснулась всех сфер ее деятельности, на чем акцентируют внимание многие исследователи: расширения внешнеэкономической деятельности, в которой активно применяется цифровая торговля [Бирюкова О.В., 2024]; появления большого количества специальностей, требующих профессионального применения цифровых технологий [Говорова Н.В., 2022; Тетеринец Т.А., 2023]; внедрения цифровых технологий в сферу деятельности менеджеров среднего звена [Багратиони К. и Тернер Т., 2023]; использования цифровых технологий в процессе всего цикла работы субъекта хозяйствования и во всех его сферах деятельности [Герасименко В.В. [и др.], 2023]. Исследуются также проблемы цифровизации и их влияние на современную экономику и экономические процессы, происходящие в обществе [Воронцовский А.В., 2020; Гурский В.Л., 2021].

Безусловную актуальность в связи с этим приобретает оценка уровня развития и внедрения информационно-коммуникационных технологий на корпоративном уровне, так как именно на уровне организаций и учреждений закладываются основы формирования национальной цифровой экономики. Как уже отмечалось ранее [Касаева Т.В., 2025] на сегодняшний день предложено множество методик оценки цифрового развития, цифровой зрелости, цифровой трансформации организации: [Бабкин А.В. и Пестова А.Ю., 2019; Головенчик Г.Г., 2023; Ивашко В.М. и Романова Е.С., 2023; Мерзлов И.Ю.

и др., 2020] и другие. Вместе с тем, детальное исследование предлагаемых методик и попытка применить их в условиях реального бизнеса позволяют сформулировать целый ряд проблем, которые могут возникать при их практическом применении.

Во-первых, это сложность выбора определенной методики для оценки достигнутого организацией цифрового развития. Авторы [Аленина К.А. и Курицына А.В., 2024] отмечают, что на сегодняшний день отсутствует единый подход к оценке уровня цифрового развития организации, поэтому для руководителей компаний, которые захотят самостоятельно провести данную оценку, может быть достаточно затруднено принятие решения по выбору модели.

Во-вторых, неоднозначность толкования предлагаемых показателей оценки и методов их количественного измерения. Так, ряд авторов [Бабкин А.В. и Пестова А.Ю., 2019; Архипова Л.И., 2021; Кулагин Н.А. и др., 2021; Головенчик Г.Г., 2023; Сорока Д.О. и др., 2023; Чурсин А.А. и Кокуйцева Т.В., 2022] в своих методиках упоминают такие показатели как: уровень цифровых компетенций менеджмента предприятия высшего и среднего уровня; цифровая компетентность; удельный вес персонала предприятия, обладающего цифровыми компетенциями; доля сотрудников, обладающих цифровыми навыками; человеческие ресурсы и др. Для того, чтобы данные показатели приобрели количественное измерение необходимо проводить дополнительные исследования, даже если речь идет о балльной оценке, которая присваивается респондентами или экспертами. Такая же пробле-

ма присуща характеристикам цифровизации бизнес-процессов: показателям цифровизации управленческих процессов, показателям применения технологий и системы отслеживания поставок, показателям организационных процессов и другим. Даже самый прозрачный показатель «уровень цифровизации документооборота» требует пояснения: если он оценивается в баллах, то кто их присваивает, если в процентах, то как определить: либо доля электронных документов, либо доля сотрудников, охваченных электронным документооборотом и т. д.

В-третьих, весьма дискуссионной является корректность применения традиционных показателей производственной и финансовой эффективности в оценке цифрового развития организации. Например, в своей работе авторы (Чурсин А.А. и Кокуйцева Т.В., 2022) в оценке цифровой зрелости используют такие показатели как: производительность труда; коэффициент обеспеченности оборотных активов собственными средствами; доля объемов договоров с внешними контрагентами, в которых предприятие является поставщиком или заказчиком. В основном перечисленные критерии характеризуют финансовую устойчивость организации или ее деловую активность. Эти показатели могут зависеть от уровня цифровизации бизнес-процессов, однако достаточно неоднозначным является их применение в качестве показателей цифровой зрелости.

В-четвертых, сложность расчета финансовых показателей, используемых в методиках оценки. Например, некоторые авторы в своих оценках используют показатели «чистая прибыль, полученная за счет использования цифровых активов», «годовой объем производства цифровыми активами». Необходимо отметить, что на сегодняшний день понятие «цифровые активы» объединяет: текстовые файлы, изображения, сайты, видео, фото, базы данных, электронную почту, токены, криптовалюту. Цифровые активы скорее способствуют автоматизации и ускорению бизнес-процессов организации. Наиболее измеряемым в данном случае может быть вклад веб-сайта, но при условии, что учет продаж будет организован таким образом, чтобы можно было точно определить не только сумму продаж, но и расходы по этим продажам, в том числе себестоимость продаж. То же самое касается показателей «рост объема продаж за счет использования цифровых инструментов», «доля доходов от реализации через цифровые каналы сбыта». Однако, рост продаж может быть обусловлен множеством факторов: сезонные колебания, изменение

спроса и т. д. Достаточно трудно определить какая часть роста достигнута непосредственно цифровыми инструментами.

В-пятых, дополнительные расходы, по экспертной оценке, и субъективность самооценки. С одной стороны, экспертная оценка подразумевает дополнительную оплату услуг, что в свою очередь увеличивает издержки организации, однако существует риск, что понесенные расходы не дадут отдачи в виде ожидаемого развития ИКТ. Нельзя исключать и тот факт, что не всегда эксперты обладают актуальными знаниями, касающимися отраслевой специфики бизнес-процессов. С другой стороны, привлечение в качестве респондентов персонала организации для получения и обобщения информации об уровне цифрового развития не всегда позволяет получить объективную оценку. Субъективизм, присущий самооценке, может существенно исказить реальную картину.

Обобщение перечисленных проблем позволяет сформулировать главный сдерживающий фактор в применении имеющихся методических разработок по оценке цифрового развития организации: отсутствие необходимого информационного обеспечения или невозможность формирования необходимой информационной базы из отчетности организаций. Ни одна из рассмотренных методик не основана на использовании показателей государственных статистических наблюдений по форме 6-икт «Анкета об использовании цифровых технологий в организации».

Таким образом, целью данного исследования явилось обоснование методического подхода и разработка инструментов оценки уровня цифрового развития организации на основе данных официальной статистики об использовании информационно-коммуникационных технологий экономическими субъектами.

#### **Материалы и методы исследования**

Теоретической базой исследования послужили научные труды белорусских, российских, а также зарубежных ученых в области оценки уровня цифровизации в организациях. Критический анализ и систематизация разработанных методик оценки уровня цифрового развития экономических субъектов позволили прийти к выводу об актуальности разработки инструментов оценки, основанных на уже имеющемся информационном обеспечении, т. е. на данных государственных статистических наблюдений.

Эмпирическую базу исследования составили показатели статистического сборника Национального статистического комитета Республики Беларусь «Информационное общество в Республике Беларусь» и статистической отчетности организаций по форме 6-икт «Анкета об использовании цифровых технологий в организации». Объектами исследования явились организации обрабатывающей промышленности Витебского региона.

Оценка имеющегося информационного обеспечения проводилась на основе сравнительного анализа содержания статистических группировок сборника и показателей формы 6-икт, что позволило определить наличие сопоставимых показателей на разных уровнях, обозначенных соответствующими цифрами (таблица 1):

- на уровне страны в целом (1);
- на уровне регионов (2);
- на уровне видов экономической деятельности (3);
- на корпоративном уровне (4).

Как видно из таблицы 1, располагая заполненной формой 6-икт и опубликованными данными сборника «Информационное общество в Республике Беларусь», организация имеет возможности в сравнении достигнутого ей уровня развития и внедрения информационно-коммуникационных технологий в целом со страной, с регионом (по более узкому кругу показателей), с видом экономической деятельности (круг показателей отраслевого сравнения в динамике претерпевает изменения в сторону расширения перечня показателей).

Методическую базу исследования определили общенаучные методы познания: анализа и синтеза, группировки, сравнения, дедукции и обобщения, принципы и методы системного подхода.

## Результаты исследования

Разработка инструментов сравнительной оценки основана на следующих положениях:

- с одной стороны, отдельные элементы ИКТ еще не нашли широкого распространения в стране (например, по данным официальной статистики за 2024 год используют Экстранет только 14,3 % организаций, технологию «Большие данные» – 13,7 %, технологию «Искусственный интеллект» – 5,8 %, технологию «Цифровой двойник» – только 0,5 % и т. д.), однако отдельные организации, как видим, их уже используют;

- с другой стороны, многие элементы ИКТ имеют широкое, а иногда практически повсеместное, внедрение (использование Интернета указывают 99,3 %

организаций, наличие веб-сайта – 71 %, электронное предоставление государственной статистической отчетности – 99,6 % и т. д.), в то же время некоторые экономические субъекты не отмечают у себя наличие таких технологий.

В связи с этим предложено построение карты оценки уровня развития ИКТ в организации с применением элементов визуализации, исходя из четырех возможных вариантов сравнительного анализа (таблица 2).

Долевое (процентное) соотношение цветов в карте оценки легло в основу разработки шкалы для определения рейтинга организации по уровню развития ИКТ. В результате обобщения опубликованных мнений исследователей, авторского мнения, а также сравнительного анализа количественных характеристик показателей статистического сборника и форм отчетности ряда организаций предложено выделение 5 уровней развития ИКТ в организации (таблица 3).

Для разработки шкалы оценки с целью отнесения организации в отдельную группу по уровню развития информационно-коммуникационных технологий проводился анализ сложившейся ситуации по стране в целом и по ряду экономических субъектов региона. В результате предлагается следующая шкала оценки с учетом цветовой визуализации показателей формы 6-икт.

Разработанные карта и шкала призваны сыграть двойную роль для организации:

- во-первых, определить уровень развития ИКТ по сравнению с другими экономическими субъектами страны (региона, вида экономической деятельности) и отнести себя в определенную группу (рейтинг);
- во-вторых, выявить проблемные зоны в цифровом развитии для определения первоочередных мер по повышению его уровня (в карте они обозначены красным цветом).

Апробация разработанных инструментов оценки проведена на примере двух организаций, относящихся к секции С «Обрабатывающая промышленность» классификатора видов экономической деятельности: организация 1 (условное обозначение) предоставила для апробации отчеты по форме 6-икт за 2020 и 2022 годы, организация 2 – за 2022 и 2024 годы. Приведем фрагменты карт оценки цифрового развития объектов исследования по отчетности 2022 г. (таблица 5).

