

# НАУКА и ТЕХНИКА

Международный  
научно-технический журнал

Издается с января 2002 года  
Периодичность издания –  
один раз в два месяца

**Учредитель**  
Белорусский  
национальный технический  
университет



# Science and Technique

International  
Scientific and Technical Journal

Published from January 2002  
Publication frequency –  
bimonthly

**Founder**  
Belarusian  
National Technical  
University

**Vol. 21 / No 5 / 2022**

Журнал включен в базы данных:  
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,  
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:  
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,  
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

## СОДЕРЖАНИЕ

### Приборостроение

- Козерук А. С., Филонова М. И., Кузнецик В. О.,  
Шевченко В. П., Якубович Т. С.**  
Прогрессивная технология обработки  
оптических деталей . . . . . 361
- Гундина М. А., Жданович М. Н.**  
Автоматическая локализация номерного знака  
автомобиля в системе Wolfram Mathematica . . . . . 367

### Строительство

- Самуйлов Ю. Д., Тrepачко В. М.,  
Батяновский Э. И.**  
3D-бетонирование – составы, методики  
и свойства смесей . . . . . 374
- Давыдов Е. Ю.**  
Анализ нормативных документов  
по определению нагрузок  
на здания и сооружения . . . . . 386

## CONTENTS

### Instrumentation Engineering

- Kozeruk A. S., Filonova M. I., Kuznechik V. O.,  
Shevchenko V. P., Yakubovich T. S.**  
Progressive Technology  
for Processing Optical Parts . . . . . 361
- Hundzina M. A., Zhdanovich M. N.**  
Automatic Localization of License Plate  
for Car in Wolfram Mathematica . . . . . 367

### Civil and Industrial Engineering

- Samuilov Yu. D., Trepachko V. M.,  
Batyantovskiy E. I.**  
3D-Concreting – Compositions, Techniques  
and Properties of Mixtures . . . . . 374
- Davydov E. Yu.**  
Analysis of Regulatory Documents  
for Determining Loads  
for Buildings and Structures . . . . . 386

|                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Leonovich S. N., Sadovskaya E. A.</b><br>Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement<br>(Леонович С. Н., Садовская Е. А.<br>Нанофибробетон:<br>многоуровневое армирование) . . . . . | 392 |
| <b>Гуринович В. Ю.</b><br>Комплексное исследование развития<br>индустриального домостроения . . . . .                                                                                     | 397 |
| <b>Сизов В. Д., Павловская А. В.</b><br>Эффективная многослойная стеновая панель . . . . .                                                                                                | 410 |

## Энергетика

|                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Романиук Ф. А., Румянцев В. Ю.,<br/>Румянцев Ю. В.</b><br>Повышение устойчивости функционирования<br>измерительных органов тока<br>микропроцессорных защит . . . . . | 419 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## Экономика промышленности

|                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Ивуть Р. Б., Попов П. В., Лапковская П. И.,<br/>Меркулова О. П.</b><br>Методическое обеспечение оценки уровня<br>развития логистической инфраструктуры . . . . .                  | 426 |
| <b>Киселёва Н. А.</b><br>Особенности функционирования малого<br>и среднего предпринимательства<br>на современном этапе<br>экономического развития . . . . .                          | 436 |
| <b>Солодовников С. Ю., Сергиевич Т. В.</b><br>Направления совершенствования<br>бизнес-моделей промышленных предприятий<br>в Республике Беларусь<br>в условиях цифровизации . . . . . | 444 |

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Leonovich S. N., Sadovskaya E. A.</b><br>Nanofiber Concrete:<br>Multi-Level Reinforcement . . . . .    | 392 |
| <b>Gurinovich V. Yu.</b><br>Comprehensive Study of Development<br>of Prefabricated Construction . . . . . | 397 |
| <b>Sizov V. D., Pavlovskaya A. V.</b><br>Efficient Multi-Layer Wall Panel . . . . .                       | 410 |

## Power Engineering

|                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu.,<br/>Rumiantsev Yu. V.</b><br>Improving of Functioning<br>Stability of Current Measuring Elements<br>in Microprocessor Protections . . . . . | 419 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## Economy in Industry

|                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I.,<br/>Merkulova O. P.</b><br>Methodological Support for Assessing<br>Development Level of Logistics Infrastructure . . . . .                         | 426 |
| <b>Kisseleva N. A.</b><br>Peculiarities of Functioning of Small<br>and Medium-Sized Entrepreneurship<br>at the Modern Stage<br>of Economic Development . . . . .                                  | 436 |
| <b>Solodovnikov S. Y., Serhiyevich T. V.</b><br>Directions for Improving Business Models<br>of Industrial Enterprises<br>in the Republic of Belarus<br>in the Context of Digitalization . . . . . | 444 |

**Главный редактор**  
**Борис Михайлович Хрусталеv**

**Редакционная коллегия**

- Алексеев Ю. Г.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Белый А. В.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Бисби Л.** (Эдинбургский университет, Эдинбург, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии),
- Виттманн Ф. Х.** (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцарская Конфедерация),
- Дидерихс У.** (Ростокский университет, Росток, Федеративная Республика Германия),
- Дмитриев С. М.** (Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация),
- Згуровский М. З.** (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина),
- Кондерс А. Б.** (Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Федеративная Республика Германия),
- Косёр-Казберук М.** (Белостокский технический университет, Белосток, Республика Польша),
- Леонович С. Н.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Лю Тингуо** (компания «Гаююань», провинция Хэнань, Китайская Народная Республика),
- Макнами Р. Я.** (Консультационное агентство по вопросам пожарной безопасности, Стокгольм, Королевство Швеция),
- Максаров В. В.** (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
- Нгуен Тху Нга** (Научный энергетический институт, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- Одиназода Х. О.** (Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан),
- Опяляк М.** (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
- Пенязков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

**Editor-in-Chief**  
**Boris M. Khroustalev**

**Editorial Board**

- Aliakseyeu Yu. G.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Byeli A. V.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Bisby L.** (University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland),
- Wittmann F. H.** (ETH – Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich, Swiss Confederation),
- Diederichs U.** (University of Rostock, Rostock, Federal Republic of Germany),
- Dmitriev S. M.** (Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation),
- Zgurovsky M. Z.** (National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine),
- Koenders A. B.** (Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Federal Republic of Germany),
- Kosior-Kozberuk M.** (Bialystok University of Technology, Bialystok, Republic of Poland),
- Leonovich S. N.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Liu Tingguo** (Gaoyuan Company, Henan Province, People’s Republic of China),
- McNamee R. J.** (Brandskyddslaget AB, Stockholm, Kingdom of Sweden),
- Maksarov V. V.** (Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation),
- Nguyen Thu Nga** (Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
- Odinazoda H. O.** (Tajik Technical University named after Academic M. S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan),
- Opielak M.** (Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland),
- Penyazkov O. G.** (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

**Пимьента П.** (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),  
**Родригес Ж. П. К.** (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),  
**Романюк Ф. А.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
**Сидерис К.** (Фракийский университет имени Демокрита, Комотины, Греческая Республика),  
**Соболев К.** (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),  
**Сумров В. В.** (компания «Интернет Коммуникаций Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),  
**Феличетти Р.** (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),  
**Чжао Цзи** (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),  
**Чижик С. А.** (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),  
**Шелег В. К.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,  
**Ши Ли И** (Научно-технологический парк Шанхайского университета, Шанхай, Китайская Народная Республика),  
**Эберхардштайнер Й.** (Венский технический университет, Вена, Австрийская Республика),  
**Янковский А.** (Технологический институт ВВС, Варшава, Республика Польша)

Ответственный секретарь редакционной коллегии  
В. Г. Горбаш

**Pimienta P.** (Scientific and Technical Centre for the Building – CSTB Department, Saint-Martin-d'Hères, French Republic),  
**Rodrigues J. P. C.** (University of Coimbra, Coimbra, Portuguese Republic),  
**Romaniuk F. A.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
**Sideris K.** (Democritus University of Thrace, Komotini, Hellenic Republic),  
**Sobolev K.** (University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, United States of America),  
**Sumrov V. V.** (Internet Communication Development Group Ltd – ICD, Riga, Republic of Latvia),  
**Felicetti R.** (Polytechnic University of Milan, Milan, Italian Republic),  
**Zhao Ji** (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),  
**Chizhik S. A.** (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),  
**Sheleg V. K.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,  
**Shi Li Yi** (Science and Technology Park of Shanghai University, Shanghai, People's Republic of China),  
**Eberhardsteiner J.** (Vienna University of Technology, Vienna, Republic of Austria),  
**Jankowski A.** (Air Force Institute of Technology, Warsaw, Republic of Poland)

Executive Secretary of Editorial Board  
V. G. Gorbash

**Ведущий стилистический редактор**

В. Н. Гурьянчик

**Адрес редакции**

Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327  
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by

http://sat.bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

**ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622**

Подписано в печать 30.09.2022. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,75. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2022

**Leading Style Editor**

V. N. Guryanichyk

**Address**

Belarusian National Technical University  
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327  
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by

http://sat.bntu.by



<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-361-366>

УДК 681.7.023.72

## Прогрессивная технология обработки оптических деталей

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук<sup>1)</sup>,  
кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова<sup>1)</sup>, В. О. Кузнецик<sup>1)</sup>,  
студенты В. П. Шевченко<sup>1)</sup>, Т. С. Якубович<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Отмечены проблемы современной технологии обработки линз для оптических приборов, среди которых наибольшее влияние на качество деталей оказывает их температурная деформация в процессе блокировки наклеенной смолой. Обосновано, что данная проблема может быть решена с использованием технологии, позволяющей обрабатывать одновременно обе поверхности заготовки линзы при ее фиксации за нерабочую поверхность с помощью фотополимерной смолы, затвердевающей под воздействием ультрафиолетового излучения. Предложена схема устройства для реализации предлагаемой технологии обработки деталей с исполнительными сферическими поверхностями, в частности линз, при их вертикальной ориентации в зоне обработки, что улучшает распределение абразивной суспензии в процессе формообразования и тем самым способствует повышению интенсивности съема припуска. Выполнено математическое моделирование характера обработки сферических поверхностей деталей оптических приборов в условиях силового замыкания и получена формула для расчета путей трения в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. Использование этого выражения позволяет выявить оптимальные режимы формообразования линз, при которых обеспечиваются удовлетворительные их качество и уровень интенсивности съема припуска.

**Ключевые слова:** сферические поверхности, двустороннее формообразование, математическое моделирование, регулируемые режимы

**Для цитирования:** Прогрессивная технология обработки оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 361–366. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-361-366>

## Progressive Technology for Processing Optical Parts

A. S. Kozeruk<sup>1)</sup>, M. I. Filonova<sup>1)</sup>, V. O. Kuznechik<sup>1)</sup>, V. P. Shevchenko<sup>1)</sup>, T. S. Yakubovich<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The problems of modern technology for processing lenses for optical devices are noted. Among these problems, the temperature deformation in the process of blocking with adhesive resin has the greatest effect on the quality of parts. It is substantiated that this problem can be solved using a technology that allows simultaneously processing both surfaces

---

### Адрес для переписки

Козерук Альбин Степанович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 22,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-74-91  
kipp@bntu.by

### Address for correspondence

Kozeruk Albin S.  
Belarusian National Technical University  
22, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-74-91  
kipp@bntu.by

of the lens blank when it is fixed to the non-working surface using a photopolymer resin that hardens under the influence of ultraviolet radiation. A scheme of a device for implementing the proposed technology for processing parts with executive spherical surfaces, in particular lenses, with their vertical orientation in the processing zone, which improves the distribution of the abrasive suspension during shaping and thereby increases the intensity of stock removal, is proposed in the paper. Mathematical modeling of the nature of the processing of spherical surfaces of parts of optical devices under the conditions of a power circuit has been performed and a formula has been obtained for calculating the friction paths in the zone of contact between the tool and the surface to be machined. The use of this expression makes it possible to identify the optimal modes of lens shaping, which provide satisfactory quality and the level of intensity of stock removal.

**Keywords:** spherical surfaces, two-sided shaping, mathematical modeling, adjustable modes

**For citation:** Kozeruk A. S., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Shevchenko V. P., Yakubovich T. S. (2022) Progressive Technology for Processing Optical Parts. *Science and Technique*. 21 (5), 361–366. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-361-366> (in Russian)

## Введение

В настоящее время в оптической промышленности как ближнего, так и дальнего зарубежья используется технология односторонней обработки оптических деталей со сферическими поверхностями [1, 2]. Согласно этой технологии происходит последовательная обработка исполнительных поверхностей линзы при ее креплении поочередно за каждую из них. Крепление выполняют на наклейный инструмент с помощью смолы. При этом нагревают все три составляющие блока: заготовку линзы, смолу и наклейный инструмент. И поскольку температурные коэффициенты линейного расширения данных материалов отличаются между собой, в процессе остывания блока происходит деформация заготовки линзы. После обработки (шлифования и полирования) линзы и снятия ее с наклейного приспособления деформации в стекле релаксируют и достигнутая точность детали в блоке нарушается – деформируется интерференционная картина, возникающая в воздушном промежутке между обработанной и эталонной поверхностями [3, 4]. Для исправления дефекта назначают дополнительную операцию доводки, которую зачастую выполняют поштучно вручную: линзу удерживают в руке и перемещают ее по вращающемуся полировальному, закрепленному на шпинделе полировально-доводочного станка модели ПД [5]. Операция трудоемкая и требует высококвалифицированного исполнителя.

Отмеченные проблемы могут быть решены при использовании технологии одновременной двусторонней обработки линз, когда их закрепляют за боковую цилиндрическую по-

верхность [6, 7]. В таком случае для фиксации заготовки линзы можно применять не наклейную смолу, требующую нагрева, а фотополимерную, затвердевающую под воздействием ультрафиолетового излучения.

## Описание технологического оборудования

Для реализации технологии двусторонней обработки линз предлагается устройство, кинематическая схема которого приведена на рис. 1. В этом устройстве на шпинделе 1 базового станка закреплена планшайба 2, с верхней рабочей поверхностью которой во фрикционном взаимодействии находится колесо 3. На валу этого колеса закреплен основной ролик 4, а на стойке 5 – вспомогательные ролики 6 (по меньшей мере, два ролика). Между этими роликами находится обрабатываемая линза 7 с инструментами 8 и 9, которые через рычаги 10 и 11 поджимаются к линзе грузами 12 и 13. Грузы установлены на платформах 14 и 15, смонтированных на стойках 16 и 17, которые, в свою очередь, жестко соединены с нижним 18 и средним 19 рычагами соответственно. Эти рычаги установлены с возможностью вращения на осях 20, 21 и подвижно соединены с верхним рычагом 22 с помощью кронштейнов 23, 24 через ролики 25, 26.

При включении привода шпинделя вращательный момент планшайбы через колесо и основной ролик 4 вызывает вращение линзы, а возвратно-вращательное движение вала через соответствующие звенья преобразуется в колебательное движение инструментов по обрабатываемой поверхности линзы.

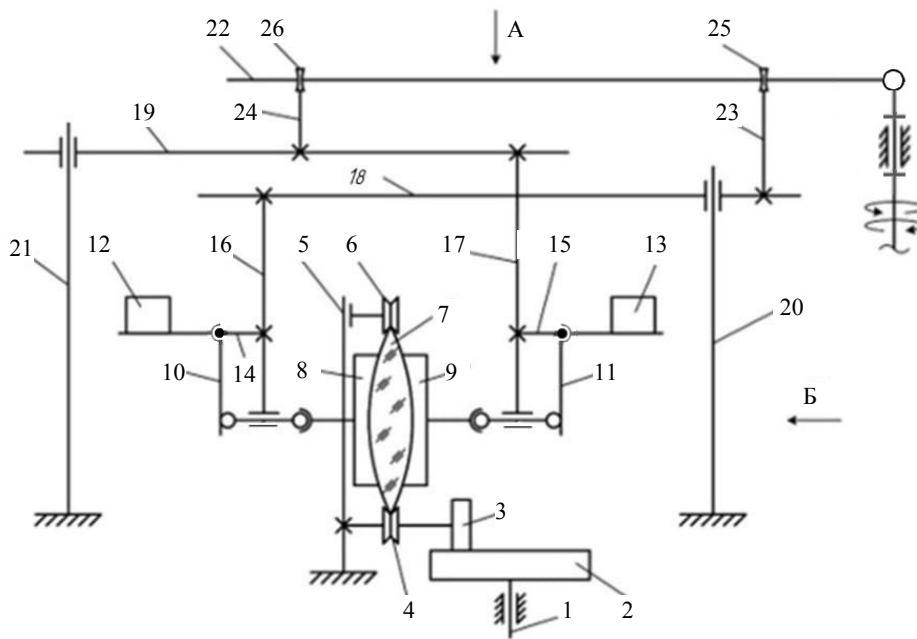


Рис. 1. Кинематическая схема устройства для двусторонней обработки линз

Fig. 1. Kinematic diagram of the device for two-sided processing lenses

## Математическое моделирование закономерностей съема припуска

В основе имитационного математического моделирования закономерностей съема припуска в условиях свободного притирания используется гипотеза Ф. Престона [8], согласно которой величина съема материала  $U$  с поверхности заготовки в течение времени  $T$  может быть рассчитана по формуле

$$U = k \int_0^T v p dt, \quad (1)$$

где  $k$  – технологический коэффициент, зависящий от марки стекла, состава и зернистости абразивного слоя в зазоре между инструментом и заготовкой, материала инструмента, температуры и влажности окружающей среды, других факторов;  $v$  – скорость скольжения инструмента относительно заготовки;  $p$  – давление в зоне соприкосновения инструмента и заготовки.

Скорость  $v$  представляет собой разность между линейными скоростями детали  $v_d$  и инструмента  $v_{\text{и}}$

$$\vec{v} = \vec{v}_\perp - \vec{v}_\parallel. \quad (2)$$

Скорость инструмента состоит из относительного  $v_0$  и переносного (колебательного)  $v_{\Pi}$  движений

$$\vec{v}_H = \vec{v}_0 - \vec{v}_H. \quad (3)$$

Рассмотрим пример обработки выпукло-вогнутой линзы по предлагаемой схеме (рис. 2).

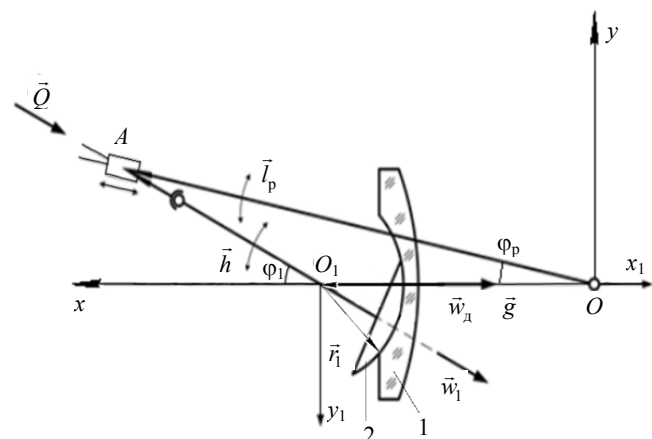


Рис. 2. Схема обработки выпукло-вогнутой поверхности линзы: 1 – линза; 2 – инструмент

Fig. 2. Scheme of processing convex-concave lens surface:  
1 – lens; 2 – tool

Векторы линейных скоростей, входящих в (2) и (3), для вогнутой поверхности радиусом кривизны  $r_1$  запишутся следующим образом:

$$\vec{v}_\perp = \vec{w}_\perp \vec{r}_\perp; \quad (4)$$

$$\vec{v}_0 = \vec{w}_1 \vec{r}_1; \quad (5)$$

$$\vec{v}_n = \vec{\Omega}_1 \vec{r}_1, \quad (6)$$

где  $w_d$ ,  $w_1$  – угловая скорость вращения детали и выпуклого инструмента соответственно;  $\Omega_1$  – угловая скорость возвратно-вращательно-го движения выпуклого инструмента (проходит через точку  $O_1$  перпендикулярно рисунку).

Аналогичным образом можно определить скорость скольжения для выпуклой поверхности линзы.

На рис. 3 приведена схема узла вращения детали.

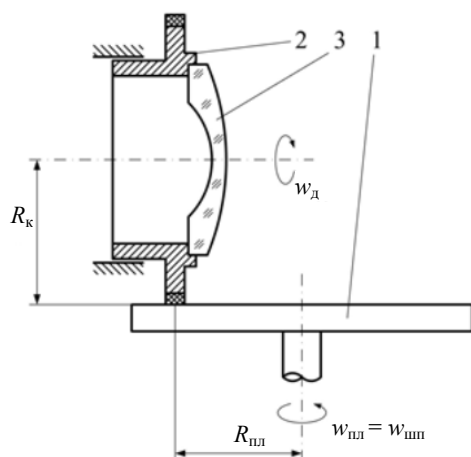


Рис. 3. Схема узла вращения детали:  
1 – планшайба; 2 – колесо; 3 – деталь

Fig. 3. Scheme of the part rotation unit:  
1 – faceplate; 2 – wheel; 3 – part

Проанализировав рис. 3, можно записать выражение для расчета угловой скорости детали

$$w_d = \frac{R_{пл}}{R_k} w_{пл}, \quad (7)$$

где  $R_{пл}$ ,  $w_{пл}$  – радиус и угловая скорость планшайбы;  $R_k$  – радиус колеса.

Одной из особенностей обработки линз по предлагаемой схеме является зависимость скоростей вращения инструментов от сил трения между притирающимися поверхностями. И поскольку эти силы определяются непрерывно изменяющимся размером зерен абразивной суспензии (они разрушаются в процессе обработки) и трением в поводке, т. е. являются переменными, то и скорости вращения инструментов будут непостоянными. На практике

принято считать, что они находятся в пределах 0,7–0,9 от скорости вращения детали.

Для определения аналитической связи скорости  $\vec{\Omega}_1$  с геометрическими параметрами рабочей зоны технологического оборудования обратимся к рис. 2, из которого следует, что

$$\vec{l}_p = \vec{g} + \vec{h}, \quad (8)$$

где  $l_p$ ,  $h$  – длина рычага и поводка технологического оборудования соответственно;  $g$  – расстояние между центром кривизны  $O_1$  вогнутой поверхности линзы и началом координат  $O$  прямоугольной системы координат  $Oxy$ .

Спроецировав уравнение (8) на оси  $x$  и  $y$ , получим:

$$\begin{cases} l_p \cos \varphi_p = g + h \cos \varphi_1; \\ l_p \sin \varphi_p = h \sin \varphi_1, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\varphi_p$ ,  $\varphi_1$  – угол отклонения рычага устройства и выпуклого инструмента от начального положения.

Если продифференцировать уравнения (9) по времени, а затем повернуть их против часовой стрелки на угол  $\varphi_p$ , получим выражение для скорости  $\Omega_1$  в виде

$$\dot{\varphi}_1 = \Omega_1 = \frac{\dot{\varphi}_p l_p}{h \cos(\varphi_1 - \varphi_p)}, \quad (10)$$

где, как следует из системы уравнений (9):

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{l_p \sin \varphi_p}{h}\right). \quad (11)$$

Для определения параметра  $l_p$  обратимся к рис. 2, согласно которому можно записать

$$h^2 = g^2 + l_p^2 - 2gl_p \cos \varphi_p. \quad (12)$$

Из (12) определим  $l_p$

$$l_p = g \cos \varphi_p + \sqrt{h^2 - g^2 \sin^2 \varphi_p}. \quad (13)$$

Аналитическое выражение для  $\varphi_p$  приведено в [9].

Изложенное позволяет получить координаты скоростей скольжения инструмента относительно детали:

$$\begin{aligned}
v_x &= (\Omega_1 Y_M - w_1 \sin \varphi_1 Z_M) \cos \Delta - \\
&\quad - (\Omega_1 Z_M + w_1 \sin \varphi_1 Y_M) \sin \Delta; \\
v_y &= (w_1 \cos \varphi_1 - w_d) \times \\
&\quad \times (Y_M \sin \Delta + Z_M \cos \Delta) - \Omega_1 X_M; \\
v_z &= w_1 \sin \varphi_1 X_M + (w_d - w_1 \cos \varphi_1) \times \\
&\quad \times (Y_M \cos \Delta - Z_M \sin \Delta),
\end{aligned} \quad (14)$$

где  $X_M$ ,  $Y_M$ ,  $Z_M$  – координаты произвольно выбранной (опорной) точки на обрабатываемой поверхности линзы, которые определяются по методике, приведенной в [10].

Учитывая систему уравнений (14), можно рассчитать скорость скольжения в опорной точке на поверхности детали по формуле

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}. \quad (15)$$

Используя (15), находили относительное значение путей трения инструмента по обрабатываемой поверхности детали  $\Delta l_{\text{отн}}$ . Этот параметр отождествляли с точностью обработки линзы по местным ошибкам  $\Delta N$ , которые представляют собой величину отклонения интерференционных колец Ньютона от правильной геометрической формы. При этом производительность обработки оценивали по времени  $t$ , в течение которого среднее значение путей трения  $l_{\text{ср}}$  в диаметральной сечении линзы до-

стигало заданной величины (в рассматриваемом случае 6 м).

Расчеты выполняли для вогнуто-выпуклой линзы диаметром 80 мм радиусами кривизны  $R_1 = 54,38$  мм (вогнутая поверхность) и  $R_2 = 164,68$  мм (выпуклая поверхность). В процессе расчетов управление формообразованием (регулирование характера распределения путей трения по обрабатываемой поверхности) осуществляли посредством изменения величин таких наладочных параметров технологического оборудования, как амплитуды колебательных движений инструмента по обрабатываемой поверхности  $A$ , скорости вращения детали  $w_d$  и кривошипа исполнительного механизма станка  $w_2$ .

Результаты расчета относительных значений путей трения  $\Delta l_{\text{отн}}$  и времени  $t$  представлены на рис. 4а, б. Согласно рис. 4а, наиболее высокой точности обработки можно достичь в случае небольших скоростей вращения кривошипа исполнительного механизма станка (до 25 об/мин) при любой скорости вращения детали в рассматриваемом диапазоне от 25 до 90 об/мин. В то же время не следует назначать режимы обработки, при которых  $w_d = w_2$ , поскольку в таком случае относительная погрешность достигает 100%-го значения, что свидетельствует об отсутствии контакта отдельных участков детали с рабочей поверхностью инструмента.

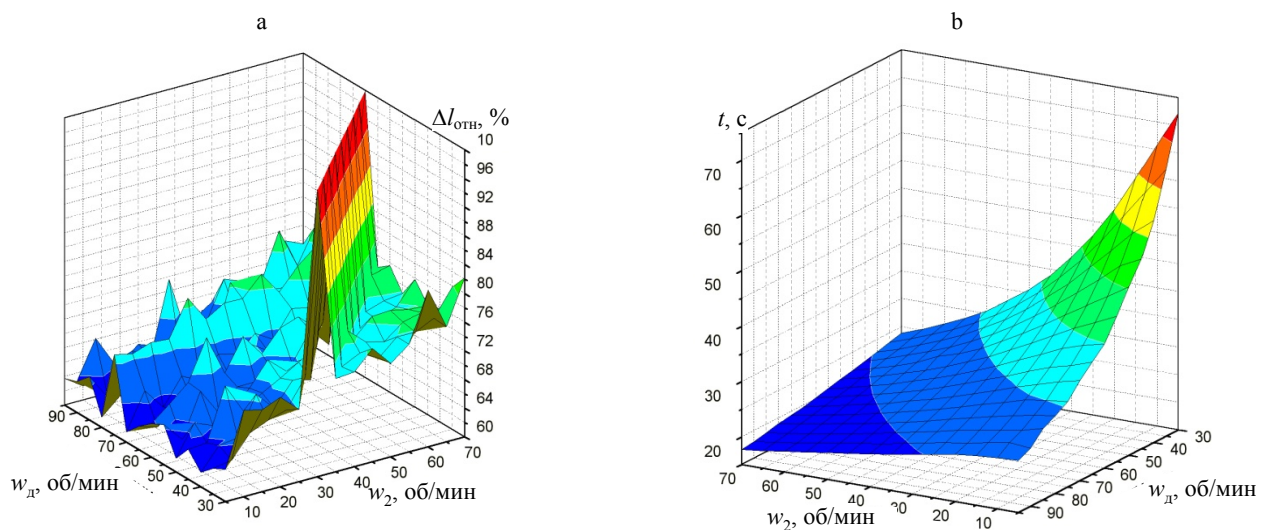


Рис. 4. Распределение относительных путей трения (а) и времени формообразования (б) от скоростей  $w_d$  и  $w_2$

Fig. 4. Distribution of relative friction paths (a) and shaping time (b) on velocities  $w_d$  and  $w_2$

Из рис. 4б видно, что если деталь вращать с небольшой скоростью (например, 35 об/мин), а скорость вращения кривошипа увеличивать, то время обработки уменьшается в 2,8 раза. И наоборот, при малом значении скорости  $w_2$  (например, 10 об/мин) с увеличением  $w_d$  время  $t$  также заметно уменьшается. Если же установить большое значение скорости  $w_2$  (например, 65 об/мин) и проводить изменение  $w_d$ , то  $t$  уменьшится только на 25 %. Аналогичная закономерность имеет место при фиксированном большом значении  $w_d$  (например, 85 об/мин) и изменяющейся скорости  $w_2$ .

## ВЫВОДЫ

1. При обработке линз целесообразно назначать минимально допустимую скорость вращения кривошипа технологического оборудования, а скорость вращения детали – максимально возможную. В таком случае обеспечиваются надлежащее качество обработки и приемлемый уровень интенсивности съема припуска.

2. Предложенная схема двусторонней обработки линз и математическое моделирование закономерностей съема припуска в условиях свободного притирания позволяют выявить оптимальные режимы формообразования сферических поверхностей оптических деталей, при которых обеспечиваются удовлетворительные качество линз и уровень интенсивности съема припуска.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
2. Schwiegerling J. Optical Specification, Fabrication, and Testing / J. Schwiegerling. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2014. <https://doi.org/10.1117/3.1002794>.
3. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель. М.: Машиностроение, 1985. 368 с.
4. Tyson, R. K. Introduction to Adaptive Optics / R. K. Tyson. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000. <https://doi.org/10.1117/3.358220>.
5. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1975. 315 с.
6. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на

основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.

7. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
8. Preston, E. W. The Theory and Design Flat Glass Polishing Machines / E. W. Preston // Journal of the Society Technology. 1927. No 11. P. 214–256.
9. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. Минск: ДизайнПРО, 1995. 208 с.
10. Исследование качества и производительности обработки высокоточных сферических поверхностей оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2009. № 2. С. 40–44.

Поступила 16.03.2022

Подписана в печать 24.05.2022

Опубликована онлайн 30.09.2022

## REFERENCES

1. Bardin A. N. (1963) *Optical Glass Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
2. Schwiegerling J. (2014) *Optical Specification, Fabrication, and Testing*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. <https://doi.org/10.1117/3.1002794>.
3. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel' S. K. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 368 (in Russian).
4. Tyson R. K. (2000) *Introduction to Adaptive Optics*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. <https://doi.org/10.1117/3.358220>.
5. Sulim A. V. (1975) *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 315 (in Russian).
6. Kozeruk A. S. (1997) *Control of Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices Based on Mathematical Modeling*. Minsk. 317 (in Russian).
7. Kozeruk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, VUZ-UNITI Publ. 176 (in Russian).
8. Preston E. W. (1927) The Theory and Design Flat Glass Polishing Machines. *Journal of the Society Technology*, (11), 214–256.
9. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeruk A. S. (1995) *Control of Shaping of Precision Surfaces of Machine and Devices*. Minsk, DizaynPRO Publ. 208 (in Russian).
10. Kozeruk A. S., Sukhotskii A. A., Klimovich V. F., Kuznechik V. O. (2009) Study of the Quality and Productivity of Processing High-Precision Spherical Surfaces of Optical Parts. *Vesti Natsiyanalnay Akademii Navuk Belarusi. Seriya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (2), 40–44 (in Russian).

Received: 16.03.2022

Accepted: 24.05.2022

Published online: 30.09.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-367-373>

УДК 004+681.2

## Автоматическая локализация номерного знака автомобиля в системе Wolfram Mathematica

Канд. физ.-мат. наук, доц. М. А. Гундина<sup>1)</sup>, М. Н. Жданович<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Отраслевая лаборатория новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Современные устройства формирования изображений позволяют решать комплекс технических прикладных задач, требующих синтеза и анализа компьютерных методов обработки с использованием пороговой бинаризации, классификации изображений, кластеризации, с применением машинного обучения для определения областей интереса. Так, алгоритмы сегментации нашли широкое использование в обработке медицинских снимков. Компьютерные технологии применяются для функционирования интеллектуальной среды, которая позволяет анализировать состояние здоровья человека. Развитие микроэлектроники дает возможность повысить сложность применяемых алгоритмов обработки изображений для решения прикладных задач инженерии. В литературе широко обсуждаются вопросы сегментации, распознавания образов, описания и представления деталей, морфологического анализа снимков, полученных промышленным оборудованием, например теории обработки оптического сигнала с учетом помех. Вопросы восприятия и анализа изображений подробно представлены в отечественной и зарубежной литературе. В статье описан разработанный алгоритм локализации номерного знака автомобиля, реализованный в системе Wolfram Mathematica. Вначале определяется область интереса, изолируется от остальной части изображения для последующей ее обработки. Реализуется представление изображения с помощью аффинного преобразования. Дальнейшая сегментация символов на номерной пластине позволяет их определить. В системе Mathematica разработан программный код алгоритма локализации номерного знака автомобиля для его дальнейшего распознавания. Решение задачи получено с помощью поэтапного применения встроенных и пользовательских функций системы Wolfram Mathematica. Алгоритм протестирован на репрезентативной выборке изображений. Погрешность в среднем не превышала 10 %, что соответствует современным алгоритмам обработки промышленных изображений. Полученный алгоритм идентификации номерного знака автомобиля может использоваться в цифровых устройствах для автоматического определения и дальнейшей обработки изображений.

**Ключевые слова:** обработка изображений, номерной знак, Wolfram Mathematica, бинаризация, идентификация, фильтрация

**Для цитирования:** Гундина, М. А. Автоматическая локализация номерного знака автомобиля в системе Wolfram Mathematica / М. А. Гундина, М. Н. Жданович // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 367–373. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-367-373>

## Automatic Localization of License Plate for Car in Wolfram Mathematica

М. А. Hundzina<sup>1)</sup>, М. Н. Zhdanovich<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Industry Laboratory of New Technologies and Materials JSC “INTEGRAL” – Management Company of “INTEGRAL” Holding (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Modern imaging devices make it possible to solve a complex of technical applied problems that require the synthesis and analysis of computer processing methods using threshold binarization, image classification, clustering, and the use of machine learning to determine areas of interest. Thus, segmentation algorithms are widely used for processing medical

### Адрес для переписки

Гундина Мария Анатольевна  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 22,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-67-84  
hundzina@bntu.by

### Address for correspondence

Hundzina Maryia A.  
Belarusian National Technical University  
22, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-67-84  
hundzina@bntu.by



images. Computer technologies are used for the functioning of the intellectual environment, which allows to analyze the state of human health. The development of microelectronics makes it possible to increase the complexity of the applied image processing algorithms used to solve applied engineering problems. The issues of segmentation, pattern recognition, description and presentation of details, morphological analysis of images obtained by industrial equipment are widely discussed in the literature. For example, theories of optical signal processing taking into account interference, issues of image perception and analysis are presented in detail in domestic and foreign literature. The paper describes the developed algorithm for localizing a car license plate, implemented in the Wolfram Mathematica system. First, the region of interest is determined, isolated from the rest of the image for its subsequent processing. An image representation is implemented using an affine transformation. Further segmentation of the characters on the license plate allows the characters to be identified. In the Mathematica system, a program code for the car license plate localization algorithm for its further recognition has been developed. The solution to the problem was obtained using the step-by-step application of the built-in and user-defined functions of the Wolfram Mathematica system. The algorithm has been tested on a representative sample of images. The average error did not exceed 10 %, which is in line with modern industrial image processing algorithms. The resulting car license plate identification algorithm can be used in digital devices to automatically determine and further image processing.

**Keywords:** image processing, license plate, Wolfram Mathematica, binarization, identification, filtering

**For citation:** Hundzina M. A., Zhdanovich M. N. (2022) Automatic Localization of License Plate for Car in Wolfram Mathematica. *Science and Technique*. 21 (5), 367–373. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-21-5-367-373> (in Russian)

## Введение

Алгоритмы идентификации номерного знака автомобиля широко используются в цифровых устройствах для автоматического определения и дальнейшей обработки полученных изображений. Такие алгоритмы обработки изображений обычно включают в себя несколько этапов. Для начала производится локализация области интереса на изображении, которая изолируется от остальной его части. После этого осуществляется представление изображения с помощью аффинного преобразования. Обычно аффинное преобразование определяют через три точки изображения, оно сопоставляет исходное наклонное изображение с ненаклонным изображением. Нахождение аффинного преобразования в системе Wolfram Mathematica может осуществляться с помощью функции *FindRegionTransform*. Оно дает возможность учесть угол поворота изображения номерного знака на снимке. Дальнейшая сегментация символов на номерной пластине позволяет их определить.

С помощью современных устройств формирования изображений можно решать комплекс технических и научных задач, требующих синтеза и анализа методов обработки с использованием пороговой бинаризации, классификации изображений, кластеризации, с применением машинного обучения [1–4]. Так, алгоритмы сегментации нашли широкое использование для обработки снимков, полученных медицинским оборудованием. Также компьютерные технологии применяются при разработке интеллектуальной среды, которая позволяет управлять состоянием здоровья граждан и по-

мочь специалистам здравоохранения в решении актуальных проблем [2]. Развитие микроэлектроники повышает сложность применяемых алгоритмов для решения прикладных задач. В литературе широко обсуждаются вопросы сегментации, распознавания образов, описания и представления деталей, морфологического анализа снимков, полученных промышленным оборудованием. Теории обработки оптического сигнала с учетом помех, вопросы восприятия и анализа изображений подробно представлены в отечественной и зарубежной литературе [3–9].

Автоматическая обработка статических и динамических изображений, содержащих номерной знак автомобиля, является актуальной задачей, поскольку может быть использована для автоматического открытия и закрытия шлагбаума, расчета оплаты парковки и решения других задач [10]. Предварительная обработка такого изображения направлена на улучшение и восстановление изображения. Этот процесс устраняет шум, выделяет края и улучшает общее качество изображения. При предварительной обработке полутоновое изображение проходит через множество процедур – таких, как масштабирование, расширение, эрозия, фильтрация и улучшение контуров [11, 12].