Фрагменты приведенных карт позволяют сделать вывод об эффективности данного инструмента оценки для выявления первоочередных направлений деятель-

Таблица 1 – Сравнение информационного обеспечения оценки цифрового развития организаций на разных уровнях национальной экономики

Table 1 – Comparison of information support for assessing the digital development of organizations at different levels of the national economy

Показатели	Уровни экономики			
	(1)	(2)	(3)	(4)
1	2	3	4	5
Использование локальных вычислительных сетей	+	+	+	+
Использование Интернета	+	+	+	+
Использование Интранета	+			+
Использование Экстранета	+			+
Использование облачных сервисов	+	+	+	+
Наличие веб-сайта	+	+	+	+
Направления использования веб-сайта:				
- публикация каталогов товаров (работ, услуг) или прейскурантов	+			+
- отслеживание статуса заказов	+			+
- расчеты посредством электронной платежной системы	+			+
- публикация вакансий на рабочие места или прием резюме на работу	+			+
- другие цели	+			+
Направления использования облачных сервисов:				
- доступ к ПО, предоставляемому провайдером облачных сервисов	+			+
- размещение собственного ПО	+			+
- размещение баз данных, хранение файлов	+			+
- электронная почта	+			+
- другие цели	+			+
Максимальная скорость передачи данных через сеть Интернет	+		+	+
Вид подключения к сети Интернет:				
- стационарный широкополосный доступ	+	+		+
- беспроводной доступ	+	+		+
Цели использования сети Интернет:				
общего характера:				
- поиск информации	+	+		+
- отправка и получение электронной почты	+	+		+
- поиск персонала	+	+		+
- профессиональная подготовка персонала	+	+		+
- использование интернет-телефонии, проведение аудио- и видеоконференций	+	+		+
- подписка на доступ к электронным базам данных, электронным библиотекам	+	+		+
- осуществление банковских операций	+	+		+

Окончание таблицы 1 – Сравнение информационного обеспечения оценки цифрового развития организаций на разных уровнях национальной экономики





End of Table 1 – Comparison of information support for assessing the digital development of organizations at different levels of the national economy

1	2	3	4	5
- получение или оказание информационных услуг	+	+		+
- диалог в режиме реального времени (чат) и размещение объявлений	+	+		+
- получение доступа к другим финансовым услугам	+	+		+
- общение в социальных медиа (сетях)	+	+		+
- дистанционная работа	+	+		+
- получение информации о товарах (работах, услугах) с зарубежных маркетплейсов	+	+		+
для связи с поставщиками:				
- получение сведений о необходимых товарах (работах, услугах) и их поставщиках	+	+		+
- предоставление сведений о потребностях организации в товарах (работах, услугах)	+	+		+
- размещение заказов на необходимые организации товары (работы, услуги)	+	+		+
- оплата поставляемых товаров (работ, услуг)	+	+		+
- получение электронной продукции	+	+		+
для связи с потребителями:				
- предоставление сведений об организации, ее товарах (работах, услугах)	+	+		+
- получение заказов на выпускаемые организацией товары (работы, услуги)	+	+		+
- осуществление электронных расчетов с потребителями	+	+		+
- распространение электронной продукции	+	+		+
- послепродажное обслуживание	+	+		+
для взаимодействия с государственными органами (организациями):				
- получение информации о деятельности государственных органов (организаций)	+	+		+
- предоставление статотчетности, налоговых деклараций, таможенных и других документов	+	+		+
- получение государственных услуг в электронном виде	+	+		+
- участие в электронных аукционах на государственную закупку товаров (работ, услуг)	+	+		+
Использование технологии «Большие данные»	+		+	+
Использование технологии «Интернет вещей»	+		+	+
Использование технологии «Искусственный интеллект»	+		+	+
Использование технологии «RFID»	+		+	+
Использование технологии «Цифровой двойник»	+		+	+
Электронные продажи, закупки товаров (работ, услуг)	+	+		+

Источник: составлено авторами по данным статистической формы отчетности организации 6-икт «Анкета об использовании цифровых технологий в организации» и статистического сборника «Информационное общество в Республике Беларусь»: статистический сборник (2025). – URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/152/s1wig6m1gsy9lyd23eyki54t19m2lrz4.pdf> (дата обращения: 15.12.2025).

Таблица 2 – Варианты сравнительного анализа и их цветовое обозначение для построения карты оценки уровня развития ИКТ в организации

Table 2 – Comparative analysis options and their color coding for constructing a map for assessing the level of ICT development in an organization

Описание варианта	Цветовое обозначение
Организация внедрила элемент ИКТ, а по стране его внедрило менее 50 % общего количества организаций	
Организация внедрила элемент ИКТ и по стране его внедрило более 50 % общего количества организаций	
Организация не использует элемент ИКТ и по стране его внедрило менее 50 % общего количества организаций	
Организация не использует элемент ИКТ, а по стране его внедрило более 50 % общего количества организаций	

Источник: составлено авторами.


















Таблица 3 – Ранжирование коммерческих организаций по уровню развития ИКТ

Table 3 – Ranking of commercial organizations by level of ICT development

Уровень	Характеристика
Лидер	Организация активно внедряет все охватываемые статистическими наблюдениями элементы информационно-коммуникационных технологий, опережая большинство наблюдаемых экономических субъектов, в том числе активно внедряет прогрессивные элементы цифровой трансформации
Продвинутый	Организация характеризуется достаточно высоким уровнем цифрового развития. Несмотря на незначительное отсутствие распространённых в стране элементов информационно-коммуникационных технологий, организация имеет значительную долю ИКТ, которые пока не нашли широкого распространения в стране
Развивающийся	Организация находится на среднем уровне развития и внедрения информационно-коммуникационных технологий, демонстрируя при этом преимущественное наличие наиболее распространенных в стране их видов и демонстрируя достаточную активность во внедрении новых видов ИКТ
Отстающий	Организация демонстрирует невысокий уровень цифрового развития, так как у нее лишь частично внедрены технологии, которые применяются у большинства экономических субъектов страны. Организация имеет незначительную долю ИКТ, которые пока не нашли широкого распространения в стране
Критический	Организация характеризуется критическим уровнем цифрового развития, так как она не внедрила значительную часть распространенных в стране информационно-коммуникационных технологий. Организация не внедрила ни один из элементов ИКТ, которые не нашли широкого применения в стране

Источник: составлено авторами.

Таблица 4 – Шкала для оценки уровня цифрового развития организаций  
 Table 4 – Scale for assessing the level of digital development of organizations

Уровень развития ИКТ (рейтинг)	Распределение цветowych прямоугольников в карте оценки
Лидер	 ≥ 50 %  ≤ 50 %  < 10 %  отсутствует
Продвинутый	 < 50 %  > 50 %  ≤ 20 %  ≤ 5 %
Развивающийся	 ≤ 35 %  ≥ 45 %  ≤ 25 %  ≤ 10 %
Отстающий	 ≤ 10 %  < 50 %  ≤ 30 %  < 30 %
Критический	 отсутствует  < 50 %  ≤ 40 %  ≥ 30 %

Источник: составлено авторами.

ности организаций по повышению уровня цифрового развития:

– организации 1 необходимо ликвидировать свое отставание от других национальных субъектов хозяйствования, прежде всего, по таким видам информационно-коммуникационных технологий как публикация каталогов своих товаров на сайте организации, предоставление возможности дистанционной работы, предоставление сведений о необходимых товарах и услугах и других (они не представлены в таблице 5, так как приведена не вся карта оценки, а только ее часть);

– организация 2, лидируя по многим позициям карты, также может определить проблемные зоны своего цифрового развития, так как в отличие от большинства организаций она не применяет информационно-коммуникационные технологии для получения или оказания информационных услуг, для оплаты товаров и услуг (по приведенному фрагменту оценки).

Итоговая оценка цифрового развития, как уже отмечалось, предполагает определение процентного соотношения цветов в карте. Апробация разработанных инструментов в исследуемых организациях позволила получить следующие результаты (таблица 6).

Таким образом, в организации 1 отмечается переход с отстающего (в 2020 году) на развивающийся уровень (в 2022 году), что характеризует положительную динамику процессов внедрения информационно-коммуникационных технологий в практику работы организации.

Организация 2 демонстрирует стабильную положительную динамику использования цифровых технологий за исследуемый период, устойчиво находится в рейтинге «развивающийся уровень».

Аналогичная оценка была проведена по результатам сравнения цифрового развития исследуемых объектов и Витебской области (таблица 7).

Таблица 5 – Карта оценки цифрового развития объектов исследования в 2022 г. в сравнении с уровнем национальной экономики (фрагмент)

Table 5 – Map of the assessment of digital development of research objects in 2022 in comparison with the level of the national economy (fragment)

Показатель	Сложившийся уровень по стране (% организаций)*	Организация 1	Организация 2
1	2	3	4
Использование локальных вычислительных сетей	79,4		
Использование Интернета	98,8		
Использование Интранета	32,1		
Использование Экстранета	16,4		
Использование облачных сервисов	43,2		
...	...	...	...
Направления использования веб-сайта: - публикация каталогов товаров (работ, услуг) или прейскурантов	51,5		
- отслеживание статуса заказов	10,7		
- расчеты посредством электронной платежной системы	16,0		
- публикация вакансий на рабочие места или прием резюме на работу	33,7		
Направления использования облачных сервисов: - доступ к программному обеспечению, предоставляемому провайдером облачных сервисов	25,4		
- размещение собственного программного обеспечения	12,8		
- размещение баз данных, хранение файлов	25,1		
- электронная почта	33,1		
- другие цели	17,1		
...	...	...	...
Цели использования сети Интернет: - поиск информации	99,1		
- отправка и получение электронной почты	98,8		
- поиск персонала	73,0		
- профессиональная подготовка персонала	59,3		
- осуществление банковских операций	97,3		
- получение или оказание информационных услуг	78,8		
...	...	...	...

Окончание таблицы 5 – Карта оценки цифрового развития объектов исследования в 2022 г. в сравнении с уровнем национальной экономики (фрагмент)

End of Table 5 – Map of the assessment of digital development of research objects in 2022 in comparison with the level of the national economy (fragment)

1	2	3	4
- дистанционная работа	69,6		
- получение сведений о необходимых товарах (работах, услугах) и их поставщиках	87,6		
- предоставление сведений о потребностях организации в товарах (работах, услугах)	69,6		
- размещение заказов на необходимые организации товары (работы, услуги)	59,9		
- оплата поставляемых товаров (работ, услуг)	62,4		
...	...	...	...
- получение заказов на выпускаемые организацией товары (работы, услуги)	44,0		
- осуществление электронных расчетов с потребителями	40,2		
- послепродажное обслуживание	25,5		
- предоставление статотчетности, налоговых деклараций, таможенных и других документов	96,8		
- участие в электронных аукционах на государственную закупку товаров (работ, услуг)	41,8		
Электронные продажи товаров (работ, услуг):	35,6		
- с использованием специальных форм, размещенных на вебсайте или в Экстранете			
- с использованием системы автоматизированного обмена сообщениями (EDI)	16,5		
...	...	...	...

Источник: составлено авторами.

Примечание: \*сложившийся уровень по стране приведен в соответствии с данными сборника «Информационное общество в Республике Беларусь»: статистический сборник [2025]. – URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/152/s1wig6m1gsy9lyd23eyki54tl9m2lrz4.pdf> (дата обращения: 15.12.2025).