Устройства, использующие в работе подобные алгоритмы, в основном представляют собой программно-аппаратный комплекс. Эти устройства можно использовать во многих областях, таких как парковка [13], контроль безопасности в зонах ограниченного доступа [14], соблюдение правил дорожного движения [15, 16]. Типичный программно-аппарат-

ный комплекс состоит из четырех модулей, которые осуществляют получение изображения, извлечение номерного знака, сегментацию символов и их распознавание [17]. Эффективность и точность системы во многом зависят от второго модуля, и для этой цели используются различные подходы. Так, алгоритм с применением проекции и евклидова расстояния достигает 87 % по своей производительности [18], алгоритм с использованием вероятностной нейронной сети – 86 % [19]. Процедура с применением фильтрации и сопоставления с шаблоном показала, что производительность алгоритма может быть около 91 % [20]. Алгоритм, применяющий анализ краев и прямую нейронную сеть, достигает более 92 % в качестве скорости распознавания символов [21]. Создание комбинации этих алгоритмов и реализация в Wolfram Mathematica и определили цель исследований авторов: в компьютерной системе Wolfram Mathematica разработан алгоритм локализации номерного знака автомобиля для его дальнейшего распознавания, основанный на фильтрации и анализе краев на изображении.

### Методы исследования

Процесс распознавания автомобильных номеров делится на этапы:

1) предварительная обработка изображения. На этом этапе осуществляется улучшение изображения с помощью изменения формы его гистограммы, что позволяет ее выровнять. В частности, может быть использована эквализация гистограммы, при которой выходное изображение имеет равномерное распределение;

2) дилатация. Применение этой операции позволяет устранить тонкие выступы. Фильтр удаляет небольшие светлые детали на изображении, сохраняя общую яркость и яркость крупных деталей. Он сглаживает и удаляет шумы, а также помогает избавиться от маленьких фрагментов, выступающих наружу области вблизи ее границы. В основном данное преобразование используется для выравнивания неравномерной освещенности фона изображения. Полученное изображение вычитается из исходного полутонового изображения, что позволяет выделить символы и другие части;

3) бинаризация изображения. Количество информации в полученном бинарном изображении на порядок меньше, чем в совпадающем с ним по размерам полутоновом изображении.

Его легче обрабатывать и хранить. Применяя бинаризацию, необходимо помнить об ограничениях ее использования, а именно – о необходимости высокой степени контраста между изображением номерного знака и фоном снимка. Бинаризация позволяет кодировать информацию о силуэте объекта [7]. Для преобразования полутонового изображения в бинарное разработано большое число методов. Наиболее известные – методы, предложенные такими авторами, как Отсу, Гонсалес, Вудс и др. Подробный анализ особенностей каждого из подходов подробно описан в [22];

4) определение контуров на изображении. На этом этапе находится набор пикселей, которые проходят на границе между областями изображения;

5) морфологическая обработка, представляет собой серию операций обработки изображений на основе форм. К ним относятся дилатация, эрозия и др.;

6) непосредственная локализация номерного знака и отсечение фона изображения.

Рассмотрим реализацию каждого этапа в системе Wolfram Mathematica. Импорт изображения осуществляется с помощью встроенной функции *Import*. Результат работы этой функции запишем в переменную *img1*.

Для анализа характеристик изображения часто используется гистограмма. В условиях обычного и ровного освещения при правильно подобранной выдержке гистограмма изображения показывает максимум в центральной части, спадая в области теней и яркостей. Несмотря на то что большинство приборов в режиме автоматической экспозиции зафиксирует центрированную гистограмму, разброс пиков в гистограмме зависит также от тонального диапазона предмета съемки. Поэтому для произвольного изображения необходимо выравнивание гистограммы. Процедура ее выравнивания осуществляется с помощью следующей команды:

$$\text{img2} = \text{HistogramTransform}[\text{img1}].$$

Гистограмма – хороший инструмент контроля засветок, поскольку они непосредственно видны на границе диапазона. Она может также описать степень контраста в изображении. Контраст является измерением разницы яркостей между светлыми и темными частями изображения. Широкие гистограммы отражают сцены со значительным контрастом, тогда как узкие

гистограммы означают, что контраст снижен и изображение может оказаться плоским или малоинформативным. Это может быть вызвано любой комбинацией предметов съемки и условий освещения. Для последующей обработки необходима корректировка контраста для эффективной работы методов бинаризации. Выровненная гистограмма представлена на рис. 1.

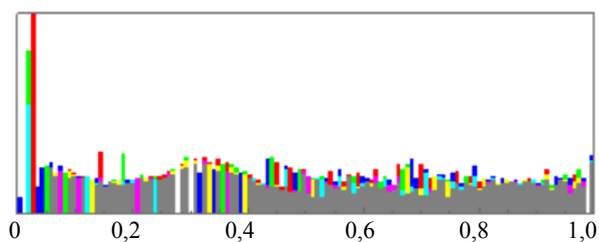


Рис. 1. Выровненная гистограмма

Fig. 1. Leveled histogram

Далее изображение преобразуется в полутоновое с помощью команды

```
img3 = ColorConvert[img2,"Grayscale"].
```

Удаление незначительных по величине компонентов осуществляется с помощью встроенной функции *DeleteSmallComponents*, которая заменяет значения пикселей малых связных компонентов на значения пикселей фона. Для выполнения операции размыкания изображения используется функция *Opening*. Результат операции представлен на рис. 2.



Рис. 2. Результат операции размыкания

Fig. 2. Result of opening operation

В качестве этого этапа предобработки к выделению границ вместо размыкания практически всегда применяется сглаживание изображения, обычно фильтром Гаусса, основанным на матрице свертки. Как правило, матрица заполняется по нормальному закону. Коэффициенты уже нормированы. От размера матрицы зависит сила размытия изображения.

Основное применение сглаживающих фильтров – шумоподавление. Поскольку шум меняется независимо от пикселя к пикселю, шумы соседних пикселей при суммировании будут компенсировать друг друга. Чем больше окно

фильтрации, тем меньше усредненная интенсивность шума, однако побочное действие таких фильтров – существенное размытие деталей изображения.

Широкое распространение в системах технического зрения роботов получили усредняющие и медианные фильтры. Медианный фильтр – один из видов цифровых фильтров, используемых в цифровой обработке сигналов и изображений для уменьшения уровня шума. Одномерный медианный фильтр представляет собой скользящее окно, охватывающее нечетное число элементов изображения. Центральный элемент заменяется медианой всех элементов изображения в окне. В случае четного числа отсчетов в окне выходное значение фильтра равно среднему значению двух отсчетов в середине упорядоченного списка. Окно перемещается вдоль фильтруемого сигнала, и вычисления повторяются. Медианная фильтрация – это эффективная процедура обработки сигналов, подверженных воздействию импульсных помех.

Возможны различные стратегии применения медианного фильтра для подавления шумов. Одна из них рекомендует начинать с медианного фильтра, окно которого охватывает три элемента изображения. Если ослабление сигнала незначительно, окно фильтра расширяют до пяти элементов. Так поступают до тех пор, пока медианная фильтрация начинает приносить больше вреда, чем пользы. Другая возможность состоит в осуществлении каскадной медианной фильтрации сигнала с использованием фиксированной или изменяемой ширины окна. В общем случае те области, которые остаются без изменения после однократной обработки фильтром, не меняются и после повторной обработки. Области, в которых длительность импульсных сигналов составляет менее половины ширины окна, будут подвергаться изменениям после каждого цикла обработки. Эти фильтры могут использоваться как однократно, так и многократно в различных комбинациях. Однако в ряде случаев применение данных способов не дает нужных результатов.

Следует заметить, что для качественного распознавания контуров изображения границы должны быть яркими (что имеет место при бинарном изображении), тонкими и без разрывов. Для получения контура после фильтрации изображения необходимо повысить его контрастность (перепады яркости).

Для бинаризации в системе Wolfram Mathematica используется функция *Binarize*, для медианной фильтрации – *MedianFilter*. Функция *ImageSubtract* позволяет найти разность двух изображений

```
img5 = MedianFilter[ImageSubtract[img3,img4]//
  Binarize,3].
```

Выделение границ основывается на алгоритмах, выделяющих точки цифрового изображения, в которых резко изменяется яркость или есть другие виды неоднородностей. Основной целью обнаружения резких изменений яркости изображения является фиксация важных перепадов и изменений. Они могут отражать различные предположения о модели формирования изображения, изменения в яркости изображения могут указывать на изменения глубины, на изменения в свойствах материала, различие в освещении сцены. Определение контуров осуществляется с помощью встроенной функции *ContourDetect*

```
img6 = ColorNegate[ContourDetect[img5//
  DeleteSmallComponents]].
```

Затем осуществляют несколько раз операции эрозии и дилатации

```
img7 = Binarize[Erosion[Dilation[Erosion
  [Dilation[Erosion[Dilation[img6,1],2],1],2],1],2]]].
```

Результат применения медианного фильтра к полученному изображению представлен на рис. 3

```
img8 = MedianFilter[img7,2]//
  DeleteSmallComponents.
```



Рис. 3. Компонент бинарного изображения, соответствующий расположению номерного знака

Fig. 3. Binary image component, corresponding to the location of the license plate

Определение координат прямоугольной области может осуществляться с помощью следующей команды:

```
ComponentMeasurements[img8,
  "BoundingBox"][[All,2]].
```

Данная команда позволяет представить координаты вершин прямоугольника в виде массива чисел.

### Результаты расчетов

Отображение области интереса осуществляется с помощью следующей команды:

```
Show[img1,Graphics[{Red,Opacity[.5],Rectangle
  #[[1]],#[[2]]}&/@ComponentMeasurements
  [img8,"BoundingBox"][[All,2]]}]].
```

Кроме этого, подсвечиваются границы прямоугольника, координаты вершин которого определяются автоматически с помощью функции *ComponentMeasurements* (рис. 4). Изображение на рис. 4 рассматриваем в качестве тестового, поэтому один из символов специально убран со снимка.



Рис. 4. Автоматически выделенная область интереса

Fig. 4. Auto-selected area of interest

Затем, зная координаты прямоугольной области, осуществляем обрезку фона. Результат показан на рис. 5:

```
img9 = ImageTake[img1, {ImageDimensions
  [img1][[2]]-ComponentMeasurements
  [img8,"BoundingBox"][[All,2]][[1]][[2,2]],
  ImageDimensions[img1][[2]]-Component
  Measurements[img8,"BoundingBox"]
  [[All,2]][[1]][[1,2]]}, {ComponentMeasurements
  [img8,"BoundingBox"][[All,2]][[1]][[1,1]],
  ComponentMeasurements[img8,"BoundingBox"]
  [[All,2]][[1]][[2,1]]}].
```

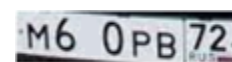


Рис. 5. Локализованная область с номерным знаком

Fig. 5. Localized area with license plate

Примеры обработанных изображений представлены на рис. 6.



Рис. 6. Примеры действия алгоритма идентификации номерного знака

Fig. 6. Examples of the operation of the license plate identification algorithm

В 95 % снимков из выборки возможно было определить местонахождение номера, из них в 40 % случаев наблюдалось точное совпадение, в 55 % – автоматически выделена область номера, но с незначительной погрешностью. В 5 % случаев номер не был определен по причине низкой контрастности снимка.

## ВЫВОД

Алгоритм идентификации номерного знака может быть использован в основе программно-аппаратного комплекса устройства для автоматического определения изображения. Устройство можно применять во многих областях – таких как парковка, контроль безопасности в зонах ограниченного доступа, соблюдение правил дорожного движения. По своей производительности предлагаемый алгоритм достигает 90 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Blanchet, G. Digital Signal and Image Processing Using Matlab / G. Blanchet, M. Charbit. London: Science Europe, 2006. 764 p. <https://doi.org/10.1002/9780470612385>.
2. Breton, V. The Healthgrid White Paper / V. Breton, K. Dean, T. Solomonides // Studies in Health Technology and Informatics. 2005. Vol. 112. P. 249–318.
3. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. СПб.: Лань, 2010. 704 с.
4. Селянкин, В. В. Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения / В. В. Селянкин, С. В. Скороход. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. 82 с.
5. Image Perception and Interpretation of Abnormalities; Can we Believe Our Eyes? Can we do Something about it? / D. E. Sabih [et al.] // Insights into Imaging. 2011. Vol. 1, No 2. P. 47–55. <https://doi.org/10.1007/s13244-010-0048-1>.
6. Liu, J. Aesthetic Perception of Visual Textures: a Holistic Exploration Using Texture Analysis, Psychological Experiment, and Perception Modeling / J. Liu, E. Lughofer, X. Zeng // Front Comput Neurosci. 2015. No 9. P. 1–14. <https://doi.org/10.3389/fncom.2015.00134>.
7. Gonzalez, R. C. Digital Image Processing / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002. 797 p.
8. Bribiesca, E. A Chain Code for Representing 3-D Curves / E. Bribiesca // Pattern Recog. 2000. Vol. 33, No 5. P. 755–765. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(99\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00093-X).
9. Рудаков, П. И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x / П. И. Рудаков, И. В. Сафонов. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. 416 с.
10. Weihua, W. License Plate Recognition Algorithm Based on Radial Basis Function Neural Networks / W. Weihua // Intelligent Ubiquitous Computing and Education, International Symposium. 2009. P. 38–41. <https://doi.org/10.1109/IUCE.2009.20>.
11. Patel, S. G. Vehicle License Plate Recognition Using Morphology and Neural Network / S. G. Patel // International Journal on Cybernetics & Informatics. 2013. Vol. 2, No 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.5121/ijci.2013.2101>.
12. Reshma, P. Noise Removal and Blob Detection Approach for Number Plate Identification / P. Reshma // International Journal of Computer Applications. 2012. Vol. 47, No 8. P. 13–16. <https://doi.org/10.5120/7207-9992>.
13. Vehicle Parking Inventory System Utilizing Image Recognition Through Artificial Neural Networks / L. S. Bartolome [et al.] // IEEE Region 10 Conference. 2012. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/tencon.2012.6412301>.
14. Draghici, S. A Neural Network Based Artificial Vision System for License Plate Recognition / S. Draghici // International Journal of Neural Systems. 1997. Vol. 8, No 1. P. 113–126. <https://doi.org/10.1142/S0129065797000148>.
15. License Plate Recognition from Still Images and Video Sequences: a Survey / C. N. E. Anagnostopoulos [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2008. Vol. 9, No 3. P. 377–391. <https://doi.org/10.1109/TITS.2008.922938>.
16. A Method for Identifying Specific Vehicles Using Template Matching / K. Yamaguchi [et al.] // Proceedings 199 IEEE/IEEE/ JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, 1999. P. 8–13. <https://doi.org/10.1109/ITSC.1999.821019>.
17. Lotufo, R. A. Automatic License Plate Recognition (ALPR) a State-of-the-Art Review / R. A. Lotufo,



- A. D. Morgan, A. S. Johnson // IEEE Transaction on Circuits and System for Video Technology. 2013. Vol. 23, No 2. P. 311–325. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2203741>.
18. Hegt, H. A. A High Performance License Plate Recognition System / H. A. Hegt, R. J. Dela Haye, N. A. Khan // SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1998. Vol. 5. P. 4357–4362. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1998.727533>.
  19. A License Plate-Recognition Algorithm for Intelligent Transportation System Applications / C. N. E. Anagnostopoulos [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2006. Vol. 7, No 3. P. 377–392. <https://doi.org/10.1109/TITS.2006.880641>.
  20. Optical Recognition of Motor Vehicle License Plates / P. Comelli [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1995. Vol. 44, No 4. P. 790–799. <https://doi.org/10.1109/25.467963>.
  21. Jiao, J. B. A Configurable Method for Multi-Style License Plate Recognition / J. B. Jiao, Q. X. Ye, Q. M. Huang // Pattern Recognition. 2009. Vol. 42, No 3. P. 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2008.08.016>.
  22. Горитов, А. Н. Предварительная обработка изображений в системах технического зрения / А. Н. Горитов // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21, № 4. С. 70–82.

Поступила 12.05.2022

Подписана в печать 14.07.2022

Опубликована онлайн 30.09.2022

## REFERENCES

1. Blanchet G., Charbit M. (2006) *Digital Signal and Image Processing Using Matlab*. London: Science Europe. 764. <https://doi.org/10.1002/9780470612385>.
2. Breton V., Dean K., Solomonides T. (2005) The Health-grid White Paper. *Studies in Health Technology and Informatics*, 112, 249–318.
3. Miroshnikov M. M. (2010) *Theoretical Foundations of Optoelectronic Devices*. Saint-Petersburg, Lan Publ. 704 (in Russian).
4. Selyankin V. V., Skorokhod S. V. (2015) *Image Analysis and Processing in Computer Vision Problems*. Taganrog, Publishing House of Southern Federal University. 82 (in Russian).
5. Sabih D. E., Sabih A., Sabih Q., Khan A. N. (2011) Image Perception and Interpretation of Abnormalities; Can we Believe Our Eyes? Can we do Something about it? *Insights into Imaging*, 2 (1), 47–55. <https://doi.org/10.1007/s13244-010-0048-1>.
6. Liu J., Lughofer E., Zeng X. (2015) Aesthetic Perception of Visual Textures: a Holistic Exploration Using Texture Analysis, Psychological Experiment, and Perception Modeling. *Front Comput Neurosci*, (9), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fncom.2015.00134>.
7. Gonzalez R. C., Woods R. E. (2002) *Digital Image Processing*. New Jersey, Prentice Hall, Upper Saddle River. 797 (in Russian).
8. Bribiesca E. (2000) A Chain Code for Representing 3-D Curves. *Pattern Recog*, 33 (5), 755–765. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(99\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00093-X).
9. Rudakov P. I., Safonov I. V. (2000) *Processing of Signals and Images. MATLAB 5.x*. Moscow, DIALOG-MEPHI Publ. 416 (in Russian).
10. Weihua W. (2009) License Plate Recognition Algorithm Based on Radial Basis Function Neural Networks. *Intelligent Ubiquitous Computing and Education, International Symposium*, 38–41. <https://doi.org/10.1109/IUCE.2009.20>.
11. Patel S. G. (2013) Vehicle License Plate Recognition Using Morphology and Neural Network. *International Journal on Cybernetics & Informatics*, 2 (1), 1–7. <https://doi.org/10.5121/ijci.2013.2101>.
12. Reshma P. (2012) Noise Removal and Blob Detection Approach for Number Plate Identification. *International Journal of Computer Applications*, 47 (8), 13–16. <https://doi.org/10.5120/7207-9992>.
13. Bartolome L. S., Bandala A. A., Llorente C., Dadios E. P. (2012) Vehicle Parking Inventory System Utilizing Image Recognition Through Artificial Neural Networks. *IEEE Region 10 Conference*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/tencon.2012.6412301>.
14. Draghici S. (1997) A Neural Network Based Artificial Vision System for License Plate Recognition. *International Journal of Neural Systems*, 8 (1), 113–126. <https://doi.org/10.1142/S0129065797000148>.
15. Anagnostopoulos C. N. E., Anagnostopoulos I. E., Psoroulas I. D., Loumos V., Kayafas E. (2008) License Plate Recognition from Still Images and Video Sequences: a Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9 (3), 377–391. <https://doi.org/10.1109/TITS.2008.922938>.
16. Yamaguchi K., Nagaya Y., Ueda K., Nemoto H., Nakagawa M. (1999) A Method for Identifying Specific Vehicles Using Template Matching. *Proceedings 199 IEEE/IEEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 8–13. <https://doi.org/10.1109/ITSC.1999.821019>.
17. Lotufo R. A., Morgan A. D., Johnson A. S. (2013) Automatic License Plate Recognition (ALPR) a State-of-the-Art Review. *IEEE Transaction on Circuits and System for Video Technology*, 23 (2), 311–325. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2203741>.
18. Hegt H. A., Dela Haye R. J., Khan N. A. (1998) A High Performance License Plate Recognition System. *SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 5, 4357–4362. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1998.727533>.
19. Anagnostopoulos C. N. E., Anagnostopoulos I. E., Loumos V., Kayafas E. (2006) A License Plate-Recognition Algorithm for Intelligent Transportation System Applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7 (3), 377–392. <https://doi.org/10.1109/TITS.2006.880641>.
20. Comelli P., Ferragina P., Granieri M. N., Stabile F. (1995) Optical Recognition of Motor Vehicle License Plates. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 44 (4), 790–799. <https://doi.org/10.1109/25.467963>.
21. Jiao J. B., Ye Q. X., Huang Q. M. (2009) A Configurable Method for Multi-Style License Plate Recognition. *Pattern Recognition*, 42 (3), 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2008.08.016>.
22. Goritov A. N. (2018) Preliminary Image Processing in Technical Vision Systems. *Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Sistem Upravleniya i Radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 21 (4), 70–82 (in Russian).

Received: 12.05.2022

Accepted: 14.07.2022

Published online: 30.09.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-374-385>

УДК 666.972.3

## 3D-бетонирование – составы, методики и свойства смесей

Магистр Ю. Д. Самуйлов<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. В. М. Тrepачко<sup>1)</sup>,  
докт. техн. наук, проф. Э. И. Батяновский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** В статье отражена проблематика технологии 3D-бетонирования, достаточно интенсивно развивающейся в современных условиях строительного производства. Важнейшим условием ее практической реализации является разработка составов бетонных смесей, обеспечивающих необходимые реологические (технологические) свойства для формирования изделий, элементов строительных конструкций или конструкции в целом, а также позволяющих сохранять требуемый темп ведения работ, физико-механические характеристики и свойства затвердевшего бетона. На начальном этапе исследований, выполненных в НИИЛ бетонов и строительных материалов Белорусского национального технического университета, разработан ряд составов бетонных смесей, предназначенных и обеспечивающих необходимые условия для реализации технологии 3D-бетонирования самонесущих и несущих конструктивных элементов соответственно при изготовлении изделий малых архитектурных форм и возведении (устройстве) строительных конструкций различного назначения. Разработана и реализована методология подбора рационального гранулометрического состава заполнителя, вида, свойств и количества связующего, химических и минеральных добавок, в совокупности обеспечивающих требуемые технологические свойства бетонных смесей после их затворения водой. Предложены и экспериментально обоснованы оригинальные методики оценки реологических свойств водозатворенных бетонных смесей и их изменений во времени, приводящих к росту пластической прочности отформованного бетона, а также методика расчета темпа ведения бетонных работ в зависимости от свойств используемых бетонных смесей. В результате созданы предпосылки как для дальнейшего расширения ряда составов сухих бетонных смесей с учетом их предназначения для 3D-бетонирования, так и для разработки методик и оценки физико-механических характеристик и свойств затвердевшего бетона с учетом предназначения изготавливаемых изделий и возводимых (устраиваемых) строительных конструкций.

**Ключевые слова:** сухая смесь, водозатворенная смесь, заполнитель, вяжущее, добавки, методики, свойства, 3D-бетонирование

**Для цитирования:** Самуйлов, Ю. Д. 3D-бетонирование – составы, методики и свойства смесей / Ю. Д. Самуйлов, В. М. Тrepачко, Э. И. Батяновский // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 374–385. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-374-385>

## 3D-Concreting – Compositions, Techniques and Properties of Mixtures

Yu. D. Samuilov<sup>1)</sup>, V. M. Trepachko<sup>1)</sup>, E. I. Batyanovskiy<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper reflects the problems of 3D-concreting technology, which is developing quite intensively in modern conditions of construction production. The most important condition for its practical implementation is the development of concrete mixture compositions that provide the necessary rheological (technological) properties for formation of products,

---

### Адрес для переписки

Батяновский Эдуард Иванович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-96-73  
batyanovskij@bntu.by

---

### Address for correspondence

Batyanovskiy Eduard I.  
Belarusian National Technical University  
12, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-96-73  
batyanovskij@bntu.by

elements of building structures or the structure as a whole, as well as providing the required pace of work and physical and mechanical characteristics and properties of the hardened concrete. At the initial stage of research carried out in the Research and Testing Laboratory of Concrete and Building Materials of the Belarusian National Technical University a number of concrete mixtures compositions were developed that are designed and provide the necessary conditions for the implementation of 3D-concreting of self-supporting and load-bearing structural elements respectively, in the manufacture of products of small architectural forms and the erection (arrangement) of building structures for various purposes. A methodology has been developed and implemented for the selection of a rational granulometric composition of aggregate, type, properties and amount of binder, chemical and mineral additives, together providing the required technological properties of concrete mixtures after they have been mixed with water. Original methods for assessing the rheological properties of water-soluble concrete mixtures and their changes over time, leading to an increase in the plastic strength of molded concrete, as well as a method for calculating the rate of concrete work depending on the properties of the concrete mixtures used, are proposed and experimentally substantiated. As a result, prerequisites have been created for further expansion of a number of compositions of dry concrete mixes taking into account their purpose for 3D-concreting, and for developing methods and evaluating the physical and mechanical characteristics and properties of hardened concrete, taking into consideration the purpose of manufactured products and erected (arranged) building structures.

**Keywords:** dry mix, water-soluble mixture, filler, binder, additives, techniques, properties, 3D-concreting

**For citation:** Samuilov Yu. D., Trepachko V. M., Batyanovskiy E. I. (2022) 3D-Concreting – Compositions, Techniques and Properties of Mixtures. *Science and Technique*. 21 (5), 374–385. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-374-385> (in Russian)

## Введение

Анализ разнообразных источников информации по проблематике 3D-бетонирования [1–3] показал заинтересованность в развитии данного направления строительного производства в целом ряде стран, занимающих передовые позиции в этой области хозяйственной деятельности. Одновременно налицо отсутствие конкретных сведений по составам, основным компонентам, особенностям технологии, методическому обеспечению по оценке свойств и режимов формования бетона с применением 3D-печати, что, естественно, составляет ноу-хау работающих в данном направлении исследовательских центров и фирм.

В этой связи для разработки и реализации в Беларуси такого в целом перспективного направления строительного производства есть необходимость проведения соответствующих исследований, результаты начального этапа которых приведены в материале статьи. Первичным и одним из важнейших элементов технологии 3D-бетонирования является разработка составов бетона, т. е. подбор его компонентов, обеспечивающих специфические технологические свойства бетонных смесей, а также режимы их формования при послойно-последовательном устройстве разнообразных конструктивов, твердения и целенаправленного формирования свойств затвердевшего бетона. В статье частично отражены результаты выполненных исследований по разработке ряда составов

бетона, методики оценки пригодности водозатворенных смесей по технологическим параметрам для 3D-бетонирования, включая основные положения предлагаемой методики расчета планируемого темпа ведения бетонных работ.

## Общая методология, материалы и методики исследований

Методология исследований предопределена необходимостью решения комплексной задачи с итоговой целью получения бетонного конструктива с требуемыми прочностными и эксплуатационными характеристиками. При этом исходная бетонная смесь должна обеспечивать возможность экструзионного формования бетона деформирующимся пластичным объемом, приобретающим в процессе подачи через насадку (сопло) требуемую (эллипсоидную) форму, которая способна сохраняться в заданных геометрических размерах и при этом воспринимать нагрузки от массы и динамических воздействий при укладке последующих ее слоев с некоторой заданной скоростью, обеспечивающей требуемый темп ведения бетонных работ. Поскольку имеющиеся на рынке материалы и научно-техническая информация о составах смесей для 3D-бетонирования являются ноу-хау фирм-производителей, для решения перечисленной комплексной задачи было необходимо в поисковом порядке:

– определить требуемую исходную пластичность смеси, т. е. ее консистенцию, спо-



собную держать заданную форму сразу после «выдавливания», и динамику роста пластической прочности, определяющую несущую способность слоя смеси во времени;

– найти оптимальное соотношение разнообразных компонентов бетонной смеси, при котором ее консистенция будет соответствовать предъявляемым требованиям;

– определить свойства материалов – компонентов, входящих в состав смеси, и их влияние на ее реологические свойства с целью обеспечения заданных требований;

– разработать методику оценки и экспериментальным путем выявить закономерности изменений реологических свойств (пластической прочности) смеси различных составов на соответствие заданным требованиям;

– разработать методику расчета допустимого темпа ведения бетонных работ с учетом технологических свойств смеси;

– экспериментально выявить закономерности кинетики твердения (роста прочности) бетона оптимальных составов и установить рациональные режимы его твердения.

В исследованиях использовали стандартизированные методики действующих нормативных документов и вариационные авторские методики, приспособленные к решению конкретных задач, описание и особенности которых отражены в данной статье в соответствующих разделах. Условия проведения экспериментов соответствовали требованиям к лабораторным испытаниям бетонных смесей и бетона (СТБ 1545–2005 [4], ГОСТ 10180–2012 [5]), в частности по температуре воздуха ( $20 \pm 5$ ) °C и относительной влажности ( $65 \pm 5$ ) %.

### Компоненты для бетона

#### • Вяжущие:

а) портландцемент ЦЕМ I класса прочности 42,5Н по ГОСТ 31108–2020 [6] и СЕМ I класса прочности 42,5N по СТБ EN 197-1–2015 [7] (соответствует М500-Д0 по ГОСТ 10178–85 [8], 2-я группа эффективности) с характеристиками, соответствующими требованиям указанных стандартов. Портландцемент производства ОАО «Белорусский цементный завод» с маркировкой «Н», т. е. с обычной прочностью в раннем возрасте, принимали для исследова-

ний как нормально твердеющее вяжущее с учетом того, что цемент с маркировкой «Р» (с высокой прочностью в раннем возрасте) заведомо обеспечит эффекты, полученные на менее активном вяжущем;

б) глиноземистый цемент Fondu (Kerneos, Франция) по стандарту EN 1464766 «Алюминаткальциевый цемент», с характеристиками, удовлетворяющими требованиям указанного норматива;

в) строительный гипс марок не ниже Г-5 Б2 [9], нормально твердеющий, прочностью не менее 5 МПа, удовлетворяющий требованиям стандарта [9] (результаты исследований с гипсовым вяжущим в статье не приводятся, так как по объему материала это предмет отдельной публикации).

• Минеральная добавка – микрокремнезем в соответствии с требованиями [6, 10].

• Заполнители – отсеянные фракции природного песка разной крупности по [11] и их смеси в экспериментально установленном соотношении на базе так называемой фуллеровской зависимости, представленной на рис. 1. График на рис. 1 отражает рациональное соотношение фракций мелкого заполнителя, обеспечивающее их смеси минимальную пустотность (объем межзерновых пустот) при оптимальной удельной поверхности зерен твердой фазы. Это является предпосылкой для минимизации расхода вяжущего при обеспечении требуемых прочностных характеристик бетона на их основе. При изготовлении бетона использовали песок:

а) фракции 0–0,63: средняя плотность в рыхлонасыпном состоянии  $\rho_{0,63}^0 = 1484 \text{ кг/м}^3$ , в виброуплотненном  $\rho_{0,63}^B = 1766 \text{ кг/м}^3$ ; плотность зерен  $\rho_{\text{п}}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$ ; пустотность  $\Pi_{0,63}^0 = 44,0 \%$ ,  $\Pi_{0,63}^B = 33,4 \%$  в рыхлонасыпном и виброуплотненном состоянии соответственно; удельная поверхность фракции песка  $S_{\text{уд}} = 143,8 \text{ м}^2/\text{т}$  (определена по методике профессора И. Н. Ахвердова [12]);

б) фракции 0–1,25:  $\rho_{1,25}^0 = 1441 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_{1,25}^B = 1618 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{\text{п}}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$ ;  $\Pi_{1,25}^0 = 45,6 \%$ ,  $\Pi_{1,25}^B = 38,9 \%$ ;  $S_{\text{уд}} = 44,2 \text{ м}^2/\text{т}$ ;

в) фракции более 1,25:  $\rho_{>1,25}^0 = 1431 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_{>1,25}^B = 1577 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{\Pi}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$ ;  $\Pi_{>1,25}^0 = 46,0 \%$ ,  $\Pi_{>1,25}^B = 40,5 \%$ ;  $S_{уд} = 19,3 \text{ м}^2/\text{т}$ ;

г) по Фуллеру, фракции 0–1,25:  $\rho_{\text{Фул.0–1,25}}^0 = 1572 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_{\text{Фул.0–1,25}}^B = 1826 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{\Pi}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$ ;  $\Pi_{\text{Фул.0–1,25}}^0 = 40,7 \%$ ,  $\Pi_{\text{Фул.0–1,25}}^B = 31,1 \%$ ;  $S_{уд} = 150,8 \text{ м}^2/\text{т}$ ;

д) по Фуллеру, фракции 0–2,5:  $\rho_{\text{Фул.0–2,5}}^0 = 1564 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_{\text{Фул.0–2,5}}^B = 1764 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{\Pi}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$ ;  $\Pi_{\text{Фул.0–2,5}}^0 = 41,0 \%$ ,  $\Pi_{\text{Фул.0–2,5}}^B = 33,4 \%$ ,  $S_{уд} = 111,6 \text{ м}^2/\text{т}$ .

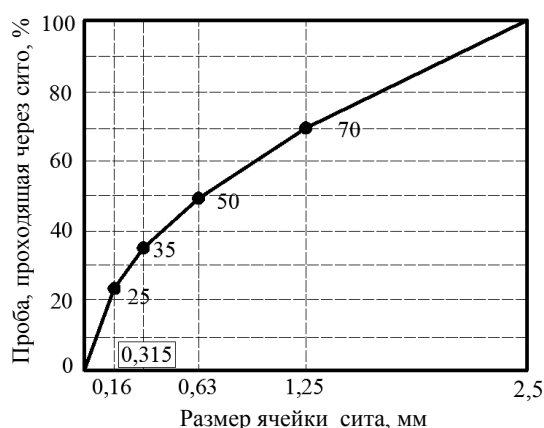


Рис. 1. Зависимость Фуллера [12]

Fig. 1. Fuller dependence [12]

• Химические добавки:

пластификатор, обеспечивает уменьшение водосодержания бетона и оптимальные прочностные характеристики;

ускоритель схватывания, предназначен для повышения темпа роста пластической прочности смеси;

водоудерживающий реагент, создает оптимальную консистенцию смеси, удерживает влагу в ее объеме и снижает усадку в процессе твердения в воздушно-сухих условиях.

• Суперпластификатор (по [13]) – «Полипласт СП-1» производства ОАО «ГК Полипласт» по техническим условиям, в сухом состоянии.

• Ускоритель схватывания – сульфат алюминия ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) по [14], дополнительный эффект – уплотнение структуры цементного камня и бетона.

Водоудерживающий реагент – гидроксипропилметилцеллюлоза WeKcelo MP 75 NM (WeiKem, КНР) и «УСК-200 ТТ» (Россия).

• Вода затворения – водопроводная питьевая вода, удовлетворяющая требованиям [15] к воде для приготовления бетонных и растворных смесей.

### Разработка составов цементобетонных смесей

Составы бетонных смесей для экструзионного 3D-бетонирования на этапе современного развития этой технологии представляют собой некое рациональное соотношение компонентов мелкозернистого конструкционного тяжелого бетона, включающего цементное тесто (в состав которого входят вяжущее, химические и минеральные (при наличии в составе) добавки, вода затворения) и заполнитель, в качестве которого целесообразно использовать природный песок преимущественно фракций размером зерна до 2,5 мм. Последнее связано как с особенностями экструзионного формования бетона, так и с планируемыми к разработке в БНТУ механизмами для опытной реализации технологии 3D-бетонирования.

В этой связи на начальном этапе исследования решали задачу по оценке влияния химических добавок (пластификатора и ускорителя схватывания) на свойства цемента и цементного теста, преследуя двоякую цель: обеспечение связности и взвешивающей способности цементного теста по отношению к заполнителю при экструзионном формовании, а также регулирование сроков схватывания и требуемого темпа роста пластической прочности отформованных слоев бетона в процессе работ. Конечная задача – обеспечение требуемой прочности затвердевшего бетона в изготавливаемом (устраиваемом) конструктиве.

### Свойства цементного теста

Пластифицирующий эффект оценивали для разных добавок-пластификаторов 1-й группы по [13], на основании чего по критериям «качество – стоимость» принята к использованию добавка «Полипласт СП-1». В табл. 1 приведены данные оценки эффективности по критерию снижения расхода воды в цементном тесте,

консистенция которого соответствует стандартизированному определению нормальной густоты цемента согласно [16]. С учетом данных табл. 1 и целесообразности максимального уменьшения начального водосодержания цементного теста для последующего роста прочности цементного камня и бетона для дальнейших исследований принимали дозировку добавки «СП-1» в количестве 1,1 % от массы цемента (МЦ) как наиболее рациональную.

Таблица 1

**Влияние пластификатора «Полипласт СП-1» на водопотребность и начало схватывания цемента**

**Influence of the plasticizer “Polyplast SP-1” on water demand and the beginning of cement setting**

| Дозировка «Полипласта СП-1» от МЦ, % | Нормальная густота цемента, % | Схватывание цементного теста одинаковой консистенции, мин |       |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------|
|                                      |                               | Начало                                                    | Конец |
| 0                                    | 27,75                         | 250                                                       | 325   |
| 0,5                                  | 24,50                         | 225                                                       | 305   |
| 0,7                                  | 22,30                         | 360                                                       | 405   |
| 0,9                                  | 22,25                         | 365                                                       | 415   |
| 1,1                                  | 22,15                         | 380                                                       | 440   |
| 1,3                                  | 22,20                         | 415                                                       | 465   |

С учетом явного замедления начала схватывания цемента при введении пластификатора, а также того обстоятельства, что период времени до начала схватывания смеси бетона должен обеспечивать, с одной стороны, высокий темп ведения бетонирования (т. е. быть коротким), а с другой – быть достаточным для его осуществления, исследовали возможность регулирования сроков схватывания смеси добавками ускоряющей группы [13]. Для достижения этой цели проверили добавки сульфата натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Н), нитрата кальция  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (НК) и сульфата алюминия  $\text{Al}_2\text{SO}_4$  (СА) (рис. 2), характеризующиеся минимальными ограничениями к применению в железобетоне по степени агрессивного воздействия на металлические детали оборудования. По результатам исследований принята добавка СА, обладающая не только ускоряющим схватывание, но и уплотняющим структуру цементного бетона действием, что предпочтительно с позиций уменьшения усадочных явлений при его твердении в воздушно-сухих условиях.