Абсолютная схожесть сравнительной оценки, на наш взгляд, обусловлена двумя причинами:

– во-первых, меньшим кругом сравниваемых показателей: если в национальном уровне их количество равно 51, то в региональном – 34. Более того в региональной сравнительной оценке не участвуют важные показатели цифровой трансформации: технология «Большие данные», технология «Искусственный интеллект», техноло-

гия «Цифровой двойник» и др.;

– во-вторых, развиваясь в рамках региона, организация объективно и субъективно повторяет особенности регионального развития.

В региональном сравнении у каждой организации выявлено по 2 позиции отставания: организация 1 – дистанционная работа, предоставление сведений о необходимых товарах (работах, услугах); организация 2 – по-

Таблица 6 – Результаты оценки уровня цифрового развития в исследуемых организациях  
 Table 6 – Results of the assessment of the level of digital development in the studied organizations

Организация	2020 г.	2022 г.	2024 г.
Организация 1	 отстающий	 развивающийся	-
Организация 2	-	 развивающийся	 развивающийся

Источник: составлено авторами.

Таблица 7 – Результаты оценки цифрового развития исследуемых организаций в сравнении с региональным уровнем  
 Table 7 – Results of the assessment of digital development of the studied organizations in comparison with the regional level

Организация 1	Организация 2
 развивающийся	 развивающийся

Источник: составлено авторами.

лучение или оказание информационных услуг, оплата поставляемых товаров (работ, услуг).

Безусловно, представляет интерес сравнение уровня развития ИКТ в организациях с цифровым развитием соответствующего вида деятельности. Это в наибольшей степени характеризует лидерство либо отставание организации, так как каждый вид деятельности имеет свои характерные особенности функционирования, накладывающие отпечаток в том числе и на возможности цифрового развития. Однако имеющееся информационное обеспечение позволяет это сравнение проводить только на уровне соответствующей секции и в период до 2024 года всего лишь по трем показателям: использование локальных вычислительных сетей, использование Интернета, использование облачных сервисов. В данном

сопоставлении теряет смысл построение карты оценки с цветовой визуализацией. Тем более, что обе исследуемые организации внедрили в практику работы данные элементы ИКТ

Расширение круга публикуемых показателей в группировках по видам экономической деятельности (по секциям) в 2024 году уже создает некоторые предпосылки для проведения сравнения цифрового развития организации с отраслевым уровнем. В данном исследовании такая возможность представилась только по организации 2.

Повышение степени однородности исследуемой совокупности, как и следовало ожидать, демонстрирует более равномерное распределение цветов в карте оценки и позволяет сделать вывод о достаточно актив-

Таблица 8 – Карта оценки цифрового развития организации 2 в сравнении с уровнем обрабатывающей промышленности в 2024 г.

Table 8 – Organization 2 digital development assessment map compared to the manufacturing industry level in 2024

Показатель	Сложившийся уровень по ВЭД (% организаций)	Организация 2
Использование локальных вычислительных сетей	94,3	
Использование Интернета	99,8	
Использование облачных сервисов	43,3	
Наличие веб-сайта	88,5	
Использование технологии «Большие данные»	20,5	
Использование технологии «Интернет вещей»	39,1	
Использование технологии «Искусственный интеллект»	6,6	
Использование технологии «RFID»	33,6	
Использование технологии «Цифровой двойник»	0,5	

Источник: составлено авторами.

Примечание: сложившийся уровень по ВЭД приведен в соответствии с данными сборника «Информационное общество в Республике Беларусь»: статистический сборник (2025). – URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/152/s1wig6m1gsy9lyd23eyki54tl9m2lrz4.pdf> (дата обращения: 15.12.2025).

ном внедрении ИКТ в данной организации. В качестве направлений цифрового развития в ближайшей перспективе организация должна обратить внимание на использование технологии «Большие данные» и технологии «Искусственный интеллект», сфера применения которых стремительно растет, чтобы в карте оценки не появился красный цвет.

Для снижения трудоемкости и повышения оперативности расчетов, связанных с применением предложенных инструментов, разработан алгоритм построения карты оценки цифрового развития коммерческих организаций в Microsoft Excel, который позволяет автоматически сравнивать данные и выводить соответствующий условиям цвет. Предложен также алгоритм автоматизации итоговой оценки уровня цифрового развития организации по разработанной шкале, что позволяет сделать обобщенный вывод и определить ее рейтинг по уровню развития и внедрения информационно-коммуникационных технологий.

**Выводы**

В современных условиях важное значение приобретает оценка уровня развития информационно-коммуникационных технологий в коммерческих организациях, так как именно на уровне организаций формируется

уровень и направления цифровой трансформации экономики страны в целом.

Сравнение уровня развития ИКТ, достигнутого экономическим субъектом, с национальным или региональным уровнем предоставляет возможность коммерческим организациям не только оценить степень интеграции ИКТ в функционирование ее бизнес-процессов, но и определить «пробелы» в цифровом развитии. Результаты такого сравнения могут стать основой формирования корпоративной политики и разработки программ внедрения и развития информационно-коммуникационных технологий.

Разработанные инструменты и методы оценки цифрового развития организации, в отличие от имеющихся, базируются на доступной информации: публикациях Национального статистического комитета Республики Беларусь и статистической отчетности экономического субъекта. Это означает, что они не требуют у субъекта хозяйствования дополнительных затрат, связанных с привлечением экспертов, равно как и дополнительных затрат по формированию информационного обеспечения для проведения оценки своего цифрового развития по разработанным ранее методикам.

Апробация разработанного подхода к анализу цифрового развития субъектов хозяйствования позволила продемонстрировать его целесообразность и эффективность для сравнительной оценки организаций с достигнутым национальным и региональным уровнем, но ограниченность возможности его применения в сравнении с отраслевым уровнем. По мнению авторов, в публикациях Национального статистического комитета необходимо расширить перечень показателей, характеризующих внедрение и развитие ИКТ на отраслевом уровне, что позволит экономическим субъектам сравнить себя с непосредственными конкурентами.

Процессы цифровизации на сегодняшний день охватывают все сферы жизнедеятельности коммерческих структур, в том числе они коснулись широкого распространения различных способов визуализации информации. Разработанный в Microsoft Excel алгоритм автоматизации построения карты оценки уровня развития ИКТ и определения рейтинга цифрового развития организации позволяет значительно ускорить процедуру оценки и обеспечить не только ее визуализацию, но и доступность для определенного круга лиц, в должностные обязанности которых должны быть включены позиции ответственности за развитие и внедрение ИКТ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Аленина, К.А. и Курицына, А.В. (2024). Разработка алгоритма оценки уровня цифровой зрелости компании. *Экономика, предпринимательство и право*, Т. 14, № 4, С. 1057–1078.

Архипова, Л.И. (2021). Оценка цифровой зрелости организации. *Управление информационными ресурсами: материалы XVII Международной научно-практической конференции*, С. 49–50.

Бабкин, А.В. и Пестова, А.Ю. (2019). Показатели для оценки уровня цифровизации промышленного предприятия. *Актуальные проблемы развития хозяйствующих субъектов, территорий и систем регионального и муниципального управления. Материалы XIV международной научно-практической конференции*, С. 38–41.

Бирюкова, О.В. (2024). Основные направления в переговорах и соглашениях по цифровой торговле. *Вестник международных организаций*, Т. 19, № 4, С. 23–39. DOI:10.17323/1996-7845-2024-04-02.

Воронцовский, А.В. (2020). Цифровизация экономики и ее влияние на экономическое развитие и общественное благосостояние. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, Т. 36, Вып. 2, С. 189–216.

Герасименко, В.В., Курбацкий, А.Н. и Куркова, Д.Н. (2023). Цифровизация рыночных взаимодействий российских предприятий. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, № 39 (4), С. 534–559. DOI:10.21638/spbu05.2023.404.

Говорова, Н.В. (2022). Занятость в ЕС: постиндустриальные вызовы и перспективы. *Современная Европа*, № 4, С. 148–159. DOI:10.31857/S0201708322040118.

Головенчик, Г.Г. (2023). Разработка методики оценки эффективности цифровой трансформации предприятия и отрасли в Республике Беларусь. *Белорусский экономический журнал*. № 1, С. 93–103. DOI:10.46782/1818-4510-2023-1-93-103.

Гурский, В.Л. (2021). Глобальные вызовы в современной экономике. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя гуманітарных навук*, Т. 66, № 4, С. 487–497. DOI:10.29235/2524-2369-2021-66-4-487-497.

Ивашко, В.М. и Романова, Е.С. (2023). Методический подход к оценке цифровой зрелости предприятия. *Вестник связи*, № 4, С. 45–50.

Касаева, Т.В. (2025). Оценка уровня развития информационно-коммуникационных технологий в организациях легкой промышленности. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 4 (54), С. 107–121. DOI:10.24412/2079-7958-2025-4-107-121.

Кулагин, Н.А., Лысенко, А.Н. и Мугутдинов, Р.М. (2021). Экспресс-оценка факторов цифрового развития для управления конкурентоспособностью промышленных предприятий. *Экономические науки*, № 203, С. 131–134.

Мерзлов, И.Ю., Шилова, Е.В., Санникова, Е.А. и Сединин, М.А. (2020). Комплексная методика оценки уровня цифровизации организаций. *Экономика, предпринимательство и право*, Т. 10, № 9, С. 2379–2396. DOI:10.18334/ep.10.9.110856.

Сорока, Д.О., Горкальцев, В.С. и Карлова, Т.В. (2023). Оценка уровня цифровой зрелости предприятия как один из важных факторов в цифровой трансформации. *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*, № 3 (21), С. 80–88.

Тетеринец, Т.А. (2023). Концептуальные направления рурализации человеческого капитала. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя гуманітарных навук*, Т. 68, № 4, С. 341–352. DOI:10.29235/2524-2369-2023-68-4-341-352.

Чурсин, А.А. и Кокуйцева, Т.В. (2022). Развитие методов оценки цифровой зрелости организации с учетом регионального аспекта. *Экономика региона*, Т. 18, Вып. 2, С. 450–463. DOI:10.17059/ekon.reg.2022-2-11.

Bagratiioni, K. and Thurner, T. (2023). Middle Management's Resistance to Digital Change. *Foresight and STI Governance*, no. 17 (2), pp. 49–60. DOI:10.17323/2500-2597.2023.249.60.

## REFERENCES

Alenina, K.A. and Kuritsyna, A.V. (2024). Development of an algorithm for assessing the level of digital maturity of a company [Razrabotka algoritma ocenki urovnya cifrovoj zrelosti kompanii]. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo = Economics, Entrepreneurship and Law*, vol. 14, no. 4, pp. 1057–1078 (In Russian).

Arkhipova, L.I. (2021). Assessing the Digital Maturity of an Organization [Ocenka cifrovoj zrelosti organizacii]. *Upravlenie informacionnym resursami: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Information Resource Management: Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference*, pp. 49–50 (In Russian).

Babkin, A.V. and Pestova, A.Yu. (2019). Indicators for Assessing the Level of Digitalization of an Industrial Enterprise [Pokazateli dlya ocenki urovnya cifrovizacii promyshlennogo predpriyatiya]. *Aktual'nye problemy razvitiya hozyajstvuyushchih sub"ektov, territorij i sistem regional'nogo i municipal'nogo upravleniya. Materialy HIV mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Actual Problems of Development of Economic Entities, Territories, and Systems of Regional and Municipal Governance. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference*, pp. 38–41 (In Russian).

Biryukova, O.V. (2024). Key Directions in Negotiations and Agreements on Digital Commerce [Osnovnye napravleniya v peregovorah i soglasheniyah po cifrovoj torgovle]. *Vestnik mezhdunarodnyh organizacij = Bulletin of International Organizations*, vol. 19, no. 4, pp. 23–39. DOI:10.17323/1996-7845-2024-04-02 (In Russian).

Vorontsovsky, A.V. (2020). Digitalization of the Economy and Its Impact on Economic Development and Public Welfare [Cifrovizaciya ekonomiki i ee vliyanie na ekonomicheskoe razvitie i obshchestvennoe blagosostoyanie]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika = Bulletin of St. Petersburg University. Economics*, vol. 36, iss. 2, pp. 189–216 (In Russian).

Gerasimenko, V.V., Kurbatsky, A.N. and Kurkova, D.N. (2023). Digitalization of Market Interactions of Russian Enterprises [Cifrovizaciya rynochnyh vzaimodejstvij rossijskih predpriyatij]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika = Bulletin of St. Petersburg University. Economics*, no. 39 (4), pp. 534–559. DOI:10.21638/spbu05.2023.404 (In Russian).

Govorova, N.V. (2022). Employment in the EU: Post-Industrial Challenges and Prospects [Zanyatost' v ES: postindustrial'nye vyzovy i perspektivy]. *Sovremennaya Evropa = Modern Europe*, no. 4, pp. 148–159. DOI:10.31857/S0201708322040118 (In Russian).

Golovenchik, G.G. (2023). Development of a Methodology for Assessing the Effectiveness of Digital Transformation of Enterprises and Industries in the Republic of Belarus [Razrabotka metodiki ocenki effektivnosti cifrovoj transformacii predpriyatiya i otrasli v Respublike Belarus']. *Belorusskij ekonomicheskij zhurnal = Belarusian Economic Journal*, no. 1, pp. 93–103. DOI:10.46782/1818-4510-2023-1-93-103 (In Russian).

Gursky, V.L. (2021). Global challenges in the modern economy [Global'nye vyzovy v sovremennoj ekonomike]. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya humanitarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Humanitarian Series*, vol. 66, no. 4, pp. 487–497. DOI:10.29235/2524-2369-2021-66-4-487-497 (In Russian).

Russian).

Ivashko, V.M. and Romanova, E.S. (2023). Methodological Approach to Assessing the Digital Maturity of an Enterprise [Metodicheskij podhod k ocenke cifrovoj zrelosti predpriyatiya]. *Vesnik svyazi = Communication Bulletin*, no. 4, pp. 45–50 (In Russian).

Kasayeva, T.V. (2025). Assessment of the level of ICT development in light industry organizations [Ocenka urovnya razvitiya informacionno-kommunikacionnyh tekhnologij v organizacijah legkoj promyshlennosti]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Vitebsk State Technological University*, no. 4 (54), pp. 107–121. DOI:10.24412/2079-7958-2025-4-107-121 (In Russian).

Kulagin, N.A., Lysenko, A.N. and Mugutdinov, R.M. (2021). Rapid assessment of digital development factors for managing the competitiveness of industrial enterprises [Ekspress-ocenka faktorov cifrovogo razvitiya dlya upravleniya konkurentosposobnost'yu promyshlennyh predpriyatij]. *Ekonomicheskie nauki = Economic Sciences*, no. 203, pp. 131–134 (In Russian).

Merzlov, I.Yu., Shilova, E.V., Sannikova, E.A. and Sedinin, M.A. (2020). A Comprehensive Methodology for Assessing the Level of Digitalization of Organizations [Kompleksnaya metodika ocenki urovnya cifrovizacii organizacij]. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo = Economics, Entrepreneurship, and Law*, vol. 10, no. 9, pp. 2379–2396. DOI:10.18334/epp.10.9.110856 (In Russian).

Soroka, D.O., Gorkal'tsev, V.S. and Karlova, T.V. (2023). Assessing the Level of Digital Maturity of an Enterprise as One of the Important Factors in Digital Transformation [Ocenka urovnya cifrovoj zrelosti predpriyatiya kak odin iz vaznyh faktorov v cifrovoj transformacii]. *Avtomatizaciya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii = Automation and Modeling in Design and Management*, no. 3 (21), pp. 80–88 (In Russian).

Teterinets, T.A. (2023). Conceptual directions of ruralization of human capital [Konceptual'nye napravleniya ruralizacii chelovecheskogo kapitala]. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia humanitarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Humanitarian Series*, vol. 68, no. 4, pp. 341–352. DOI:10.29235/2524-2369-2023-68-4-341-352 (In Russian).

Chursin, A.A. and Kokuytseva, T.V. (2022). Development of Methods for Assessing the Digital Maturity of an Organization Taking into Account the Regional Aspect [Razvitie metodov ocenki cifrovoj zrelosti organizacii s uchetom regional'nogo aspekta]. *Ekonomika regiona = Regional Economy*, vol. 18, iss. 2, pp. 450–463. DOI:10.17059/ekon.reg.2022-2-11 (In Russian).

Bagrationi, K. and Thurner, T. (2023). Middle Management's Resistance to Digital Change. *Foresight and STI Governance*, no 17 (2), pp. 49–60. DOI:10.17323/2500-2597.2023.2.49.60.

#### Информация об авторах

#### Information about the authors

##### Касаева Тамара Васильевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика и электронный бизнес», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.  
E-mail: kasaevatv@mail.ru

##### Жихар Юлия Юрьевна

Магистрант кафедры «Экономика и электронный бизнес», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.  
E-mail: yuliya.zhihar07@gmail.com

##### Tamara V. Kasayeva

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor at the Department "Economics and Electronic Business", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.  
E-mail: kasaevatv@mail.ru

##### Yulia Yu. Zhikhar

Master's Student at the Department "Economics and Electronic Business", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.  
E-mail: yuliya.zhihar07@gmail.com

## Оценка влияния конкурентоспособности рабочей силы на устойчивое развитие региона

Е. А. Алексеева,  
О. О. Шеремет

*Витебский государственный технологический университет,  
Республика Беларусь*

**Аннотация.** Целью исследования является оценка влияния конкурентоспособности рабочей силы на устойчивое развитие регионов Республики Беларусь, а также исследование механизмов и взаимосвязей между показателями конкурентоспособности персонала и параметрами устойчивого развития, отражающими достижение целей устойчивого развития (ЦУР) регионами Беларуси. В статье изучены предпосылки и механизмы влияния конкурентоспособности рабочей силы на показатели, характеризующие достижение целей устойчивого развития в экономической, социальной и экологической сферах. Для проведения исследования использованы исходные данные Платформы региональных данных по устойчивому развитию, разработанной Белстатом при поддержке Фонда ООН в области народонаселения (ЮНФПА), а также данные Национального статистического комитета Республики Беларусь в разрезе регионов за период 2020–2024 годы, преобразованные в панельные данные. Оценка влияния конкурентоспособности рабочей силы на устойчивое развитие региона проведена с использованием многофакторных моделей, позволяющих количественно оценить влияние различных факторов конкурентоспособности рабочей силы на экономическое, социальное и экологическое развитие региона. Проведенное исследование подтвердило взаимосвязь параметров конкурентоспособности рабочей силы и показателей достижения регионом целей устойчивого развития. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования инструментов достижения целей устойчивого развития, определенных Национальной стратегией устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года, а также Региональными стратегиями устойчивого развития на период до 2040 года для областей Беларуси.

**Ключевые слова:** конкурентоспособности рабочей силы, устойчивое развитие региона, качество рабочей силы, человеческий капитал.

**Информация о статье:** поступила 14 марта 2026 года.

## Assessment of the impact of labor force competitiveness on the sustainable development of a region

Alena A. Aliakseyeva,  
Olga O. Sheremet

*Vitebsk State Technological University,  
Republic of Belarus*

**Abstract.** The aim of the study is to assess the impact of labor force competitiveness on the sustainable development of the regions of the Republic of Belarus, as well as to investigate the mechanisms and relationships between personnel competitiveness indicators and sustainable development parameters reflecting the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs) by the regions of Belarus. The article examines the prerequisites and mechanisms of the influence of labor force competitiveness on the indicators characterizing the achievement of sustainable development goals in the economic, social and environmental spheres. The study used the initial data of the Regional Data Platform on Sustainable Development, developed by Belstat with the support of the United Nations Population Fund (UNFPA), as well as data from the National Statistical Committee of the Republic of Belarus by region for the period 2020–2024, converted into panel data. The impact of labor force competitiveness on the sustainable development of the region was assessed using multivariate models that allow for a quantitative assessment of the influence of various factors of labor force competitiveness on the economic, social and environmental development of the region. The study confirmed the relationship between the parameters of labor force competitiveness and the indicators of achieving the Sustainable Development Goals by the region. The results can be used to substantiate the tools for achieving the sustainable development goals defined by the National

Strategy for Sustainable Development of the Republic of Belarus for the period up to 2040, as well as the Regional Strategies for Sustainable Development for the period up to 2040 for the regions of Belarus.

**Keywords:** labor force competitiveness, sustainable regional development, labor force quality, human capital.

**Article info:** received March 14, 2026.

## Введение

Рабочая сила представляет собой совокупность ее качественных и ценовых характеристик, определяющих преимущественное ее использование на национальном и международном рынках труда в целях удовлетворения потребностей нанимателей в работниках определенной квалификации (профессии) [Боровик, 2002].

Вследствие высокой конкуренции на рынке труда, помимо набора необходимых физических, интеллектуальных, духовных и иных качеств, квалификации, работник должен отвечать требованиям работодателя, обеспечивать достижение целей предприятия и требуемую эффективность. Так, под конкурентоспособностью рабочей силы в целом понимается совокупность профессиональных и психологических качеств работников, которые выгодно отличают от других владельцев рабочей силы и позволяют выдерживать конкуренцию на рынке труда [Никоненко, 2016]. Она, как и конкурентоспособность работника, складывается из множества характеристик: здоровье; производительность труда; уровень образования и квалификации; профессиональная компетентность; опыт и стаж работы по специальности; адаптивность к изменяющимся условиям; стоимость рабочей силы; мобильность; способность к обучению; развитие цифровых компетенций и навыков и мн. др. [Литвиненко, 2021; Коробова & Пущева, 2023].