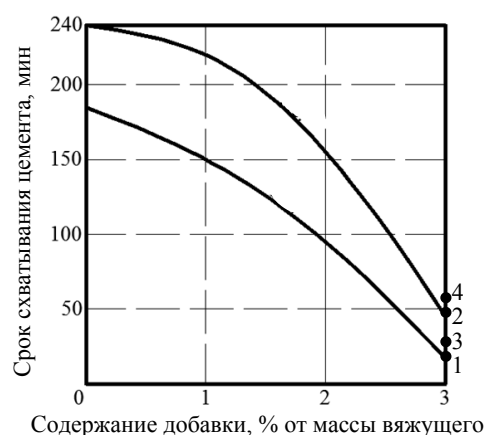


Рис. 2. Зависимость сроков схватывания от содержания добавки для цементного теста нормальной густоты:

1, 2 – начало и конец схватывания для сульфата алюминия (СА);  
3, 4 – начало и конец схватывания для комплексной добавки 1,1 % «СП-1» + 3 % СА

Fig. 2. Dependence of setting time on the content additive for cement dough of normal density:

1, 2 – beginning and the end of setting for a sulphate ammonium (SA);  
3, 4 – beginning and the end of setting for a complex additive 1.1% “SP-1” + 3 % SA

На рис. 2 приведены экспериментально установленные графические зависимости, отражающие влияние дозировки добавки СА на сроки схватывания цемента (цементного теста нормальной густоты при В/Ц ~ 0,27 доли ед.), а также влияние комплексной добавки, содержащей 1,1 % «СП-1» + 3 % СА от МЦ при В/Ц ~ 0,22. Анализ графиков на рис. 2 показывает, что при решении задачи по обеспечению требуемой формуемости бетонной смеси и одновременно ее ускоренного схватывания для высокого темпа укладки последующих слоев целесообразно, во-первых, обеспечить рациональное (расчетное, требуемое) время начала схватывания, а во-вторых, сократить время окончания схватывания и перехода бетона к твердению, т. е. к ускоренному росту его прочности. Как установлено экспериментально, эта задача решается разработанным комплексом добавок 1,1 % «СП-1» + 3 % СА от МЦ в бетоне, что отражено данными на рис. 2 при трехпроцентной дозировке сульфата алюминия.

Подбор состава бетонной смеси осуществляли экспериментально – путем оценки ее консистенции на пригодность для экструзионного формования по методике и критериям, приве-

денным далее в статье. В экспериментах варьировали: крупность и фракционность заполнителя (т. е. соотношение фракций, величину его удельной поверхности и пустотность), расход цемента (за счет разного соотношения цемента и заполнителя), содержание воды затворения (величину водоцементного отношения бетона). В табл. 2 приведены результаты экспериментов по оценке пригодности бетонной смеси по формовочным свойствам в зависимости от

влияния заполнителя, соотношения цемент – заполнитель и водосодержания (строки а–в), а также соотношения компонентов бетона (строка г). Номинальный состав бетона уточняли по фактической величине его средней плотности, которую определяли при формировании контрольных образцов. Пригодность смеси по формовочным свойствам для 3D-бетонирования оценивали по разработанным в процессе исследований методикам.

Таблица 2

Оценка пригодности бетонной смеси по формовочным свойствам  
Evaluation of suitability of a concrete mix by molding properties

| а) Оценка влияния заполнителя                                                                                                     |                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Вид песка<br>(фракция)                                                                                                            | Пластичность<br>смеси (ОК), мм                  | Способность смеси<br>держать форму (методика 1)                                                                                                                                                                                                                 | Заключение о пригодности смеси<br>к использованию<br>для экструзионного формования |
| 0–0,63                                                                                                                            | 3                                               | Конус лежит монолитно,<br>не рассыпается и не теряет фрагменты                                                                                                                                                                                                  | Пригодна                                                                           |
| 0,63–1,25                                                                                                                         | 3                                               | Конус лежит не монолитно,<br>рассыпается и теряет фрагменты                                                                                                                                                                                                     | Не пригодна                                                                        |
| >1,25                                                                                                                             | 3                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| Состав песка по Фуллеру<br>фракции 0–1,25                                                                                         | 3                                               | Конус лежит монолитно,<br>не рассыпается и не теряет фрагменты                                                                                                                                                                                                  | Пригодна                                                                           |
| б) Оптимальное соотношение цемента и заполнителя (Ц:З) для консистенции смеси                                                     |                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| Ц:З                                                                                                                               | Пластичность<br>смеси (ОК)<br>по методике 1, мм | Консистенция смеси                                                                                                                                                                                                                                              | Заключение о пригодности смеси<br>к использованию<br>для экструзионного формования |
| 1:7                                                                                                                               | 3                                               | Влажная рассыпчатая                                                                                                                                                                                                                                             | Не пригодна                                                                        |
| 1:6                                                                                                                               | 3                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| 1:5                                                                                                                               | 3                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| 1:4                                                                                                                               | 3                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| 1:3                                                                                                                               | 3                                               | Мягкий пластилин                                                                                                                                                                                                                                                | Пригодна                                                                           |
| 1:2                                                                                                                               | 4                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| в) Оценка влияния водосодержания                                                                                                  |                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| В/Ц, доли ед.                                                                                                                     | Пластичность<br>смеси (ОК)<br>по методике 1, мм | Консистенция смеси                                                                                                                                                                                                                                              | Заключение о пригодности смеси<br>к использованию<br>для экструзионного формования |
| 0,40                                                                                                                              | 0                                               | Влажная рассыпчатая                                                                                                                                                                                                                                             | Не пригодна                                                                        |
| 0,45                                                                                                                              | 0                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| 0,50                                                                                                                              | 1                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| 0,55                                                                                                                              | 3                                               | Мягкий пластилин                                                                                                                                                                                                                                                | Пригодна                                                                           |
| г) Соотношение компонентов для расчета номинального состава смеси                                                                 |                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| Вид компонента                                                                                                                    |                                                 | Формула                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                    |
| Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н                                                                                                        |                                                 | $\rho_{\text{см}} V_{\text{см}} = \text{Ц} + 3\text{Ц} + 0,55\text{Ц} + 0,011\text{Ц} + 0,03\text{Ц} = 4,591\text{Ц}$ ,<br>т. е $\text{Ц} = \rho_{\text{см}} V_{\text{см}} / 4,591$ ; при $V_{\text{см}} = 1 \text{ м}^3$ $\text{Ц} = \rho_{\text{см}} / 4,591$ |                                                                                    |
| Песок по Фуллеру фракции 0–1,25                                                                                                   |                                                 | $3 = 3\text{Ц}$                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
| Вода                                                                                                                              |                                                 | $\text{В} = 0,55\text{Ц}$                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                    |
| «Полипласт СП-1»                                                                                                                  |                                                 | $\text{П} = 0,011\text{Ц}$                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                    |
| Сульфат алюминия                                                                                                                  |                                                 | $\text{СА} = 0,03\text{Ц}$                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                    |
| Обозначения: $\rho_{\text{см}}$ – средняя плотность смеси, кг/м³; $V_{\text{см}}$ – объем смеси, м³; Ц – цемент; 3 – заполнитель. |                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |

В табл. 3 выборочно представлены номинальные составы конструкционного бетона для 3D-бетонирования при устройстве (возведении) несущих и при необходимости самонесущих конструктивов (включая декоративно-архитектурные изделия). Сопоставление приведенных составов бетона (№ 1 разработан фирмой «Сармат», № 2 – разработка БНТУ) по критериям «комплекс ингредиентов – стоимость – пригодность для 3D-бетонирования – качественные характеристики затвердевшего бетона» показало, что состав № 2 не уступает составу № 1 по всем характеристикам, но при этом в полтора-два раза дешевле по стоимости компонентов. В статье в связи с подачей заявки на изобретение не приводятся данные о составе № 2, включающем добавки микрокремнезема, разновидность метилцеллюлозы «УСК-200ТТ» и эластичных сортов фибры российского производства, а также о количественном содержании их в бетоне различного функционального назначения.

Таблица 3

**Номинальные составы бетона**  
**Nominal compositions of concrete**

| Вид компонента                                                   | Расход |
|------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Состав № 1</b>                                                |        |
| Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, кг/м <sup>3</sup>                    | 490    |
| Песок по Фуллеру фракции 0–2,5, кг/м <sup>3</sup>                | 1224   |
| Вода, кг/м <sup>3</sup>                                          | 343    |
| Глиноземистый цемент Fondu, кг/м <sup>3</sup>                    | 98     |
| Гидроксипропилметилцеллюлоза WeKcelo MP 75 НМ, кг/м <sup>3</sup> | 2,0    |
| Волокно полипропиленовое 3–6 мм, кг/м <sup>3</sup>               | 2,5    |
| Водоцементное отношение бетона, доли ед.                         | 0,58   |
| <b>Состав № 2</b>                                                |        |
| Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, кг/м <sup>3</sup>                    | 491    |
| Песок по Фуллеру фракции 0–1,25, кг/м <sup>3</sup>               | 1474   |
| Вода, кг/м <sup>3</sup>                                          | 270    |
| «Полипласт СП-1», кг/м <sup>3</sup>                              | 5,4    |
| Сульфат алюминия, кг/м <sup>3</sup>                              | 14,7   |
| Водоцементное отношение, доли ед.                                | 0,55   |

### Методики оценки формовочных свойств бетонной смеси

Оценка требуемых формовочных (реологических, технологических) свойств вязко-пластичной мелкозернистой бетонной смеси, предназначенной для экструзионного 3D-бетонирования, специфична. Для данного случая не под-

ходит определение традиционной осадки конуса (ОК), устанавливаемой по [4]. Вместе с тем, как показали результаты экспериментальных исследований, достоверно первично оценить этот технологический параметр на соответствие требуемой консистенции позволяет использование традиционной приборной базы норматива [16].

**Методика 1.** Аппаратура, применяемая в процессе испытаний: ртутный термометр ТМ-6-1 со шкалой от (–30) до (+50) °С, (±0,2 °С); аспирационный психрометр МВ-4М (10–100 %, ±(6–2) %); кольцо к прибору Вика; две стальные пластины размерами 100×100×2 мм; металлическая линейка 0–150 мм; штангенциркуль 0–300 мм.

Для оценки пластических свойств бетонной смеси (рис. 3) и ее способности держать форму сразу после «выдавливания» отработан и предлагается вариант определения величины осадки конуса ОК при деформировании под собственным весом смеси после снятия кольца к прибору Вика [16] и визуальной фиксации способности смеси к сохранению конической формы без признаков нарушений сплошности ее структуры. Приготовленную к проведению испытаний смесь укладывали в кольцо к прибору Вика, предварительно смазанное антиадгезионным составом (машинным маслом) и установленное на смазанную стальную пластину. Смесь уплотняли вровень с верхней гранью кольца; после укладки смеси кольцо снимали и ставили рядом с отформованной смесью на эту или вторую стальную пластину (равной толщины). На кольцо укладывали на ребро линейку и измеряли ОК по схеме рис. 3. Одновременно визуально оценивали внешний вид отформованного конуса: наличие (отсутствие) трещин, уровень и равномерность деформаций, т. е. способность смеси держать форму после снятия кольца.

Пластичность смеси (ОК) фиксировали в миллиметрах (с точностью 1 мм). Результаты выполненных экспериментов позволяют считать, что для применения смеси в экструзионной технологии 3D-бетонирования ОК должна быть в пределах 2–5 мм (в зависимости от условий ведения работ). При этом форма конуса смеси должна быть монолитной, конус не должен терять фрагменты, а его боковой периметр должен характеризоваться равномерностью поперечных деформаций по высоте.

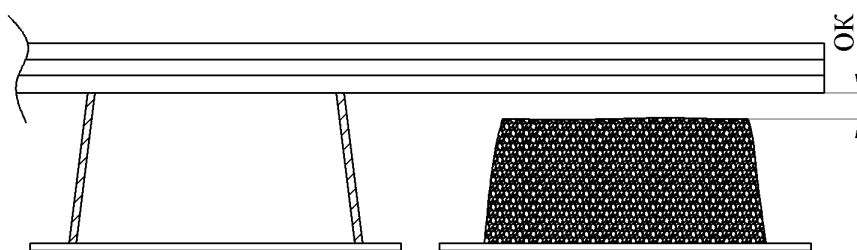


Рис. 3. Оценка деформации смеси

Fig. 3. Evaluation of mixture deformation

Предлагаемая методика дает возможность простейшими приемами оценить консистенцию смеси бетона на пригодность к экструзионному формованию (или 3D-бетонированию), а также определить влияние компонентов на пластические свойства смеси. По физическому состоянию смесь должна соответствовать консистенции размягченного пластилина, чтобы сплошным (без разрывов) слоем выходить из сопла, принимать форму плоского эллипса и сохранять ее под давлением последующих слоев. С помощью предлагаемой методики на начальном этапе подбора состава смеси бетона оценивали влияние расходов компонентов. Результаты этих испытаний представлены в табл. 2 (строки а–в).

Методика 2 предлагается как для первичной оценки формовочных свойств бетонной смеси при подборе состава, так и для оперативной оценки их в процессе ведения бетонных работ. Она заключалась в следующем. Из объема оцениваемой бетонной смеси отбирали пробу, из которой вручную изготавливали пробный шарик диаметром ~25 мм (рис. 4а). Его укладывали на стальную пластину размерами 100×100×2 мм [16], смазанную антиадгезионным составом, и такой же пластиной деформировали вертикально приложенной нагрузкой до остаточной высоты слоя смеси ~10 мм (рис. 4б, с, d).

Визуально оценивали состояние получившейся лепешки на сохранение целостности структуры «отформованной» бетонной смеси. Из испытанных проб для экструзионного 3D-бетонирования пригодна смесь, отображенная на рис. 4d, т. е. бетонная смесь, деформация которой равномерна и характеризуется сплошным (без разрыва) состоянием кромки образца по всему периметру.



Рис. 4. Оценка консистенции смеси: а – шарик диаметром 25 мм; б, с – примеры недостаточной пластичности смеси; d – пример смеси, консистенция которой соответствует консистенции мягкого пластилина

Fig. 4. Evaluation of mixture consistency: a – a ball with diameter of 25 mm; b, c – examples of insufficient mixture plasticity; d – example of mixture whose consistency corresponds to the consistency of soft plasticine

### Методики расчета темпа бетонирования

Для оценки возможного темпа укладки слоев из бетонной смеси конкретного состава и установленной консистенции, соответствующей условиям экструзионного 3D-бетонирования, разработаны и предлагаются две методики – эмпирическая (методика 3) и аналитическая (методика 4).

Методика 3 заключается в оценке роста со временем (с развитием процесса схватывания цемента и бетонной смеси) сопротивления смеси усилию вдавливания индентора (рис. 5) в ее массив.

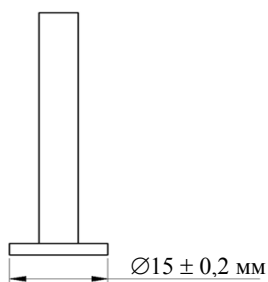


Рис. 5. Индентор для оценки изменений пластической прочности водозатворенной бетонной смеси

Fig. 5. Indenter for assessing changes in plastic strength of water-mixed concrete

В процессе проведения испытаний приготовленную смесь укладывали в кольцо к прибору Вика [16], установленное на стальную пластину. Постукиванием о стол смесь в кольце выравнивали по его верхней грани. Затем кольцо вместе со смесью на пластине устанавливали в рабочую зону разрывной машины Z100 и на верхнюю грань смеси помещали индентор, который вдавливали в массив смеси (скорость погружения 5 мм/мин, глубина погружения  $\leq 3$  мм). За значение несущей способности смеси принимали ее сопротивление вдавливанию индентора на глубину 1 мм как среднее арифметическое не менее трех определений в разных местах пробы смеси, отличающихся в меньшую и большую стороны не более чем на 10 %. Эту операцию повторяли с определенным временным интервалом, каждый раз перемещая индентор на незатронутую ранее часть верхней грани смеси. Фиксировали изменения (рост) несущей способности смеси  $p_{н.с}$  во времени. Соотносили эти изменения с расчетной величиной давления  $n$  слоев бетона и требуемой скоростью бетонирования. Должно было соблюдаться условие  $p_{н.с} > p$  в любой момент времени. При этом величину давления  $p$ , МПа, укладываемого расчетного количества слоев определяли по зависимости

$$p = nm g / (Lb), \quad (1)$$

где  $n$  – число слоев, уложенных на основном слое, шт.;  $m$  – масса одного слоя, кг, длиной  $L$ , мм;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $b$  – ширина основания слоя (рис. 6), мм.

Массу слоя определяли путем взвешивания свежееотформованного фрагмента слоя длиной  $L = 0,5\text{--}1,0$  м. Ширину основания слоя за-

меряли штангенциркулем с точностью до 0,1 мм в трех различных точках уже схватившегося фрагмента слоя, высчитывали среднее арифметическое из трех результатов измерений. Длину фрагмента слоя контролировали рулеткой с точностью до 1 мм.

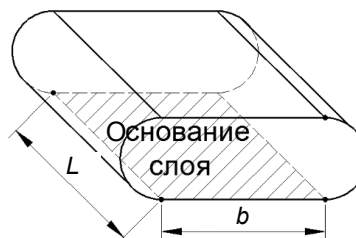


Рис. 6. Схема фрагмента слоя для расчета по методике 3

Fig. 6. Diagram of layer fragment for calculation according to the method 3

Методика 4 предназначена для аналитического расчета темпа бетонирования по количеству слоев, которые могут быть уложены с учетом изменений пластической прочности смеси во времени. Для ее реализации задавались параметры: ширина слоя  $B$ , м; высота слоя  $h$ , м; плотность бетонной смеси (при отсутствии фактических данных)  $2300 \text{ кг/м}^3$ . Вычисляли массу  $m$ , кг, погонного метра слоя, используя схему рис. 7 и следующие зависимости:

$$m = S_{\text{бок}} L \rho_{\text{см}}, \quad (2)$$

$$S_{\text{бок}} = h(\pi h/4 + b), \quad (3)$$

где  $S_{\text{бок}}$  – площадь поперечного сечения уложенного слоя,  $\text{м}^2$ ;  $\rho_{\text{см}}$  – плотность бетонной смеси,  $\text{кг/м}^3$ ;  $b$  – ширина основания уложенного слоя, м.

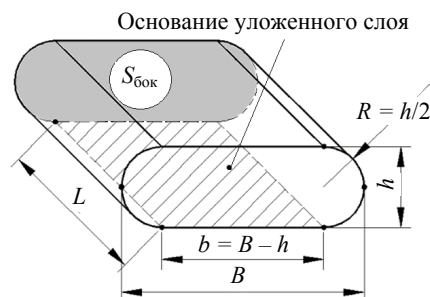


Рис. 7. Схема фрагмента слоя для аналитического способа (методика 4) расчета давления

Fig. 7. Diagram of layer fragment for analytical method (method 4) for calculating pressure



Затем по (1) вычисляли давление на основной слой со стороны вышележащих слоев. На основании этого делали заключение, с каким темпом по количеству укладываемых слоев возможно вести работы с учетом состава и свойств бетонной смеси.

Методика 5, предназначенная для оценки соответствия (пригодности) бетонной смеси конкретного состава по результатам расчета и экспериментального контроля для использования при экструзионном 3D-бетонировании, в сокращенном виде представлена на рис. 8 и в табл. 4.