Понятие конкурентоспособности рабочей силы может рассматриваться на различных уровнях (отрасль, регион, национальная и мировая экономика). В случае мезо-уровня, конкурентоспособность рабочей силы региона определяется как совокупность качеств, обеспечивающих ее востребованность на региональном рынке труда, что оказывает влияние на экономический рост территории.

Целью исследования является оценка влияния конкурентоспособности рабочей силы на устойчивое развитие регионов Республики Беларусь, а также исследование механизмов и взаимосвязей между показателями конкурентоспособности персонала и параметрами устойчивого развития, отражающими достижение целей устойчивого развития (ЦУР) регионами

Республики Беларусь.

## Методы и средства исследований

Исследование понятия и факторов конкурентоспособности рабочей силы в контексте устойчивого развития экономики проведено на основе анализа литературных источников, их систематизации и сравнительного анализа. Оценка влияния конкурентоспособности рабочей силы на устойчивое развитие региона проведена с использованием многофакторных моделей, позволяющих количественно оценить влияние различных факторов конкурентоспособности рабочей силы на экономическое, социальное и экологическое развитие региона соответственно. Для проведения исследования использованы исходные данные Платформы региональных данных по устойчивому развитию, разработанной Белстатом при поддержке Фонда ООН в области народонаселения (ЮНФПА)<sup>1</sup>, а также данные Национального статистического комитета Республики Беларусь в разрезе регионов<sup>2</sup> за период 2020–2024 годы, преобразованные в панельные данные.

Математические модели строились с помощью метода наименьших квадратов (МНК) для нахождения оптимальных параметров функции, максимально точно описывающей наблюдаемые данные. С помощью МНК решается проблема поиска такой математической модели, которая наилучшим образом объясняет связь между переменными.

## Результаты исследований

В условиях высокой скорости технологического развития и цифровизации экономики единого общепринятого набора факторов конкурентоспособности рабочей силы и методологии ее расчета не существует. Они постоянно дополняются с учетом экономического развития, появления новых технологий, диверсификации персонала и высокой конкуренции на рынке труда

<sup>1</sup> <https://sdgregions.belstat.gov.by/?regionId=all>.

<sup>2</sup> Регионы Республики Беларусь. Социально-экономические показатели 2025 // Статистический сборник. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – 2025. – Том 1, Минск – URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/3f3/5x-vzuaprkxahc813whcc53fniit7yeuz.pdf>.

(Алексеева, 2022; Болдырева, 2023). На современном этапе важность качества рабочей силы усиливается такими факторами, как внедрение новой техники и технологий, инновационные процессы, усложняющие содержание и условия труда, возрастающая роль человека в развитии научно-технического прогресса. Так, по мнению М.В. Власова, в ближайшее десятилетие ввиду повсеместной цифровизации на рынке труда будут наиболее востребованы ресурсы с такими ключевыми компетенциями (навыками) как самообучение; управление вниманием и волевой сферой; системное, аналитическое и критическое мышление; грамотность работы с данными и информацией; математическая грамотность; систематизация и классификация; анализ и визуализация данных; управление проектами и организация процессов; построение алгоритмов и оптимизация систем (Власов, 2024).

Такие качества и компетенции при сравнении носителей рабочей силы с другими участниками рынка труда за счет предложения клиентам большей ценности, снижения цен, предоставления дополнительных преимуществ и сервиса становятся конкурентными преимуществами региона, обеспечивающими дальнейшее его экономическое развитие. Большинство ученых рассматривают такую составляющую рабочей силы как человеческий капитал основным источником устойчивого конкурентного преимущества. Человеческий капитал связан с процессами обучения, переподготовки и другими профессиональными инициативами, направленными на повышение уровня знаний, навыков, умений, ценностей и социальных активов сотрудника, что приводит к удовлетворенности сотрудника и повышению его результативности и, в конечном итоге, влияет на эффективность работы организации. Конкурентное преимущество, основанное на человеческом капитале, достигается за счет стратегических инвестиций в эти активы, привлечения и удержания сотрудников, управления талантами, а также программ обучения и развития, повышения квалификации, профессиональной переподготовки (Tshukudu, 2021). От качества и компетентности рабочей силы, ее конкурентоспособности, своевременной и качественной подготовки трудовых ресурсов зависит устойчивое развитие регионов и даже стран (Litvinenko & Kulkova, 2020). Состязательность регионов в обеспеченности рабочей силой, достижении лучших экономических результатов, основа которой за-

ложена рыночными отношениями хозяйствования, дает возможность рассматривать конкурентоспособность рабочей силы регионов как необходимое условие достижения лидерства региона.

Согласно Докладу о развитии человека, ПРООН, 1994 – устойчивое человеческое развитие представляет собой такое развитие, которое не только приводит к экономическому росту, но и к справедливому распределению его результатов, которое восстанавливает окружающую среду, а не уничтожает ее, повышает ответственность людей. Такое развитие – развитие для людей, для природы. Оно может быть также определено как стабильное социально-экономическое развитие, не разрушающее окружающую природную среду и обеспечивающее непрерывный прогресс общества (Мальцев, 2020).

Реализация принципов устойчивого развития невозможна без компетентной рабочей силы региона. Конкурентоспособные сотрудники способствуют повышению производительности, улучшению качества продукции или услуг, снижению издержек организаций, добросовестной конкурентной борьбе, ответственному использованию природных ресурсов и охране окружающей среды, обеспечивая экономический рост, укрепляя социальную стабильность и порождая «зеленое конкурентное преимущество». Инвестиции в образование и профессиональное развитие рабочей силы, повышение их мотивации, совершенствование условий труда, справедливые выплаты, социальные гарантии, приобщение к принципам социально-ориентированной и «зеленой» экономики являются инвестициями в устойчивое развитие региона (Захаров, Семенов & Трофимов, 2023). Таким образом, конкурентоспособность рабочей силы является важнейшим фактором конкурентоспособности экономики региона в целом, которая, в свою очередь, обуславливает лучшую реализацию принципов, задач и целей устойчивого развития. В Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года целью устойчивого регионального развития заявлено обеспечение сбалансированного социально-экономического развития территорий и сокращение разрыва по уровню и качеству жизни населения посредством устойчивого роста экономики и рационального размещения производительных сил, создания равных возможностей для реализации потенциала граждан, формирования комфортных условий жизнедеятельности

населения вне зависимости от места проживания<sup>3</sup>.

Зарубежные исследования на тему взаимосвязи параметров рабочей силы и устойчивого развития также демонстрируют высокий интерес к этой проблематике, а также подчеркивают, что достижение устойчивого экономического развития при одновременном обеспечении трудовой справедливости остается важнейшей задачей для политиков (Garmroudesfandiari & Baghersad, 2025).

В исследовании (Apostu, Gigauri & Blessinger, 2023) выявлены факторы, определяющие процесс урбанизации, а также его экономические, социальные и экологические последствия и давление на государственные органы с целью поиска жизнеспособных решений в контексте устойчивого развития. На основе регрессионного анализа выявлено, что основными факторами, способствующими урбанизации, являются рост населения, добавленная стоимость промышленности и женская рабочая сила. Исследователи приходят к выводу, что урбанизация – это цель, которую государственные органы развитых и развивающихся стран должны преследовать по-разному, учитывая различные реалии, с которыми они сталкиваются: рост населения в развивающихся странах и старение населения и международная миграция в развитых странах.

Согласно исследованию (Ying et al., 2025), повышение качества производительности труда положительно влияет на показатели ESG компаний и способствует экологическому переходу. Ключевыми каналами передачи являются повышение качества рабочей силы и смягчение финансовых ограничений. Человеческий капитал играет решающую роль в региональных инновациях и экономическом прогрессе, однако рост стоимости жилья в городах может отпугивать талантливых специалистов, вызывая утечку мозгов и препятствуя местным инновациям. В этой связи в Китае широко применяются программы жилищной поддержки высококвалифицированных кадров (ПВД), направленные на оказание помощи в обеспечении жильем высококвалифицированной рабочей силы (Jun, Ping & Min, 2024).

В статье (Xiaoayan, Daimin & Peng, 2026) в рамки исследования качества занятости вводятся новые качественные производительные силы (НКФС), которые по

результатам анализа повышают привлекательность рабочей силы в своих секторах за счет увеличения общей факторной производительности (ОВФП), тем самым увеличивая предельный объем производства на единицу труда. В условиях свободной мобильности рабочей силы и совершенной конкуренции происходит перемещение рабочей силы из традиционных секторов в сектора, где доминируют НКФС, что приводит к эволюции структуры занятости в сторону высокотехнологичных, высококвалифицированных и технологически ориентированных направлений. Это повышает общее качество занятости.

Изучение китайского опыта показывает, что новые качественные производительные силы, являющиеся основополагающим двигателем всестороннего продвижения китайской модернизации, обеспечивают решающую поддержку для выполнения ее важнейшего требования – достижения всеобщего процветания. Увеличение инвестиций в человеческий капитал имеет важное значение для усиления влияния новых качественных производительных сил на сокращение неравенства в доходах внутри предприятий (Yanfeng & Meiting, 2026).

Таким образом, эмпирические исследования поддерживают гипотезу о том, что параметры конкурентоспособности рабочей силы оказывают влияние на устойчивое региональное развитие. Далее в исследовании поднимается вопрос о количественной оценке влияния конкурентоспособности рабочей силы на устойчивое развитие регионов Беларуси.

#### **Оценка влияния конкурентоспособности рабочей силы на показатели устойчивого развития региона**

Для реализации данной задачи в работе использованы многофакторные модели, позволяющих количественно оценить влияние различных факторов конкурентоспособности рабочей силы на экономическое, социальное и экологическое развитие региона, отражающееся в достижении ЦУР.

В таблице 1 приведены показатели, которые были отобраны авторами для проверки гипотезы о взаимосвязи параметров конкурентоспособности рабочей силы и показателей достижения целей устойчивого развития.

В ходе оценки влияния выбранных факторов на результирующий показатель и построения модели из выборки были исключены независимые аргументы с низкой значимостью взаимосвязи с зависимой переменной, а остальным присвоены коэффициенты регрессии. Также в экономической и социальной моделях

<sup>3</sup> Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года // Министерство экономики Республики Беларусь – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-razvitija-respubliki-belarus-na-period-do-2040-goda.pdf>.