При необходимости возведения, например, конструкции – элемента колодца (рис. 9) высотой 1020 мм с учетом высоты формируемого слоя 30 мм из бетона состава № 2 (табл. 3), характеризующегося номинальной средней плотностью  $\rho_{1,25}^0 \sim 2260 \text{ кг/м}^3$  (в расчетах  $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$ ) и удовлетворяющего положениям методик 1–3 по результатам оценки (расчет в ста-

тье не приводится) технологических свойств водозатворенной смеси (табл. 4), график роста давления на ранее уложенный слой примет вид зависимостей, показанных на рис. 8. Построение кривой роста несущей способности смеси (отражающей способность смеси удерживать начальную форму под воздействием равномерно распределенных нагрузок сжатия) осуществляется эмпирически путем фактических замеров данного показателя на образце смеси по методике 3 с определенным временным интервалом. Кривая роста давления на уложенный слой отражает увеличение давления на нижний уложенный слой бетонной смеси (вызванное воздействием веса вышележащих слоев) в течение времени, которое связано с укладкой на нижний слой каждого последующего слоя (определяется по (1)). Основные показатели приведенного примера расчета (оценки) бетонирования элемента колодца соответствуют данным табл. 5.

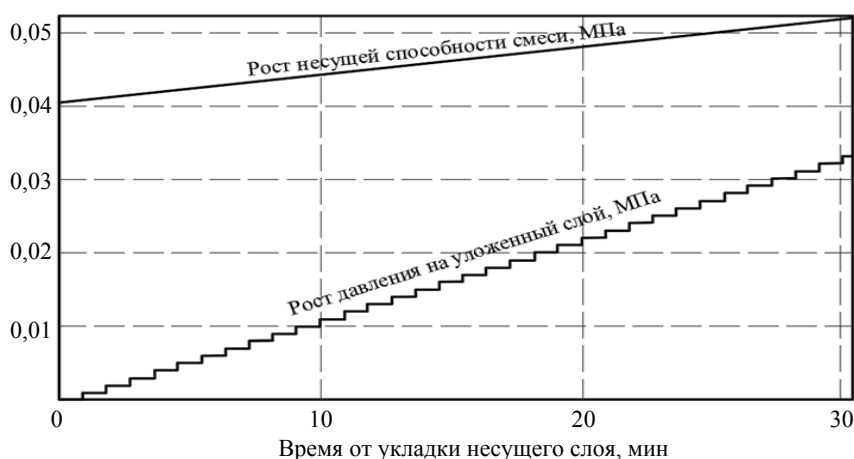


Рис. 8. Оценка соотношения «рост несущей способности смеси – рост давления на ранее уложенный слой»

Fig. 8. Evaluation of the ratio “increase in the bearing capacity of the mixture – an increase in pressure on the previously laid layer”

Таблица 4

Проверка смеси на соответствие заданным требованиям  
Checking the mixture for compliance with specified requirements

| Характеристика смеси                                          | Требование                                                                      | Фактическое значение характеристики                                               | Заключение о пригодности смеси к использованию для экструзионного формования |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Пластичность (ОК) по методике 1                               | 2–5 мм                                                                          | 3 мм                                                                              | Пригодна                                                                     |
| Способность держать форму (методика 1)                        | Конус должен лежать монолитно, не рассыпаться и не терять фрагменты             | Конус лежит монолитно, не рассыпается и не теряет фрагменты                       | Пригодна                                                                     |
| Консистенция (рис. 4d)                                        | Мягкий пластилин                                                                | Мягкий пластилин                                                                  | Пригодна                                                                     |
| Динамика роста несущей способности во времени (методики 3, 4) | Рост несущей способности смеси должен превышать рост давления на уложенный слой | Рост несущей способности смеси превышает рост давления на уложенный слой (рис. 8) | Пригодна                                                                     |

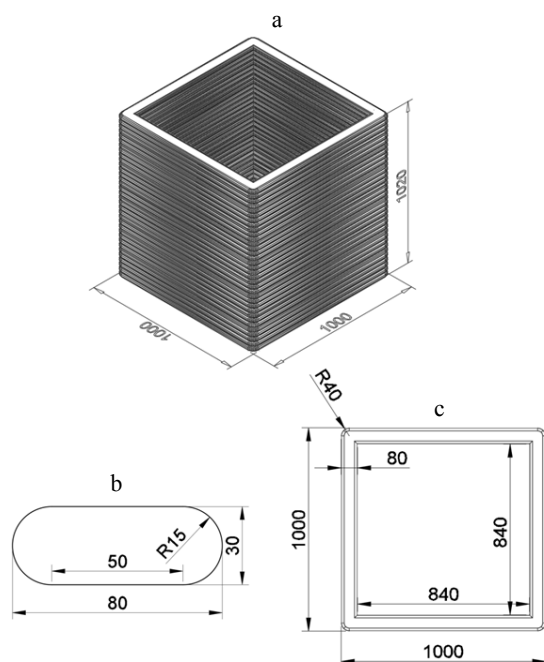


Рис. 9. Возводимая конструкция: а – общий вид колодца; б – размеры слоя бетона; с – размеры колодца в плане

Fig. 9. Structure being erected: a – general view of well; b – dimensions of concrete layer; c – well dimensions in plan

Таблица 5

**Основные показатели  
процесса бетонирования элемента колодца**

**Main characteristics  
of well element concreting process**

| Показатель                                                   | Значение |
|--------------------------------------------------------------|----------|
| Диаметр круглого сопла экструдера, мм                        | 50       |
| Плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>                  | 2300     |
| Высота элемента колодца, мм                                  | 1020     |
| Наружный размер элемента колодца в плане, мм                 | 1000     |
| Внутренний размер элемента колодца в плане, мм               | 840      |
| Радиус закругления углов наружных граней колодца, мм         | 40       |
| Масса одного метра погонного слоя, кг                        | 5,08     |
| Масса элемента колодца, кг                                   | 632,33   |
| Количество слоев бетона, шт.                                 | 34       |
| Рекомендуемая скорость возведения, м пог./мин                | 4        |
| Рекомендуемая скорость выдавливания смеси, м <sup>3</sup> /ч | 0,53     |
| Время формования элемента колодца, мин                       | 31,125   |

## ВЫВОДЫ

1. Определены материалы, их необходимые свойства и количественное соотношение для подбора составов сухих смесей, предназначенных для экструзионного 3D-бетонирования при изготовлении строительных изделий и конструкций.

2. Разработаны методики оценки требуемых реологических (технологических) свойств водозатворенных бетонных смесей, базирующиеся на использовании как традиционного стандартизированного оснащения для определения реологических характеристик цементного теста, так и на оригинальном авторском предложении по пенетрационной оценке изменений пластической прочности водозатворенной бетонной смеси во времени.

3. Предложены авторские методики экспериментального и аналитически расчетного определения возможного темпа бетонирования (расчетного количества последовательно укладываемых друг на друга слоев бетонной смеси за единицу времени) с учетом реологических (технологических) характеристик смесей конкретного используемого состава.

4. По совокупности результатов исследований заложены материальные и методологические основы технологического обеспечения производства бетонных работ методом 3D-бетонирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аддитивная технология: описание, определение, особенности применения и отзывы. Аддитивные технологии в промышленности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fb.ru/article/231049/additivnaya-tehnologiya-opisanie-opredelenie-osobennosti-primeneniya-i-otzyivyi-additivnyie-tehnologii-v-promyshlennosti>.
2. Обзорная статья по 3D строительным технологиям [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/224299/>.
3. Иванова, Е. А. Методология исследований материалов для строительной 3D-печати / Е. А. Иванова // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь. Минск: Белор. наука, 2021. С. 15–26.
4. Смесей бетонные. Методы испытаний: СТБ 1545–2005. Введ. 01.07.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2005. 24 с.
5. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартинформ, 2018. 36 с.

6. Цементы общестроительные. Технические условия: ГОСТ 31108–2020. Введ. 01.03.2021. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с.
7. Цемент. Часть 1. Состав, технические требования и критерии соответствия общестроительных цементов: СТБ EN 197-1–2015. Введ. 01.01.2016. Минск: Госстандарт, 2015. 34 с.
8. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия: ГОСТ 10178–85. Введ. 01.01.1987. М.: Стандартинформ, 2008. 8 с.
9. Вязущие гипсовые. Технические условия: ГОСТ 125–2018. Введ. 01.05.2019. М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.
10. Микрокремнезем для бетона. Часть 1. Определения, требования и критерии соответствия: СТБ EN 13263-1–2012. Введ. 01.01.2013. Минск: Госстандарт, 2012. 26 с.
11. Песок для строительных работ. Методы испытаний: ГОСТ 8735–88. Введ. 01.07.1989. М.: Стандартинформ, 2018. 34 с.
12. Бабицкий, В. В. Технология заводского производства бетонных и железобетонных изделий. Методические указания к лабораторным работам / В. В. Бабицкий, А. И. Бондарович, П. В. Рябчиков. Минск: БНТУ, 2014. 65 с.
13. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112–98. Введ. 01.01.1999. Минск: Минстройархитектуры, 1999. 36 с.
14. Алюминия сульфат технический очищенный. Технические условия: ГОСТ 12966–85. Введ. 01.01.1987. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 12 с.
15. Вода для бетонов и растворов. Технические условия: СТБ 1114–98. Введ. 01.01.1999. Минск: Минстройархитектуры, 1999. 20 с.
16. Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема: ГОСТ 310.3–76. Введ. 01.01.1978. М.: Изд-во стандартов, 1976. 12 с.
3. Ivanova E. A. (2021) Research Methodology for Materials for Building 3D Printing. *Prospects for the Development of Additive Technologies in the Republic of Belarus*. Minsk, Belorusskaya Nauka Publ., 15–26 (in Russian).
4. STB 1545–2005. Concrete Mixes. Test Methods. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2005. 24 (in Russian).
5. State Standard 10180–2012. Concretes. Methods for Determining the Strength of Control Samples. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 36 (in Russian).
6. State Standard 31108–2020. General Construction Cements. Technical Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 19 (in Russian).
7. STB EN 197-1–2015. Cement. Part 1. Composition, Technical Requirements and Compliance Criteria for General Construction Criteria. Minsk, Gosstandart Publ., 2015. 34 (in Russian).
8. State Standard 10178–85. Portland Cement and Slag Portland Cement. Technical Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 8 (in Russian).
9. State Standard 125–2018. Gypsum Binders. Technical Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 12 (in Russian).
10. STB EN 13263-1–2012. Microsilica for Concrete. Part 1. Definitions, Requirements and Eligibility Criteria. Minsk, Gosstandart Publ., 2012. 26 (in Russian).
11. State Standard 8735–88. Sand for Construction Work. Test Methods. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 34 (in Russian).
12. Babitskii V. V., Bondarovich A. I., Ryabchikov P. V. (2014) *Technology of Factory Production of Concrete and Reinforced Concrete Products*. Minsk, Belarusian National Technical University. 65 (in Russian).
13. STB 1112–98. Additives for Concrete. General specifications. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 1999. 36 (in Russian).
14. State Standard 12966–85. Technical Purified Aluminum Sulfate. Technical Specifications. Moscow, Publishing House “EPK Izdatelstvo Standartov”, 1999. 12 (in Russian).
15. STB 1114–98. Water for Concretes and Mortars. Technical Specifications. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 1999. 20 (in Russian).
16. State Standard 310.3–76. Cements. Methods for Determining Normal Density, Setting Time and Uniformity of Volume Change. Moscow, Publishing House of Standards, 1976. 12 (in Russian).

Поступила 20.06.2022

Подписана в печать 23.08.2022

Опубликована онлайн 30.09.2022

## REFERENCES

1. *Additive Technology: Description, Definition, Application Features and Reviews. Additive Technology in the Industry*. Available at: <https://fb.ru/article/231049/additivnaya-tehnologiya-opisanie-opredelenie-osobennosti-primeneniya-i-otzyivyi-additivnyie-tehnologii-v-promyshlennosti> (in Russian).
2. *Review Article about Technology of 3D Construction*. Available at: <https://habr.com/ru/post/224299/> (in Russian).

Received: 20.06.2022

Accepted: 23.08.2022

Published online: 30.09.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-386-391>

УДК 624.014

## Анализ нормативных документов по определению нагрузок на здания и сооружения

Докт. техн. наук, проф. Е. Ю. Давыдов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Расчет строительных конструкций начинается с определения нагрузок и воздействий. Правильность определения нагрузок и воздействий, и в особенности их расчетных значений, во многом определяет надежность конструктивных форм, их долговечность и экономическую эффективность. В статье рассмотрены нормативные документы по определению снеговых, ветровых и крановых нагрузок, а также нагрузок, обусловленных собственной массой несущих и ограждающих конструкций. В большинстве случаев изменение значений снеговых нагрузок в сторону их увеличения является трудо- и материалозатратным, так как после этого требуются обследование всех несущих конструкций, воспринимающих снеговые нагрузки, их перерасчет и довольно часто – усиление. Предлагается пересмотр снеговых нагрузок производить не чаще чем раз в 20–25 лет. Скорость ветра с увеличением высоты возрастает. Это подтверждают статистические данные, полученные на множестве метеостанций, расположенных в Республике Беларусь и зарубежных странах. Неучет изменения ветрового давления по высоте приводит к существенному увеличению усилий от ветровой нагрузки в 2–3 раза. Увеличение усилий от ветровой нагрузки так же, как и от снеговой, влечет за собой необходимость массового обследования зданий и сооружений и, как правило, проведения дорогостоящих работ по усилению несущих конструкций. Определение нагрузок от мостовых грузоподъемных кранов в действующих нормативных документах полностью ориентировано на характеристики европейских грузоподъемных механизмов, что во многом не соответствует характеристикам грузоподъемных кранов, используемых в Беларуси. Предлагается крановые нагрузки определять по СП 20.133330.2011 «Нагрузки и воздействия» (актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\*). При определении расчетных нагрузок от собственной массы конструктивных форм используются коэффициенты надежности по нагрузкам. Значения этих коэффициентов в действующих нормативных документах необоснованно завышены, особенно это касается металлических конструкций.

**Ключевые слова:** нагрузка, воздействие, усилия, нормативный документ

**Для цитирования:** Давыдов, Е. Ю. Анализ нормативных документов по определению нагрузок на здания и сооружения / Е. Ю. Давыдов // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 386–391. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-386-391>

## Analysis of Regulatory Documents for Determining Loads for Buildings and Structures

E. Yu. Davydov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The calculation of building structures begins with the determination of loads and effects. The correctness of determining the values of loads and impacts, and in particular their calculated values, largely determines the reliability of structural forms, their durability and economic efficiency. The paper considers the regulatory documents for determining snow, wind and crane loads, as well as loads due to their own weight of load-bearing and enclosing structures. In most cases, changing the values of snow loads in the direction of their increase is labor- and material-intensive, since after this, it is required to examine all the supporting structures that perceive snow loads, recalculation them, and quite often, strengthen

### Адрес для переписки

Давыдов Евгений Юрьевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Ф. Скорины, 25/1,  
220114, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 272-96-97  
davydovevg13@yandex.ru

### Address for correspondence

Davydov Eygeney Yu.  
Belarusian National Technical University  
25/1, F. Skoriny str.,  
220114, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 272-96-97  
davydovevg13@yandex.ru

them. It is proposed to review snow loads no more than once every 20–25 years. Wind speed increases with height increases. This is confirmed by statistical data obtained at many weather stations located in the Republic of Belarus and foreign countries. Failure to take into account the change in wind pressure along the height leads to significant increase in the efforts from the wind load by 2–3 times. The increase in the efforts from the wind load, as well as from the snow load, entails the need for a mass survey of buildings and structures and, as a rule, expensive work to strengthen the supporting structures. Determination of loads from overhead cranes in the current regulatory documents is completely focused on the characteristics of European hoisting mechanisms, which largely does not correspond to the characteristics of cranes used in the Republic of Belarus. It is proposed to determine crane loads according to SP [Sanitary Regulations] CYbG20.133330.2011 “Loads and impacts” (updated edition of SNIIP [Construction Standards and Regulations] 2.01.07–85\*). When determining the design loads from the own mass of structural forms, the reliability factor for loads is used. The values of these coefficients in the current regulatory documents are unreasonably high, especially for metal structures.

**Keywords:** load, impact, efforts, regulatory document

**For citation:** Davydov E. Yu. (2022) Analysis of Regulatory Documents for Determining Loads for Buildings and Structures. *Science and Technique*. 21 (5), 386–391. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-386-391> (in Russian)

## Введение

Как правило, здания и сооружения, и прежде всего здания и сооружения производственного назначения, подвергаются воздействиям четырех видов нагрузок: снеговых, ветровых, крановых и нагрузок, обусловленных собственной массой конструктивных форм. Первые три вида этих нагрузок являются временными, т. е. могут какое-то время быть и отсутствовать. Последняя нагрузка, обусловленная собственной массой конструктивной формы, присутствует всегда. Поскольку несущая способность зданий и сооружений величина постоянная, ее значение определяется при действии всех нагрузок – и временных, и постоянных. Иногда к перечисленным нагрузкам добавляются особые нагрузки, возникающие при транспортировке и монтаже конструктивных форм. Они учитываются не всегда, поэтому в статье не рассматриваются.

Одновременное действие перечисленных нагрузок на несущие конструкции является вполне вероятным, но маловероятно то, что все они в один и тот же временной период будут иметь максимальное значение. Этот фактор в нормативных документах учитывается специальными коэффициентами сочетаний. Все перечисленные правила по определению нагрузок и воздействий анализируются в статье прежде всего с точки зрения пользователя, т. е. проектировщика.

## Снеговые нагрузки

За прошедшие 11 лет (с 2004 по 2015 г.) значения нормативной снеговой нагрузки на

грунт в Республике Беларусь претерпели существенные изменения (табл. 1).

Таблица 1

Значения снеговой нагрузки  
Snow load values

| Город   | Снеговая нагрузка, кПа, по годам |         |         |         |
|---------|----------------------------------|---------|---------|---------|
|         | 1987 г.                          | 2004 г. | 2009 г. | 2015 г. |
| Минск   | 0,7                              | 1,2     | 1,6     | 1,45    |
| Гомель  | 0,7                              | 0,8     | 1,6     | 1,55    |
| Витебск | 1,0                              | 1,2     | 1,8     | 1,45    |
| Могилев | 1,0                              | 1,2     | 1,6     | 1,35    |
| Гродно  | 0,5                              | 0,8     | 1,4     | 1,35    |
| Брест   | 0,5                              | 0,8     | 1,2     | 1,35    |

Первое, что вызывает вопросы, – это частое и значительное увеличение нагрузки за столь короткий период времени. При этом до 2009 г. снеговые нагрузки увеличиваются, а начиная с 2015-го уменьшаются (исключение составляет Брестская область).

Увеличение нагрузок порождает значительные проблемы:

1) согласно ТКП 45-1.04-305–2016 (п. 13.4) и ТКП 45-1.04-37–2008\* (п. 8.29), потребуется детальное обследование всех зданий и сооружений, запроектированных до даты увеличения нагрузки;

2) возникает необходимость перерасчета несущих конструкций, что в большинстве случаев повлечет их усиление и значительные материальные и трудовые затраты.

Также вызывают сомнения аналитические формулы по определению снеговой нагрузки в зависимости от высоты расположения местности над уровнем моря ([1], табл. НП 1.1).

Согласно указанным зависимостям, нормативная снеговая нагрузка может быть как больше, так и меньше  $S_k$  – нормативного значения, определенного с вероятностью превышения 0,02. Например, для Бреста при  $S_k = 1,35$  кН/м<sup>2</sup> нормативная нагрузка на отметке 128 м составляет всего 0,756 кН/м<sup>2</sup>. Аналогичные результаты имеют место и по другим районам, но при этом для Гродно (подрайон 1а) и Гомеля (подрайон 3), где перепады высот могут достигать 40 м (Национальный атлас Республики Беларусь), снеговая нагрузка почему-то не зависит от высоты. Снеговые нагрузки, значения которых меньше или больше  $S_k$ , не имеют статистического обоснования, так как каждая станция, осуществляющая мониторинг за снеговой нагрузкой, замеряет снеговой покров только на одной отметке.