Таблица 1 – Переменные для оценки влияния конкурентоспособности рабочей силы на показатели устойчивого развития региона

Table 1 – Variables for assessing the impact of labor force competitiveness on regional sustainable development indicators

Зависимые переменные	Независимые переменные	Механизм влияния
Экономическое развитие региона		
Валовой региональный продукт (ВРП) на душу населения, руб. (показатель уровня экономического развития региона)	Доля занятых в области (регионе) в общей численности занятых в республике	Отражает трудовой потенциал региона и структуру занятости
	Отношение средней ЗП в регионе к средней по республике	Показатель качества трудовых ресурсов региона
	Удельный вес ВРП в ВВП страны	Показатель вклада региона в национальную экономику
	Инвестиции в основной капитал на 1 занятого, руб.	Отражает технический потенциал региона, фондовооруженность
	Затраты на НИОКР в регионе в расчете на 1 занятого, руб.	Отражает инвестиции в развитие инновационного потенциала региона
	Доля оборота внешней торговли товарами региона во внешнем обороте республики	Показатель экспортного потенциала рабочей силы региона на внешне рынке
Социальное развитие региона		
Среднедушевые денежные доходы населения, руб. в месяц (отражают уровень материального благосостояния населения региона)	Доля занятых в экономике в трудоспособном возрасте в численности населения в трудоспособном возрасте	Отражает уровень реализации трудового потенциала региона
	Обеспеченность населения жильем в расчете на одного жителя (м. кв.)	Фактор привлечения и удержания квалифицированных трудовых ресурсов
	Доля лиц в возрасте до 30 лет (включительно), окончивших учреждения образования в последние 3 года, квалификация которых соответствует выполняемой работе	Отражает качество профессиональной подготовки молодежи и эффективность системы образования
	Численность занятых в образовании и здравоохранении на 1 жителя	Отражает доступность социальных услуг уровень развития социальной инфраструктуры
	Ввод в эксплуатацию объектов социального назначения, руб.	Характеризует активность инфраструктурного и социального строительства, отражает инвестиции региона в развитие социальной сферы, создавая условия для повышения привлекательности региона для рабочей силы
	Среднемесячные инвестиции в основной капитал в расчете на 1 занятого, руб.	Отражает уровень капитальных вложений в экономику, направленных на обновление и улучшение условий труда, создание новых рабочих мест и развитие инфраструктуры

Окончание таблицы 1 – Переменные для оценки влияния конкурентоспособности рабочей силы на показатели устойчивого развития региона

End of table 1 – Variables for assessing the impact of labor force competitiveness on regional sustainable development indicators

Экологическая ситуация в регионе		
Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух в расчете на душу населения, в кг (показатель экологической нагрузки на регион в результате хозяйственной деятельности человека)	Текущие затраты на охрану окружающей среды в расчете на душу населения, руб.	Способствуют снижению экологической нагрузки на регион, улучшению условий труда, удержанию рабочей силы в регионе
	Инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды, в расчете на душу населения, руб.	Создают условия для снижения выбросов загрязняющих веществ в будущем, повышают экологическую привлекательность региона для рабочей силы
	Доля использованных отходов производства 1-3 классов опасности в общем объеме образовавшихся отходов производства 1-3 классов опасности	Показатель отражает снижение экологической нагрузки, улучшая качество жизни и привлекательность региона для рабочей силы
	Сбор (заготовка) вторичных материальных ресурсов в расчете на душу населения, кг.	Генерирует новые рабочие места (переработка ресурсов); улучшает «зеленые» навыки рабочей силы; способствует экономии ресурсов

Источник: составлено авторами.

с целью устранения смещенных оценок был исключен из рассмотрения г. Минск как регион, демонстрирующий сильную дифференциацию значений с другими регионами Беларуси.

#### Анализ полученных результатов

Ниже представлены результаты оценки влияния выбранных факторов на результирующий показатель, коэффициенты их значимости и коэффициенты корреляции (таблицы 2–4), и уравнения полученных многофакторных моделей [1–3].

Из шести показателей, выбранных в качестве независимых переменных для моделирования влияния факторов конкурентоспособности рабочей силы на экономическое развитие регионов, значимыми за исследуемый период времени оказались четыре фактора (таблица 2).

В соответствии с полученными коэффициентами, представленными в таблице 2, модель влияния факторов конкурентоспособности рабочей силы на экономическое развитие региона имеет следующий вид:

$$Y_{econ} = 75876,1 - 192345 \cdot X_1 - 85938,7 \cdot X_2 + 240418 \cdot X_3 + 1,68156 \cdot X_4, \quad [1]$$

где  $Y_{econ}$  – валовой региональный продукт на душу населения, руб.;  $X_1$  – доля занятых в области (регионе) в общей численности занятых в республике;  $X_2$  – отношение средней ЗП в регионе к средней по республике;  $X_3$  – удельный вес ВРП в ВВП страны;  $X_4$  – инвестиции в основной капитал на 1 занятого, руб.

Полученные коэффициенты регрессии, соответствующие каждому фактору, показывают взаимосвязь между изменением соответствующей независимой переменной  $X$  и зависимой переменной  $Y$  при прочих равных условиях.

Так, отрицательный коэффициент регрессии -192345 при коэффициенте  $X_1$ , выраженном в долях, говорит об обратной взаимосвязи ВРП на душу населения и доли численности занятых в регионе в общей численности занятых в республике. Другими словами, увеличение доли численности занятых в регионе по отношению к общей численности занятых на 1% приведет к сокращению ВРП на душу населения на 1923 руб. за счет перераспределения доходов среди населения и изменения структуры произведенного регионального продукта.

Таблица 2 – Результаты оценки влияния факторов конкурентоспособности рабочей силы на экономическое развитие регионов Беларуси

Table 2 – Results of the assessment of the influence of labor force competitiveness factors on the economic development of the regions of Belarus

Переменная	Коэффициент регрессии	p-value	Значимость
Свободный член (const)	75876,1	0,0014	***
Доля занятых в области (регионе) в общей численности занятых в республике ( $X_1$ )	-192345	7,79e <sup>-05</sup>	***
Отношение средней ЗП в регионе к средней по республике ( $X_2$ )	-85938,7	0,0087	***
Удельный вес производства в регионе в ВВП страны ( $X_3$ )	240418	0,0002	***
Инвестиции в основной капитал на 1 занятого, руб.	1,68156	4,13e <sup>-08</sup>	***

Источник: составлено авторами.

Рост доли средней ЗП в регионе в средней по республике на 1 % приводит к снижению ВРП на душу населения на 859, 4 руб.

Аргументу  $X_3$ , также выраженному в долях, соответствует коэффициент, равный 240418. Это говорит о том, что изменение доли производства в регионе во всем ВВП на 1 % (на 0,01), приводит к приросту результирующего показателя – валового регионального продукта на душу населения – на 2404,18 руб.

Увеличение инвестиций в основной капитал на 1 занятого на 1 руб. обеспечивает повышение ВРП на душу населения на 1,68 руб. за счет роста фондовооруженности и производительности труда.

Из шести показателей, выбранных в качестве независимых переменных для моделирования влияния факторов конкурентоспособности рабочей силы на социальное развитие регионов, значимыми за исследуемый период времени оказались лишь два фактора (таблица 3).

В соответствии с полученными коэффициентами, представленными в таблице 3, модель влияния факторов конкурентоспособности рабочей силы на социальное развитие региона имеет следующий вид:

$$Y_{soc} = -1226,16 + 18765,4 \cdot X_1 + 0,06755 \cdot X_2, \quad (2)$$

Таблица 3 – Результаты оценки влияния факторов конкурентоспособности рабочей силы на социальное развитие регионов Беларуси

Table 3 – Results of the assessment of the influence of labor force competitiveness factors on the social development of the regions of Belarus

Переменная	Коэффициент регрессии	p-value	Значимость
Свободный член (const)	-1226,16	0,0417	**
Численность занятых в образовании и здравоохранении на 1 жителя ( $X_1$ )	18765,4	0,0072	***
Среднемесячные инвестиции в основной капитал в расчете на 1 занятого, руб. ( $X_2$ )	0,06755	5,44e <sup>-011</sup>	***

Источник: составлено авторами.

где  $Y_{soc}$  – среднедушевые денежные доходы населения в месяц, руб.;  $X_1$  – численность занятых в образовании и здравоохранении на 1 жителя;  $X_2$  – среднемесячные инвестиции в основной капитал в расчете на 1 занятого, руб.

Таким образом, рост численности занятых в образовании и здравоохранении на 1 жителя на 1 % обеспечивает рост среднедушевых денежных доходов населения на 187,65 руб. Взаимосвязь переменной  $Y$  с данным фактором прямая и значимая.

Аргументу  $X_2$ , выраженному в рублях, соответствует коэффициент, равный 0,06755. Взаимосвязь переменной  $Y$  и данного фактора прямая и значимая. Это говорит о том, что прирост инвестиции в основной капитал в расчете на 1 занятого на 1 руб. приводит к увеличению результирующего показателя – среднедушевых денежных доходов – на 6,76 коп.

Из четырех показателей, выбранных в качестве независимых переменных для моделирования влияния факторов конкурентоспособности рабочей силы на экологическую ситуацию в регионе, значимым за исследуемый период времени оказался лишь один фактор (таблица 4).

В соответствии с полученными коэффициентами, представленными в таблице 4, модель влияния факторов конкурентоспособности рабочей силы на экологическое развитие региона имеет следующий вид:

$$Y_{ecol} = 827,853 - 742,102 \cdot X_1, \quad (3)$$

где  $Y_{ecol}$  – выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух в расчете на душу населения, кг.;  $X_1$  – доля использованных отходов производства 1–3 классов

опасности в общем объеме образовавшихся отходов производства 1–3 классов опасности.

Полученная однофакторная регрессионная модель выявляет статистически значимую связь между величиной экологической нагрузки региона и долей использованных отходов производства 1–3 классов опасности, увеличение которой на 1 % сопровождается снижением количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в расчете на душу населения на 7,42 кг.

#### Выводы

Таким образом, проведенное исследование подтвердило взаимосвязь параметров конкурентоспособности рабочей силы и показателей достижения регионами целей устойчивого развития. Конкурентоспособная рабочая сила обеспечивает внедрение новых технологий, оптимизацию бизнес-процессов и способность адаптироваться к меняющимся рыночным условиям с учетом требований экологической безопасности, что, в свою очередь, укрепляет социальную стабильность, стимулирует инновации, способствует росту производительности труда, конкурентоспособности и экономическому развитию регионов и создает основу для долгосрочного благополучия и устойчивого развития региона.

Полученные результаты могут быть использованы для обоснования инструментов достижения целей устойчивого развития, определенных Национальной стратегией устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года, а также Региональными стратегиями устойчивого развития на период до 2040 года для областей Республики Беларусь.

Таблица 4 – Результаты оценки влияния факторов конкурентоспособности рабочей силы на экологическую ситуацию в регионах Беларуси

Table 4 – Results of the assessment of the influence of labor force competitiveness factors on the environmental situation in the regions of Belarus

Переменная	Коэффициент регрессии	p-value	Значимость
Свободный член (const)	827,853	4,84e <sup>-07</sup>	***
Доля использованных отходов производства 1-3 классов опасности в общем объеме образовавшихся отходов производства 1-3 классов опасности (X1)	-742,102	1,62e <sup>-05</sup>	***

Источник: составлено авторами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Алексеева, Е.А. (2022). Конкурентоспособность персонала в легкой и текстильной промышленности Республики Беларусь в условиях цифровизации экономики. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2022, № 6 (390), с 17–22.

Болдырева, Н.П. (2023). Современные подходы и методы проведения оценки способности персонала организации осуществлять конкурентную борьбу на рынке. *Вестник евразийской науки*, 2023, Т 15, № 4.

Боровик, Л.С. (2002). Конкурентоспособность рабочей силы: методология анализа. *Белорусский экономический журнал*, 2002, № 4, с. 57–67.

Власов М.В. (2024). Анализ интеллектуально-цифрового капитала регионов России. *Вестник ЧелГУ*, 2024, № 11 (493), с. 59–69.

Коробова, Е.Н., Пущевая, Н.В. (2023). Методический подход к оценке конкурентоспособности персонала организации. *Вестник Магілеўскага дзяржаўнага ўніверсітэта ім. А.А. Куляшова, Серыя D, Эканоміка, сацыялогія, права*, 2023, № 2 (62), с. 26–33.

Литвиненко, М.С. (2021). Методический подход к оценке конкурентоспособности работников. *Экономика труда*, 2021, Т 8, № 4, с. 423–442.

Мальцев, А.А. (2020). Цифровизация экономики в контексте реализации целей устойчивого развития: обзор ключевых экспертных докладов 2019 г. *Вестник междунар. организаций: образование, наука, новая экономика*, 2020, Т 15, № 4, с. 189–195.

Никоненко, А.В. (2016). Маркетинговый подход к определению понятий «Конкурентоспособность рабочей силы» и «Конкурентоспособность персонала». *Экономика транспортного комплекса*, 2016, № 28, с. 30–41.

Apostu, S.A., Gigauri, I. and Blessinger, P. (2023). Exploring the relationship between the urbanization, higher education and female labor force with sustainable development. *Journal of Applied Research in Higher Education*, Volume 16, Issue 2, 11 April 2023, pp. 427–445.

Garmroudesfandiari, E., Baghersad, V. (2025). Analyzing sustainable economic development and labor justice compliance: A dual method approach with SEM and fsQCA. *Sustainable Futures*, Volume 10, December 2025, 101213.

Jun, Q., Ping, L. and Min, T. (2024). Do talent housing policies foster regional innovation? An analysis based on labor force heterogeneity. *Economic Analysis and Policy*, Volume 83, September 2024, pp. 150–164.

Litvinenko, M., Kulkova, I. (2020). Employees' competitiveness assessment during the skills development to improve the territories sustainability. *Web of Conferences*, 2020, Vol. 208, pp. 3–16.

Tshukudu, T.T. (2021). Human Capital as a Determinant of Organisational Competitiveness. *Administratio Publica*, 2021, Vol. 29, No 4, pp. 159–171.

Xiaoyan, S., Daimin, S. and Peng, W. (2026). The mechanism and effects of new quality productive forces driving the improvement of employment quality. *International Review of Economics & Finance*, Volume 107, April 2026, 105073.

Yanfeng, W., Meiting, W. (2026). How new quality productive forces affect income disparities within enterprises: a work tasks perspective. *International Review of Economics & Finance*, Volume 106, March 2026, 104847.

Ying, L., Jindong, W., Defang, M., Jiahui, D. and Ting, P. (2025). New quality productivity, labor quality and corporate high-quality green development. *Journal of Environmental Management*, Volume 395, December 2025, 128018.

REFERENCES

Aliakseyeva, A.A. (2022). Competitiveness of Personnel in the Light and Textile Industry of the Republic of Belarus in the Context of Economic Digitalization [Konkurentosposobnost' personala v legkoj i tekstil'noj promyshlennosti Respubliki Belarus' v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*, 2022, № 6 (390), с 17–22 [In Russian].

Boldyreva, N.P. (2023). Modern approaches and methods for assessing the ability of an organization's personnel to compete in the market [Sovremennyye podkhody i metody provedeniya otsenki sposobnosti personala organizatsii osushchestvlyat' konkurentnyuyu bor'bu na rynke]. *Vestnik evrazijskoj nauki = Bulletin of Eurasian Science*, 2023, T. 15, № 4 [In Russian].

Borovik, L.S. (2002). Competitiveness of the labor force: methodology of analysis [Konkurentosposobnost' rabochej sily: metodologiya analiza]. *Belorusskij ekonomicheskij zhurnal = Belarusian Economic Journal*, 2002, No. 4, pp. 57-67 [In Russian].

Vlasov M.V. (2024). Analysis of the intellectual and digital capital of Russian regions [Analiz intellektual'no-tsifrovogo kapitala regionov Rossii]. *Vestnik ChelGU = Bulletin of Chelyabinsk State University*, 2024, № 11 (493), c. 59-69 [In Russian].

Korobova, E.N., Pushchevaya, N.V. (2023). Methodological approach to assessing the competitiveness of the organization's personnel [Metodicheskij podkhod k otsenke konkurentosposobnosti personala organizatsii]. *Vestnik Magileuskaga dzyarzhavnaga universiteta im. A. A. Kulyashova, Seryya D, Ekanomika, satsyyalogiya, prava = Bulletin of the Mogilev State University named after A. A. Kuleshov, Series D, Economics, Sociology, Law*, 2023, № 2 (62), c. 26-33 [In Russian].

Litvinenko, M.S. (2021). A Methodological Approach to Assessing Employee Competitiveness [Metodicheskij podkhod k otsenke konkurentosposobnosti rabotnikov]. *Ekonomika truda = Labor Economics*, 2021, T. 8, № 4, c. 423-442 [In Russian].

Maltsev, A.A. (2020). Digitalization of the economy in the context of implementing sustainable development goals: a review of key expert reports of 2019 [Tsifrovizatsiya ekonomiki v kontekste realizatsii tselej ustojchivogo razvitiya: obzor klyuchevykh ekspertnykh dokladov 2019 g.]. *Vestnik mezhdunar. organizatsij: obrazovanie, nauka, novaya ekonomika = Bulletin of international organizations: education, science, new economy*, 2020, T. 15, № 4, c. 189-195 [In Russian].

Nikonenko, A.V. (2016). Marketing approach to defining the concepts of "Labor Competitiveness" and "Personnel Competitiveness" [Marketingovyj podkhod k opredeleniyu ponyatij «Konkurentosposobnost' rabochej sily» i «Konkurentosposobnost' personala»]. *Ekonomika transportnogo kompleksa = Transport Complex Economics*, 2016, № 28, c. 30-41 [In Russian].

Apostu, S.A., Gigauri, I. and Blessinger, P. (2023). Exploring the relationship between the urbanization, higher education and female labor force with sustainable development. *Journal of Applied Research in Higher Education*, Volume 16, Issue 2, 11 April 2023, pp. 427-445.

Garmroudesfandiari, E., Baghersad, V. (2025). Analyzing sustainable economic development and labor justice compliance: A dual method approach with SEM and fsQCA. *Sustainable Futures*, Volume 10, December 2025, 101213.

Jun, Q., Ping, L. and Min, T. (2024). Do talent housing policies foster regional innovation? An analysis based on labor force heterogeneity. *Economic Analysis and Policy*, Volume 83, September 2024, pp. 150-164.

Litvinenko, M., Kulkova, I. (2020). Employees' competitiveness assessment during the skills development to improve the territories sustainability. *Web of Conferences*, 2020, Vol. 208, pp. 3-16.

Tshukudu, T.T. (2021). Human Capital as a Determinant of Organisational Competitiveness. *Administratio Publica*, 2021, Vol. 29, No 4, pp. 159-171.

Xiaoyan, S., Daimin, S. and Peng, W. (2026). The mechanism and effects of new quality productive forces driving the improvement of employment quality. *International Review of Economics & Finance*, Volume 107, April 2026, 105073.

Yanfeng, W., Meiting, W. (2026). How new quality productive forces affect income disparities within enterprises: a work tasks perspective. *International Review of Economics & Finance*, Volume 106, March 2026, 104847.

Ying, L., Jindong, W., Defang, M., Jiahui, D. and Ting, P. (2025). New quality productivity, labor quality and corporate high-quality green development. *Journal of Environmental Management*, Volume 395, December 2025, 128018.

### Информация об авторах

### Information about the authors

#### **Алексеева Елена Анатольевна**

Кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры «Экономика и электронный бизнес», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: alekseeva@vstu.by

#### **Шермет Ольга Олеговна**

Магистрант кафедры «Экономика и электронный бизнес», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: olga3046104@mail.ru

#### **Alena A. Aliakseyeva**

Candidate of Sciences (in Economics), Associate Professor, Associate Professor at the Department "Economics and Electronic Business", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: alekseeva@vstu.by

#### **Olga O. Sheremet**

Master's Student at the Department "Economics and Electronic Business", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: olga3046104@mail.ru

1. Научно-технический журнал «Вестник Витебского государственного технологического университета» выходит четыре раза в год.

2. К печати допускаются статьи по трем тематическим направлениям:

I. **«Технология материалов и изделий текстильной и легкой промышленности»**, включающее статьи по технологии производства, материаловедению, товароведению, экспертизе и безопасности текстильных, швейных, обувных и кожевенно-галантерейных изделий.

II. **«Химическая технология»**, включающее статьи, в которых рассматриваются физико-химические основы химической технологии волокнистых материалов, технологии получения и переработки полимеров и композитов на их основе, оборудование химических производств, а также способы рационального использования материальных ресурсов в промышленности.

III. **«Экономика»**, содержащее статьи по исследованию экономических и бизнес-процессов в промышленности, включая интеграционные и кооперационные связи в рамках региональных объединений и межотраслевых структур.

3. В журнале публикуются статьи следующих видов:

- научная статья;
- обзорная статья;
- заметки редактора.

4. Рукописи, направляемые в журнал, должны являться оригинальным материалом, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

5. К рукописи статьи необходимо приложить следующие материалы:

- заявку с указанием названия статьи, тематического направления (из п. 2), к которому она подается, вида статьи (из п. 3), со списком авторов и их личными подписями. В заявке авторы должны гарантировать, что статьи не публиковались ранее в других изданиях в их нынешней или близкой по содержанию форме, не находятся на рассмотрении в редакциях других изданий и все возможные конфликты интересов, связанные с авторскими правами и опубликованием рассматриваемых статей, урегулированы. Также в заявке необходимо указать согласие авторов на размещение полного текста статьи в сети Интернет;

- аннотацию на русском языке объемом 150–250 слов. Аннотация призвана выполнять функцию независимого источника информации, должна быть информативной,

оригинальной, структурированной. В аннотации должна быть отражена актуальность темы исследования, постановка проблемы, цель и методы исследования, полученные результаты. В случае выполнения исследований в рамках финансируемых проектов или грантов после текста аннотации необходимо указать источник финансирования;

- перевод аннотации на английский язык;
- ключевые слова на русском и английском языках (5–8 слов или выражений);

- сопроводительное письмо от организации, где выполнялась работа, или выписка из протокола заседания кафедры (для авторов, являющихся сотрудниками ВГТУ);

- экспертное заключение о возможности опубликования представленных материалов в открытой печати;

- справку, содержащую сведения об авторах (место работы, должность, ученая степень, адрес, телефон, e-mail, идентификационный номер ORCID, если они имеются) – на русском и английском языках;

- электронный вариант всех материалов, кроме сопроводительного письма (выписки из протокола заседания кафедры) и экспертного заключения;

- подробный отчет о проверке рукописи статьи на наличие некорректных заимствований, выполненный с помощью одной из современных платформ. Рекомендуемые антиплагиат-платформы: Антиплагиат.эксперт, Антиплагиат.ВУЗ, Антиплагиат.ru, Руконтекст, Text.ru, eTXT, Advego Plagiatus, Content Watch, Antiplagiatus, PR-CY. Оригинальность текста (без реферата, списка использованных источников и сведений об авторах) – не менее 60 %.