Следует также отметить, что значения нагрузок меньше  $S_k$  будут иметь большую вероятность превышения. Кроме того, при использовании указанных аналитических зависимостей снеговая нагрузка должна определяться уже не на грунт, а на покрытие.

В соседних с Республикой Беларусь странах ситуация со снеговыми нагрузками следующая. На 50 % территории Польши нормативная снеговая нагрузка является постоянной, не зависит от отметки местности, на другой части территории снеговая нагрузка до отметки 300 м также постоянная [1]. В Российской Федерации, Украине и Чехии нормативная снеговая нагрузка на всей территории (в каждом снеговом районе) тоже постоянная [2, 3]. Исключения составляют горные районы при высоте более 1500 м в России и 500 м в Украине [4].

Исходя из сделанных замечаний, предлагается нормативную снеговую нагрузку для каждого снегового района Республики Беларусь принять постоянной.

### Ветровые нагрузки

Точность аппроксимации профиля ветра в приземном слое определяется на основании многолетних статистических данных. В СССР этим занималась лаборатория по нагрузкам и воздействиям при ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко. На основании обработки достаточно

надежных и длительных измерений установлено, что средние скорости ветра в слое атмосферы до высоты 300 м описываются значительно точнее степенным законом, чем логарифмическим [5]. В действующем документе [6] непонятно, на каком основании принят логарифмический закон.

Несмотря на то что в [6] повышение скорости ветра с увеличением высоты не отрицается, однако при определении ветрового давления на вертикальные стены прямоугольного в плане здания этот фактор не учитывается: в качестве базовой высоты, по которой определяется нагрузка, принимается высота здания, если эта высота не превышает ширину здания (подавляющее большинство строений производственного и общественного назначения имеют именно такое соотношение этих размеров). Неучет изменения ветрового давления по высоте приводит к существенному увеличению усилий от ветровой нагрузки в 2–3 раза. Увеличение усилий от ветровой нагрузки так же, как и от снеговой, влечет за собой необходимость массового обследования зданий и сооружений и, как правило, проведения дорогостоящих работ по усилению несущих конструкций.

### Крановые нагрузки на подкрановые пути

При определении крановых нагрузок на подкрановые пути (ТКП EN 1991-3–2009) учитываются следующие коэффициенты динамичности:  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$ ,  $\varphi_5$ ,  $\varphi_7$  ([7], п. 2.2.2(4), 2.2.2(5)).

- Коэффициент  $\varphi_1$  учитывает колебательную пульсацию моста грузоподъемного крана. В табл. 2.4 [7] отмечено, что  $0,9 < \varphi_1 < 1,1$ , но при этом нет никаких указаний по определению конкретного значения этого коэффициента.

- Коэффициент  $\varphi_2$  учитывает динамические эффекты, возникающие при отрыве груза от пола. Определяется в зависимости от постоянного значения скорости подъема груза ([7], табл. 2.5) и класса подъемного оборудования НС (в нормативных документах на мостовые краны, используемые в Беларуси, подобная классификация не предусмотрена). Изменяется этот коэффициент в интервале 1,10–1,42. Здесь следует отметить, что при определении коэффи-

циента совершенно не учитывается важнейшая характеристика крана – режим работы, поскольку класс подъемного оборудования не предполагает какой-то конкретный режим работы ([7], табл. В.1). Например, при классе подъемного оборудования НС4 режимы работы (S-класс) могут быть S4, S5, S6, S7, S8, S9 ([7], Приложение В), для которых спектр нагружения изменяется в интервале 0,0313–1,0000, а количество циклов может быть в интервале  $1,6 \cdot 10^4$ – $8 \cdot 10^6$ . Не учитывать указанные факторы представляется необоснованным.

- Коэффициент  $\varphi_3$  определяется по формуле  $\varphi_3 = 1 - \Delta m / m(1 + \beta_3)$  ([7], табл. 2.4). Очевидно, что наибольшая сила, возникающая при неожиданном сбрасывании поднимаемого груза, будет при  $\Delta m = m$ . Тогда  $\varphi_3 = \beta_3$ , где  $\beta_3 = 0,5$  или  $\beta_3 = 1,0$  ([7], табл. 2.3), т. е. получается, что  $\varphi_3$  или снижает нагрузку от поднимаемого груза, или не оказывает никакого влияния на нее. Поэтому применение коэффициента  $\varphi_3$  при расчете подкрановых балок представляется не обязательным.

- Коэффициент  $\varphi_4$  учитывает динамические эффекты, возникающие при движении крана по рельсовым путям. В строительных нормах [8], которые регламентируют в Беларуси допуски при устройстве рельсовых путей, не предусматриваются меры по минимизации динамических воздействий, возникающих при движении мостовых кранов: стыки рельсов не завариваются, торцы рельсов делаются прямыми, в стыках рельсов предусматривается зазор 4 мм при температуре 0 °С (при температуре минус 30 °С этот зазор может достигать 7 мм), допускается смещение торцов стыкуемых рельсов в плане и по высоте на 2 мм. Также в этом документе не предусмотрено обязательное применение эластомерных подкладок между рельсом и подкрановой балкой. При наличии указанных допусков коэффициент  $\varphi_4$  не может быть принят равным 1, а должен определяться с помощью моделирования ([7], табл. 2.4), проведение которого в проектных организациях не предусмотрено, т. е. практически определение  $\varphi_4$  невозможно.

- Коэффициент  $\varphi_5$  используется для определения горизонтальных поперечных сил, обу-

словленных ускорением и торможением моста крана. Согласно п. 2.7 [7], нормативные значения горизонтальных сил указываются поставщиком крана. Например, поперечная горизонтальная сила определяется через движущую силу  $K$ , значение которой должен представить поставщик крана ([7], п. 2.7.3(2)). В нормативной документации, сопровождающей мостовые краны, используемые в Беларуси, такой характеристики нет. Если коэффициент  $\varphi_5$  не включен в детализированную документацию поставщика крана, он, согласно п. 2.7.2(5) [7], определяется по табл. 2.6 [7]. Формулировки, приведенные в этой таблице, определяющие диапазоны  $\varphi_5$ , совершенно не конкретны:  $1,0 \leq \varphi_5 \leq 1,5$ , если «силы изменяются плавно»;  $1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$  «для случаев, где могут произойти резкие изменения»;  $\varphi_5 = 3$  «для приводов, имеющих значительный «мертвый» ход». Вычислить достоверное значение коэффициента  $\varphi_5$  не представляется возможным, так как приведенные формулировки не имеют никакого числового сопровождения.

- $\varphi_7$  – коэффициент динамичности. При расчете подкрановых балок горизонтальная сила, возникающая при ускорении или торможении тележки крана, согласно пп. 2.7.5 и 2.11.2 [7], может быть принята равной 0,1 от суммы грузоподъемности крана и веса тележки (это в два раза больше, чем по документу [2], используемому в России), или «в других случаях» – по формуле (2.15) [7]. Прежде всего, здесь нет разъяснений, что подразумевается «в других случаях», а формулу (2.15) [7] не представляется возможным применить, так как используемая там динамическая жесткость буфера  $S$  не определена. Коэффициент  $\varphi_7$  применительно к горизонтальной силе изменяется в интервале 1,25–1,60 ([7], табл. 2.10) в зависимости от характеристики буфера. При этом также не определено, как вычислить эту характеристику буфера при ускорении и торможении тележки крана ([7], рис. 2.9).

При расчете подкрановых балок коэффициент надежности по нагрузке ( $\gamma_F$  – для крановой нагрузки и  $\gamma_G$  – для нагрузки от собственного веса) принят равным 1,35 ([7], табл. А1), что, учитывая наличие на кранах ограничи-



телей грузоподъемности, представляется весьма завышенным и необоснованным. В [2] значения этих коэффициентов: 1,20 – для крановой нагрузки; 1,05 – для собственного веса.

### **Крановые нагрузки на поперечную раму здания**

При расчете поперечной рамы здания (ПРЗ), как правило, используются усилия от сочетаний нагрузок ([9], п. 6.4.3.2). Наиболее часто эти сочетания образуются из усилий от постоянной, снеговой, ветровой и крановой нагрузок. При определении усилий от крановой нагрузки учитываются два крана при однопролетном или четыре крана при многопролетном здании. Очевидно, вероятность того, что на крюке каждого крана будет максимальный груз и тележки всех кранов будут максимально приближены к какой-то стойке ПРЗ, не равна единице. Этот фактор в [9] не учитывается, так же как и режим работы крана. Например, в [2] применяются следующие коэффициенты сочетаний: если учитываются два крана, то эти коэффициенты равны: 0,85 – при режимах работы кранов А1–А6; 0,95 – при режимах работы А7 и А8; если используются четыре крана, то соответственно 0,7 и 0,8.

Если крановая нагрузка из всех временных нагрузок является доминирующей, то, согласно [9], при составлении сочетаний усилия от крановой нагрузки не уменьшаются. Но если усилия от крановой нагрузки не являются доминирующими, их необходимо умножать на понижающий коэффициент  $\psi_0$  ([9], п. 6.4.3.2). Значения  $\psi_0$  приведены в табл. А1.1 [9] (Приложение А1). Но почему-то в этой таблице нет ни производственных зданий, ни крановых нагрузок. В национальном приложении их тоже нет, и поэтому составить сочетания усилий не представляется возможным.

Коэффициент надежности по нагрузке для крановых нагрузок, являющихся временными, принят 1,5 ([9], табл. А1.2(В)), то же приведено в национальном приложении. Столь существенное увеличение крановой нагрузки необоснованно прежде всего потому, что, как было сказано выше, все грузоподъемные краны оборудованы приборами по ограничению веса

поднимаемого груза. Эти приборы не позволяют поднимать груз, превышающий грузоподъемность крана более чем на 10 % («Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов»). В [2] коэффициент надежности принят 1,2. Также в [9] является завышенным и необоснованным значение коэффициентов надежности по нагрузке для постоянной нагрузки (от собственного веса металлоконструкций): 1,2 – для металлоконструкций, изготавливаемых на заводе; 1,3 – для металлоконструкций, изготавливаемых на строительной площадке.

Определение веса металлических конструкций в зависимости от места изготовления необоснованно. Изготовление их в заводских и вне заводских площадок производится только по чертежам конструкций металлических детализированных (КМД), при этом отступления не допускаются. В чертежах КМД указываемый вес металлических конструкций, как правило, является завышенным, поскольку определяется по весу заготовок, а не по весу деталей, образующих конструкцию.

### **ВЫВОДЫ**

1. Значения нормативных снеговых нагрузок, определяемые по СН 2.01.04–2019, не являются достаточно обоснованными. Значения нормативной снеговой нагрузки необходимо корректировать не чаще 20 лет [4, 10].

2. Методика определения ветровых нагрузок, предложенная в СН 2.01.05–2019, обуславливает значительное увеличение усилий в элементах каркаса здания. Усилия от ветровых нагрузок следует определять с учетом изменения ветрового давления по высоте зданий и сооружений.

3. Определение достоверных значений динамических коэффициентов при расчете крановых нагрузок по ТКП EN 1991-3–2009 не представляется возможным. Кроме того, в этом документе отсутствует национальное приложение, что делает ТКП EN 1991-3 неготовым для практического применения. СН 2.01.04, СН 2.01.05, ТКП EN 1991-3 и СН 2.01.01 являются копиями европейских документов, предназначенных для стран – членов Европейского комитета по стан-

дартизации. Республика Беларусь в этот Комитет не входит, поэтому Еврокоды не соответствуют техническим кодексам, ГОСТам и типовым проектам, используемым в Беларуси.

4. При расчете каркаса здания крановые нагрузки значительно и необоснованно завышаются, прежде всего, за счет неиспользования коэффициентов сочетаний, учитывающих количество кранов и режим работы последних, а также применения завышенного коэффициента надежности для временных нагрузок.

5. Определение нагрузок по действующим нормативным документам приводит к значительному увеличению материалоемкости строительных конструкций. Рекомендуется разработать нормативные документы по определению нагрузок на основе СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия», применяемого в России. Нормативные документы, разработанные с учетом сделанных замечаний, позволят существенно уменьшить материалоемкость строительных конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воздействие на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки: СН 2.01.04–2019. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 42 с.
2. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\*: СП 20.13330.2011. Введ. 20.05.2011. М.: Минрегион России, 2010. 91 с.
3. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования: ДБН В.1.2-2:2006. Киев, 2006.
4. Лопкина, В. А. Расчет и картирование снеговой нагрузки на поверхности земли / В. А. Лопкина // Криосфера земли. 2015. Т. XIX, № 1. С. 106–113.
5. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. М.: Стройиздат, 1978. 215 с.
6. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Ветровые воздействия: СН 2.01.05–2019. Введ. 08.09.2020. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 128 с.
7. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 3. Воздействия, вызванные кранами и механическим оборудованием: ТКП EN 1991-3–2009. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 75 с.
8. Возведение строительных конструкций зданий и сооружений: СН 10301–2019. Минск: Минстройархитектуры, 2019. 108 с.
9. Основы проектирования строительных конструкций: СН 2.01.01–2019. Введ. 08.09.2020. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 90 с.
10. Определение нормативных и расчетных значений снеговых нагрузок / И. Д. Грудев [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 4. С. 10–12.

Поступила 17.06.2022

Подписана в печать 18.08.2022

Опубликована онлайн 30.09.2022

#### REFERENCES

1. SN [Building Regulation] 2.01.04–2019. Impact on Structures. General Impacts. Snow Loads. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2020. 42 (in Russian).
2. SP [Code of Practice] 20.13330.2011. Loads and Impacts. Updated Edition of SNiP [Construction Standards and Regulations] 2.01.07–85\*. Moscow, Publishing House of OJSC “TsPP”, 2011. 91 (in Russian).
3. DBN [National Building Code] B.1.2-2:2006. Loads and Impacts. Design Standards. Kiev, 2006 (in Russian).
4. Lopkina V. A. (2015) Calculation and Mapping of Snow Load on the Ground Surface. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*, XIX (1), 106–113 (in Russian).
5. *Guidelines for Calculation of Buildings and Structures for the Action of the Wind*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 215 (in Russian).
6. SN [Building Regulation] 2.01.05–2019. Impact on Structures. General Impacts. Wind Effects. Minsk: Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2020. 128 (in Russian).
7. TKP [Technical Code of Common Practice] EN 1991-3–2009. Eurocode 1. Impacts on Structures. Part 3. Impacts Caused by Cranes and Mechanical Equipment. Minsk: Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2010. 75 (in Russian).
8. SN [Building Regulation] 10301–2019. Erection of Building Structures of Buildings and Structures. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2019. 108 (in Russian).
9. SN [Building Regulation] 2.01.01–2019. Basics of Designing Building Structures. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2020. 90 (in Russian).
10. Grudev I. D., Filippov V. V., Kornilov T. A., Rykov A. V. (2007) Determination of Normative and Design Values of Snow Loads. *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, (4), 10–12 (in Russian).

Received: 17.06.2022

Accepted: 18.08.2022

Published online: 30.09.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-392-396>

UDC 691.32:69.04:693.554-486:691.327

## Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement

S. N. Leonovich<sup>1)</sup>, E. A. Sadovskaya<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Abstract.** Concrete is the most commonly used building material worldwide. One of its main disadvantages is the fragility of fracture and low crack resistance. The use of dispersed reinforcement of concrete composites is a promising direction in solving this type of problem. Dispersed fibers, evenly distributed over the entire volume of the material, create a spatial frame and contribute to the inhibition of developing cracks under the action of destructive forces. In order to increase the fracture toughness of concrete, dispersed fiber reinforcement is increasingly used in practice. The beginning of crack nucleation occurs at the nanoscale in the cement matrix. Thus, the use of nano-reinforcement with dispersed nanofibers can have a positive effect on the crack resistance of the cement composite. It is proposed to consider carbon nanotubes as such nanofibers. The presence of carbon nanofibers changes the microstructure and nanostructure of cement modified with carbon nanotubes. The result of the processes occurring in capillaries and cracks are deformations in the intergranular matrix, the free flow of which is prevented by rigid clinker grains and nanocarbon tubes, which creates a certain stress intensity at the tips of the separation cracks. The working hypothesis is confirmed that the required fracture toughness of structural concrete is provided by multi-level reinforcement: at the level of the crystalline aggregate of cement stone – carbon nanotubes, and at the level of fine-grained concrete – various macro-sized fibers (steel, polymer). Reinforcement of a crystalline joint with carbon nanotubes leads to an increase in the fracture toughness of the matrix (cement stone) by 20 %, compressive strength by 12 %, and tensile strength in bending by 20 %. When reinforcing at the level of fine-grained concrete, we obtain a composite – nanofibre-reinforced concrete with fracture toughness.

**Keywords:** nanoparticles, concrete, fracture toughness, fiber

**For citation:** Leonovich S. N., Sadovskaya E. A. (2022) Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement. *Science and Technique*. 21 (5), 392–396. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-392-396>

## Нанофибробетон: многоуровневое армирование

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович<sup>1)</sup>, магистр Е. А. Садовская<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

**Реферат.** Бетон является наиболее распространенным строительным материалом во всем мире. Основными его недостатками являются хрупкость при растяжении и низкая трещиностойкость. Применение дисперсного армирования бетонных композитов – перспективное направление в решении такого рода задач. Дисперсные волокна, равномерно распределенные по всему объему материала, создают пространственный каркас и способствуют торможению развития трещин под действием разрушающих сил. Для повышения трещиностойкости бетона на практике все чаще применяют армирование дисперсными волокнами. Начало зарождения трещины происходит на наноуровне в цементной матрице. Таким образом, применение наноармирования дисперсными нановолокнами может положительно сказаться на трещиностойкости цементного композита. В качестве таких нановолокон предлагается рассматривать углеродные нанотрубки. Присутствие углеродных нановолокон изменяет микроструктуру и наноструктуру цемента, модифицированного углеродными нанотрубками. Результатом процессов, происходящих в капиллярах и трещинах, являются

### Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 368-61-56  
sleonovich@mail.ru

### Address for correspondence

Leonovich Sergey N.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 368-61-56  
sleonovich@mail.ru

деформации в межзерновой матрице, свободному течению которых препятствуют жесткие зерна клинкера и нанотрубокарбонные трубки, что создает в вершинах раздельных трещин некоторую интенсивность напряжения. Подтверждена рабочая гипотеза, что требуемая трещиностойкость конструкционного бетона обеспечивается многоуровневым армированием: на уровне кристаллического заполнителя цементного камня – углеродными нанотрубками, на уровне мелкозернистого бетона – различными видами макроразмерной фибры (стальные, полимерные). Армирование углеродными нанотрубками кристаллического сростка приводит к повышению показателя вязкости разрушения матрицы (цементного камня) на 20 %, прочности на сжатие на 12 %, прочности на растяжение при изгибе на 20 %. При армировании на уровне мелкозернистого бетона получаем композит – нанотрубокарбонбетон с вязкостью разрушения.