6. Направляемые в редакцию журнала статьи должны иметь следующую структуру: индекс УДК; название статьи; фамилии и инициалы авторов; текст статьи; список использованных источников.

7. Статья должна содержать следующие разделы:

- введение, включающее обоснование актуальности рассматриваемой проблемы, характеристику состояния проблемы до начала ее изучения авторами со ссылками на источники информации, цель исследований;

- методы и средства исследований, в том числе, авторские методики, если они использовались при выполнении работы;

- результаты исследований;

- анализ полученных результатов с точки зрения их научной новизны и в сопоставлении с соответствующими известными данными и высказанными при поста-

новке задачи гипотезами;

– выводы.

Выводы не должны носить констатирующий характер и содержать сведения, отсутствующие в основном тексте статьи.

8. Оформление ссылок на используемые источники и их библиографического описания осуществляется в соответствии со стандартом Harvard (Harvard reference system) согласно отдельной инструкции.

9. Список использованных источников должен включать ссылки на актуальные научные публикации по теме статьи. Количество источников в научной статье включает не менее 15 наименований, в обзорной статье – не менее 30 наименований.

10. Не менее 50 % списка источников должны составлять ссылки на научные публикации, изданные в течение последних 10 лет. Излишнее самоцитирование не допускается. Количество ссылок на работы автора (соавторов) статьи не должно превышать 25 % от числа цитируемых научных публикаций.

11. Список должен содержать не менее 30 % источников в изданиях, включенных в ведущие международные наукометрические базы (Scopus, Web of Science).

12. В список источников не включаются стандарты, другие нормативные документы, методические рекомендации, статистические бюллетени, сайты ненаучного содержания. Ссылки на подобные источники оформляются в виде примечаний по тексту статей.

13. Оформление статьи должно удовлетворять следующим требованиям:

– статьи подаются на русском или английском языке;

– текст статьи, аннотации и ключевые слова набираются шрифтом Arial, 11 пт, с полями страницы (верхнее, нижнее, левое, правое) – 20 мм и одинарным межстрочным интервалом;

– страницы рукописи статьи должны быть пронумерованы;

– объем научной статьи без учета аннотации и списка использованных источников должен составлять от 20 000 до 40 000 печатных знаков (6–12 страниц); объем обзорной статьи – не менее 10 страниц;

– в файлах не должно быть макросов, колонтитулов и других сложных элементов форматирования за исключением нумерации страниц;

– исключается автоматическая или ручная расстановка переносов;

– формулы набираются в редакторе формул, совместимым с Microsoft Word, полужирным курсивом;

– таблицы располагаются после первого упоминания в тексте. При этом они не должны дублировать сведения, отображенные на графиках. Заголовки таблиц располагаются по центру страницы. Табличные данные – по центру или выравниваются по левому краю. Заливка не используется;

– иллюстрации располагаются после первого упоминания о них в тексте. Каждая иллюстрация должна иметь подрисуночную надпись (Arial, 10 пт). Графики и диаграммы представляются как рисунки, выполняются в графическом редакторе, совместимым с Microsoft Word. Фотографии должны иметь контрастное изображение;

– иллюстрации, графики, диаграммы, фотографии должны быть сохранены на электронном носителе каждый отдельным файлом в стандартах растровой графики и следующим форматом: JPEG; RAW; TIFF; BMP; PSD; PCX; PNG, разрешением не менее 300 dpi;

– в случае оформления графиков, диаграмм, схем и других иллюстрации с использованием программ Excel и PowerPoint авторы должны дополнительно представить исходные файлы электронных таблиц, презентаций и т. д.;

– иллюстрации, формулы, уравнения и сноски, встречающиеся в статье, должны быть пронумерованы в соответствии с порядком цитирования в тексте. Нумерация формул приводится арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю страницы;

– в случае представления статьи на русском языке необходимо дополнить подрисуночные надписи и названия таблиц переводом на английский язык;

– распечатка статьи должна полностью соответствовать приложенному файлу.

Рукописи, не соответствующие указанным требованиям, не принимаются.

14. Авторы статей несут ответственность за достоверность приводимых в статье данных и результатов исследований.

15. Редакция не взимает плату за опубликование научных статей.

16. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей, представленных лицами, осуществляющими послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство) в год завершения обучения.

17. Поступившие в редакцию статьи после предварительной экспертизы на соответствие предъявляемым требованиям направляются двум специалистам для проведения «слепого» рецензирования. Окончательное решение о публикации принимается на заседании редакционной коллегии с учетом результатов рецензирования.

Решение о публикации статьи, необходимости ее доработки или дополнительного рецензирования, а также об отказе в публикации принимается на заседании редколлегии после ее проверки на наличие некорректных заимствований Национальной библиотекой Беларуси и представления редактором тематического направления».

18. Отклоненные редколлегией рукописи статей авторам не возвращаются.

19. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения и сокращения в тексте статьи, аннотации, не искажающие основное содержание статьи. Сверстанные тексты статей до опубликования направляются авторам для согласования.

20. Статьи представляются в редакцию по адресу: 210038, Республика Беларусь, г. Витебск, Московский проспект, 72, Берашевич Ирине Васильевне. Электронный вариант материалов допускается направлять по электронной почте на адрес [vestnik@vstu.by](mailto:vestnik@vstu.by) ответственному секретарю редакционной коллегии Рыклину Дмитрию Борисовичу.

## ОФОРМЛЕНИЕ ССЫЛОК НА ИСТОЧНИКИ И СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Для цитирования информационных ресурсов рекомендуется использовать Гарвардский стиль оформления (Harvard).

Ссылка на источник приводится в скобках и состоит из фамилии автора на языке источника и года публикации (Smith, 2020).

Если цитируются несколько источников в одних круглых скобках, следует перечислить их в том же порядке, в котором они указаны в списке литературы, и использовать точку с запятой для их разделения (Johnson, 2015; Smith, 2014).

Цитата приводится в кавычках с указанием номера страницы "After that I lived like a young rajah in all the capitals of Europe..." (Fitzgerald, 2018, p. 43).

Если материал был создан несколькими лицами, их фамилии принято разделять союзом "and" (в русскоязычных источниках – союзом "и"). Два автора (Johnson and Williams, 2019). Три автора (Taylor, Fisher and Brown, 2014). Если авторами выступает более трех индивидов, то делается пометка et al. (Harrison et al., 2016).

Для различения авторов с одной фамилией применяются инициалы; для работ одного автора, опубликованных в одном году – латинская буквенная идентификация, например, (Ivanov, 2017a, 2017b).

Если авторы источника не указаны, используется название источника, помещенное в кавычки, и выделенное курсивом "Psychology of pressure" (2010).

### Список использованных источников

В соответствии с требованиями отечественных и международных баз данных, для обеспечения качественной и точной оценки цитируемости научных работ в рукописях необходимо приводить два списка источников:

### 1. Список источников на языке оригинала.

Библиографическое описание оформляется следующим образом (таблица 1).

При наличии в источнике четырех и более авторов необходимо перечислить всех авторов в библиографической записи. Пунктуация должна быть следующей: два автора, отделяются "and" без запятой; несколько авторов, разделяются запятыми, но последняя фамилия должна быть связана с предыдущей "and" без запятой. Ingram, T.N., Laforge, R.W., Schwepker, T.V. and Williams, M.R. (2007).

Источники одного и того же автора должны быть упорядочены по году публикации. Если в одном году опубликовано несколько произведений одного и того же автора, они располагаются в алфавитном порядке названий.

При наличии в описании источника электронного идентификатора DOI, он указывается в конце библиографического описания в списке источников.

### 2. Список с переводом на английский язык библиографических данных тех источников, которые издаются на других языках (References).

Если все источники изданы на английском языке, второй список не оформляется. Для русскоязычных источников в References в конце описания после указания диапазона страниц в круглых скобках указывается идентификатор языка первоисточника (In Russian).

Библиографическое описание оформляется следующим образом (таблица 2).

Библиографические данные в обоих списках нумеруются и располагается в алфавитном порядке по первой букве первого слова каждого источника (обычно это фамилия первого автора, если авторы не указаны,

Таблица 1

Статья в научном журнале	Фамилия, И.О. (год). Название статьи. <i>Название издания курсивом</i> , vol. номер тома, no. номер выпуска (если он есть), pp. номера страниц статьи.
Книга	Фамилия, И.О. (год). <i>Название курсив.</i> Город: издательство, страна.
Электронный ресурс	Автор (год), "Название статьи", [Online], полный URL, (дата обращения (Accessed, если источник на английском языке): дд.мм.гггг).

Таблица 2

Статья в научном журнале	Фамилия, И.О. (год). Перевод названия статьи на английский язык [Название в транслитерации]. <i>Название издания в транслитерации</i> = на английском языке курсивом, vol. номер тома, no. номер выпуска (если он есть), pp. номера страниц статьи (In Russian).
Книга	Фамилия, И.О. (год). <i>Название в транслитерации курсивом</i> [Название на английском языке]. Город: издательство, страна (In Russian).

то по названию). В начале списка перечисляются русскоязычные источники, затем иностранные. Список с переводом на английский язык оформляется с сохранением последовательности источников в списке на языке оригинала.

Библиографическое описание источников, включенных в международные наукометрические базы (Scopus, Web of Science), выделяются желтым цветом.

Подробные рекомендации по составлению списков литературы по стандарту Harvard представлены на сайте <https://www.emeraldgroupublishing.com/how-to/authoring-editing-reviewing/use-harvard-reference-system>.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ВЕСТНИК

ВИТЕБСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 (55)

Дизайн обложки Абрамович Н. А.

Дизайн и вёрстка издания Погорельская С. И.

Редактор издания Прокопюк А. С.

Подписано в печать 29.04.2026. Печать цифровая. Гарнитура Akrobat, Inter Tight.  
Усл. печ. листов 20,5. Уч.-изд. листов 18,9. Формат 60x90 1/8. Тираж 100 экз. Заказ № 327.

Свёрстано и подготовлено к печати издательским сектором Витебского государственного технологического университета 210038, Республика Беларусь, г. Витебск, Московский пр-т, 72.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.

Полиграфическое исполнение – Республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь»  
220004, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Кальварийская, 17.  
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014 года.

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь № 1235 от 8 февраля 2010 г.