**Ключевые слова:** наночастицы, бетон, трещиностойкость, волокно

**Для цитирования:** Леонович, С. Н. Нанотрубокарбонбетон: многоуровневое армирование / С. Н. Леонович, Е. А. Садовская // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 5. С. 392–396. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-392-396>

## Introduction

Concrete is the most commonly used building material worldwide. One of its main disadvantages is the fragility of fracture and low crack resistance. The use of dispersed reinforcement of concrete composites is a promising direction in solving this type of problem. Dispersed fibers, evenly distributed over the entire volume of the material, create a spatial frame and contribute to the inhibition of developing cracks under the action of destructive forces.

The beginning of crack nucleation occurs at the nanoscale in the cement matrix. Thus, the use of nano-reinforcement with dispersed nanofibers can have a positive effect on the crack resistance of the cement composite. Carbon nanotubes (CNTs) can be considered as such nanofibers. The influence of CNTs on the microstructure and nanostructure of the modified cement stone depends on the type of carbon material, its physical and chemical characteristics, the geometrical parameters of the fibers, and the uniformity of dispersion in the composite body.

Ensuring the required fracture toughness (crack resistance) of structural concrete is solved in

a complex way: we reinforce the crystalline intergrowth of cement stone with carbon nanotubes, and fine- and coarse-grained concrete are reinforced with steel, polymer, basalt fibers or their combination of various concentrations. If concrete is considered as a multilevel structure, then the onset of crack nucleation occurs at the nanoscale in the cement matrix, followed by growth to the size of macrocracks (Fig. 1). Dispersed fibers, evenly distributed over the entire volume of the material, create a spatial frame and contribute to the inhibition of developing cracks under the action of destructive forces [1–8].

Carbon nanotubes are used as nanofibers, the effect of which on the microstructure and nanostructure of the modified cement stone depends on the type of carbon material, its physical and chemical characteristics, the geometric parameters of the fibers, and the uniformity of dispersion in the composite body. The presence of carbon nanofibers changes the microstructure and nanostructure of CNT-modified cement. A decrease in capillary and total porosity was recorded, followed by an improvement in the pore structure.

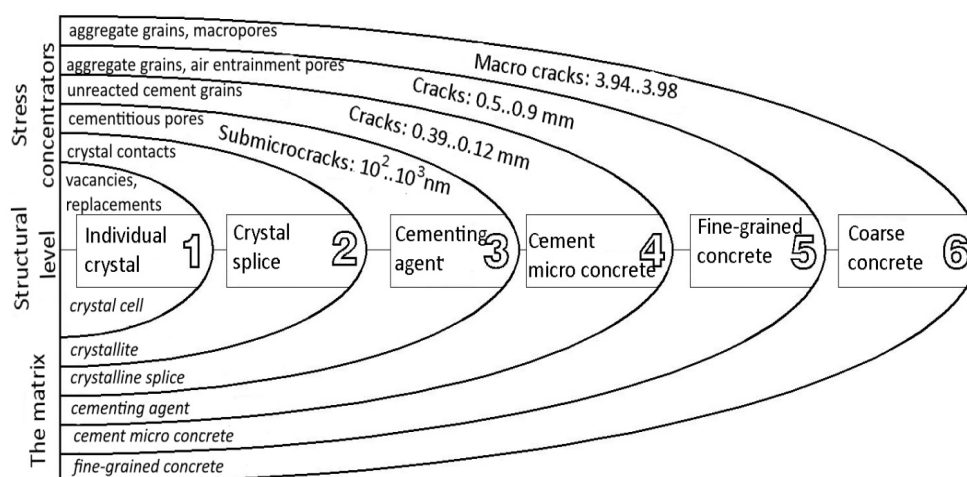


Fig. 1. Multilevel structure of nanofiber-reinforced concrete

The result of the processes occurring in capillaries and cracks are deformations in the intergranular matrix, the free flow of which is prevented by rigid clinker grains and nanocarbon tubes, which creates a certain stress intensity at the tips of the separation cracks. The stress intensity, as well as the stress-strain state near the tops of capillaries and cracks, are determined by the crack resistance criterion ( $K_C$ ) and stress intensity factors ( $K_{IC}$ ,  $K_{IIIC}$ ) [9, 10].

## Materials

The main components of concrete mixtures are: binder – Portland cement PC 500 D0; modifying substance – carbon nanomaterial (CNM): average diameter of tubes and fibers 10–300 nm, average length of tubes and fibers 0.01–20.00  $\mu$ , bulk density 0.15–0.22 g/cm<sup>3</sup>, ash content not more than 5 %, specific adsorption surface from 60 m<sup>2</sup>/g; superplasticizer (SP) in the form of an aqueous solution – a polycarboxylate copolymer with a density of 1.1–1.14 g/ml, pH = 6–8, viscosity 230–330 cP, non-volatile substances content 39–41 %, water-reducing capacity over 40 %; water for mixing and subsequent hardening (Tab. 1).

The results of testing the studied compositions for fracture toughness are shown in Fig. 2a, by the method of nanoindentation (Fig. 2b), strength indicators (Fig. 3).

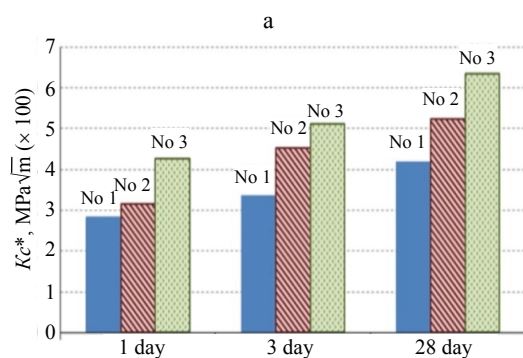
The presented results indicate that the introduction of carbon nanotubes contributes to an increase in the fracture toughness index of cement stone by 50 % relative to the unmodified composition (No 1) and by 21 % relative to the composition with a plasticizer (No 2).

An analysis of the obtained strength indicators indicates the effect of carbon nanotubes on the compressive and flexural strength of the cement stone. The increase in compressive strength with the introduction of CNTs was 12 % relative to composition No 2 containing a plasticizer without CNTs as an additive. The joint effect of the plasticizer and CNT (composition No 3) had an increase in compressive strength by 21–23 % relative to the composition without additives (composition No 1). The increase in the flexural strength of the cement stone was 21 % (37 days) with the introduction of CNTs into the plasticizer (composition No 3 relative to composition No 2) and 51 % (37 days) with the addition of CNTs and a plasticizer (composition No 3) relative to the composition without additives (composition No 1).

Table 1

The composition of the raw mixture of nanocement stone

| Composition | The composition of the raw mixture, mass % |          | The amount of additive introduced from the mass of cement, % | W/C  | The composition of the additive |                                                | Normal density ratio |
|-------------|--------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------|------|---------------------------------|------------------------------------------------|----------------------|
|             | Cement                                     | Additive |                                                              |      | Mass fraction SP to cement, %   | Mass fraction of solid nanocarbon to cement, % |                      |
| 1           | 99.2                                       | 0.8      | –                                                            | 0.26 | –                               | –                                              | 0.26                 |
| 2           |                                            |          | 0.8                                                          | 0.21 | 0.4                             | –                                              | 0.21                 |
| 3           |                                            |          | 0.8                                                          | 0.21 | 0.4                             | 0.0004                                         | 0.21                 |



| Indicator                                       |         | Sample 1  | Sample 3  |
|-------------------------------------------------|---------|-----------|-----------|
| Modulus of elasticity, GPa / Standard deviation | Phase 1 | 13.0/3.3  | 21.2/4.9  |
|                                                 | Phase 2 | 23.2/10.6 | 30.7/9.1  |
|                                                 | Phase 3 | 50.6/8.6  | 62.8/10.7 |
| Rigidity, GPa / Standard deviation              | Phase 1 | 0.93/0.21 | 1.04/0.23 |
|                                                 | Phase 2 | 1.84/0.74 | 1.59/0.87 |
|                                                 | Phase 3 | 2.95/1.45 | 4.94/1.28 |
| Volume fraction of the phase, %                 | Phase 1 | 61.9      | 46.9      |
|                                                 | Phase 2 | 34.0      | 44.1      |
|                                                 | Phase 3 | 4.1       | 9.0       |

Fig. 2. Test results: a – histogram of the change in the conditional critical stress intensity factor at different ages for composition 1 (without additive), composition 2 (SP), composition 3 (SP + CNT); b – average values of the modulus of elasticity and stiffness in three phases (after the dividing line, the standard deviation in this phase is indicated)

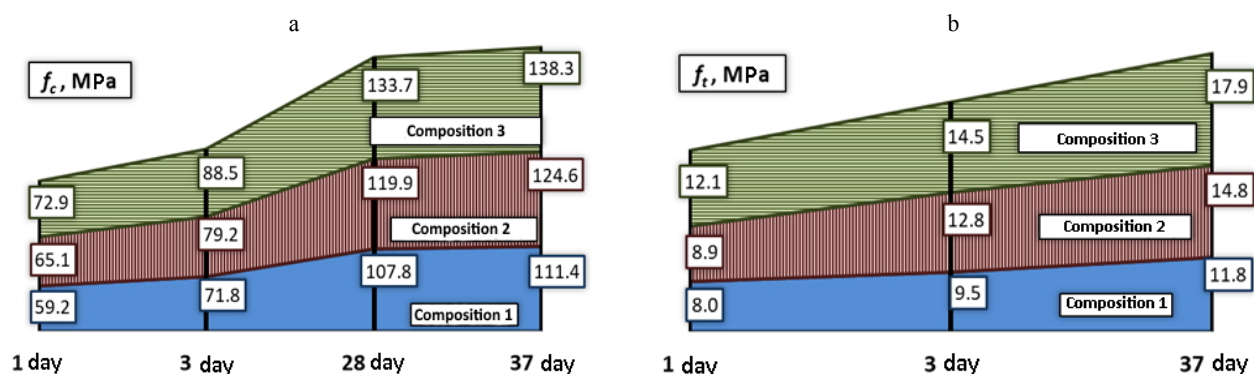


Fig. 3. The results of tests of cement stone for: a – axial compression; b – stretching in bending

### Studies of heavy nanofiber-reinforced concrete

For the strength and fracture toughness of nanoconcrete, 100×100×400 mm prism samples were made, differing in different contents of the main components of the mixture (Tab. 2). Different types of fiber reinforcement were introduced

into each of the nanoconcrete matrices to contain cracks at the level of fine-grained concrete: F1 – fiber from sheet steel with a wave profile (volume fraction  $\mu_V = 1\%$ ); F2 – steel anchor fiber ( $\mu_V = 1\%$ ); F3 – wavy polymer fiber ( $\mu_V = 0.44\%$ ). The obtained values of the stress intensity factor in the studied compositions are shown in Fig. 4.

Table 2

Formulations of nanofiber-reinforced concrete compositions

| Composition | Component consumption, %                              |                 |      |      |                          |                                                |
|-------------|-------------------------------------------------------|-----------------|------|------|--------------------------|------------------------------------------------|
|             | The ratio of the components of the concrete matrix, % |                 |      |      | Additive modified CNT, % |                                                |
|             | Cement                                                | Rubble fraction |      | Sand | By weight of binder      | By mass fraction of solid nanocarbon to cement |
|             |                                                       | 5–10            | 5–20 |      |                          |                                                |
| A           | 18                                                    | –               | 45   | 37   | 0.8                      | 0.00060                                        |
| B           | 19                                                    | –               | 45   | 36   | 0.5                      | 0.00038                                        |
| C           | 20                                                    | 38              | –    | 42   | 0.7                      | 0.00038                                        |
| D           | 23                                                    | 39              | –    | 38   | 0.7                      | 0.00060                                        |

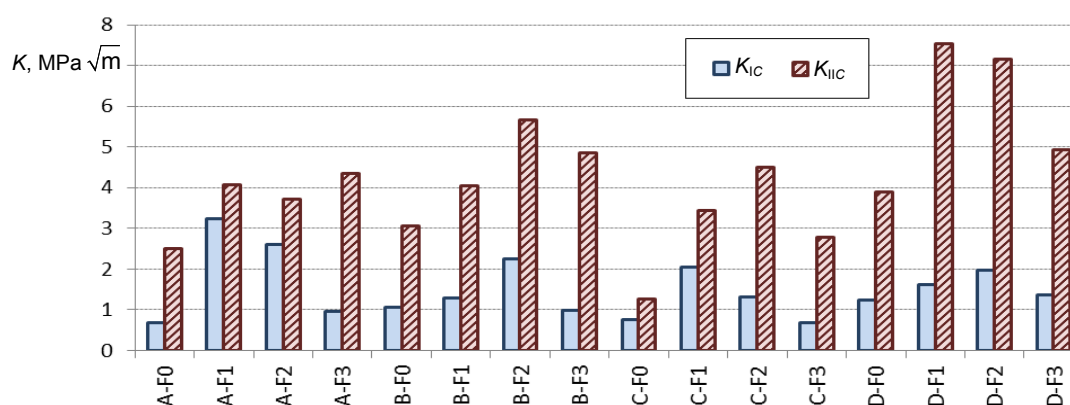


Fig. 4. Results of testing nanofiber-reinforced concrete for fracture toughness:  $K_{IC}$  – normal separation;  $K_{IIc}$  – transverse shear



Fiber reinforcement has a positive effect on the crack resistance of nanofiber-reinforced concrete. The increase in fracture toughness  $K_{IC}$  and  $K_{IIC}$  with the addition of fiber may be due to the fiber's resistance to slip of crack surfaces. Nanofiber-reinforced concretes with multi-level dispersed reinforcement are promising materials for use in structures with increased requirements for crack resistance, frost resistance, water resistance, and, in combination, durability [11].

## CONCLUSION

The working hypothesis is confirmed that the required fracture toughness of structural concrete is provided by multi-level reinforcement: at the level of the crystalline joint of cement stone – carbon nanotubes, and at subsequent levels – macro-sized fiber fibers. Reinforcement of a crystalline joint with carbon nanotubes leads to an increase in the fracture toughness of the matrix (cement stone) by 20 %, compressive strength by 12 %, and tensile strength in bending by 20 %. When reinforcing at the level of fine-grained concrete, we obtain a composite – nanofiber-reinforced concrete with fracture toughness  $K_{IC} = (1.3–3.5) \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,  $K_{IIC} = (3.4–7.5) \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . This will make it possible to switch to the production of nanofiber-reinforced concrete for industrial, housing and communal and road construction facilities.

## REFERENCES

1. Khroustalev B. M., Leonovich S. N., Potapov V. V., Grushevskaya E. N. (2017) Composite Materials Based on Cement Binders Modified with  $\text{SiO}_2$  Nanoadditives. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (6), 459–465. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-6-459-465>.
2. Zhdanok S. A., Potapov V. V., Polonina E. N., Leonovich S. N. (2021) Modification of Cement Concrete by Admixtures Containing Nanosized Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (3), 648–653. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02163-y>.
3. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. (2019) Physicomechanical Characteristics of Concrete Modified by a Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92 (1), 12–18. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01902-0>.
4. Polonina E. N., Leonovich S. N., Koleda E. A. (2018) Physical and Mechanical Properties of Nano Concrete. *Vestnik Inzhenernoi Shkoly Dal'nevostochnogo Federal'nogo Universiteta = Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*, (4), 100–111 (in Russian).
5. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. (2018) The Influence of the Plasticizing Additive Containing Carbon Nanomaterial on the Properties of Self-Compacting Concrete. *Vestnik Grahzhanskikh Inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*. 2018. 71 (6), 76–85 (in Russian).
6. Polonina E. N., Potapov V. V., Zhdanok S. A., Leonovich S. N. (2021) Mechanism for Improving the Strength of a Cement Material Modified by  $\text{SiO}_2$  Nanoparticles and Multiwall Carbon Nanotubes. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 94 (1), 67–78. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02274-0>.
7. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. (2018) Strength Enhancement of Concrete with a Plasticizer on the Basis of Nano-Structured Carbon. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, (6), 67–72 (in Russian).
8. Sadovskaya E. A., Leonovich S. N., Budrevich N. A. (2021) Multiparametric Method for Assessing the Quality Indicators of Nanofiber-Reinforced Concrete for a Construction Site. *Beton i Zhelezobeton*, (4), 20–28 (in Russian).
9. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Sadovskaya E. A., Leonovich S. N. (2021) Fracture Toughness of Carbon Nanotubes Modified Cement Based Materials. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Vestnik of Brest State Technical University*, (3), 48–53. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53> (in Russian).
10. Sadovskaya E. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Potapov V. V. (2021) Critical Stress Intensity Coefficient at Transverse Shear for Nanofibrobeton. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, (9), 41–46. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46> (in Russian).
11. Sadovskaya E. A., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Polonina E. N. (2020) Tensile Strength of Nanofibrous Concrete. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (4), 1015–1019. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02202-8>.

Received: 14.04.2022

Accepted: 29.06.2022

Published online: 30.09.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-397-409>

УДК 69.057

## Комплексное исследование развития индустриального домостроения

В. Ю. Гуринович<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Индустриальное домостроение – одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений исследований в области строительства и строительных технологий в мире. Для изучения направлений и результативности научных исследований, определения ведущих стран, учреждений, научных журналов и уровня развития индустриального домостроения в Республике Беларусь в разрезе экономически развитых государств выполнен наукометрический анализ на базе аналитической системы SciVal с использованием инструментов визуализации, количественных и качественных наукометрических метрик. Интенсивный рост количества публикаций в области индустриального домостроения и показателей анализируемых наукометрических метрик подтверждает тот факт, что индустриальное домостроение привлекает все большее количество исследователей во всем мире и является перспективным направлением для изучения. По результатам анализа определено, что основные тематики исследований в области индустриального домостроения – это проектирование и информационное моделирование, организация строительства и производства сборных конструкций, доставка конструкций на строительную площадку и их монтаж, в том числе надежность, экономичность, экологичность индустриального домостроения. Следует отметить, что изучению технологий и организации производства железобетонных изделий в заводских условиях и управления производством уделяется меньшее внимание, поэтому необходимы исследования в данных направлениях. Результаты проведенного наукометрического анализа позволяют выявить тенденции, определить приоритетные направления научных исследований и их связь с другими областями науки и могут являться базой для обнаружения пробелов в текущих исследованиях в области индустриального домостроения.

**Ключевые слова:** наукометрический анализ, индустриальное домостроение, сборные железобетонные конструкции, производство сборных конструкций, наукометрические метрики, исследование, тематический кластер, библиографический поиск

**Для цитирования:** Гуринович, В. Ю. Комплексное исследование развития индустриального домостроения / В. Ю. Гуринович // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 397–409. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-397-409>

## Comprehensive Study of Development of Prefabricated Construction

V. Yu. Gurinovich<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Prefabricated construction is one of the most intensively developing areas of research in the field of construction and building technologies in the world. To study the directions and effectiveness of scientific research, identify leading countries, institutions, scientific journals and the level of development of prefabricated construction in the Republic of Belarus in the context of economically developed countries, a scientometric analysis was carried out based on the SciVal analytical system using visualization tools, quantitative and qualitative scientometric metrics. The intensive growth in the number of publications in the field of prefabricated construction and the indicators of analyzed scientometrics metrics confirms the fact that prefabricated construction attracts an increasing number of researchers around the world and is a promising area

### Адрес для переписки

Гуринович Виталий Юрьевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-74-12  
[Gurinovich@bntu.by](mailto:Gurinovich@bntu.by)

### Address for correspondence

Gurinovich Vitaliy Yu.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-74-12  
[Gurinovich@bntu.by](mailto:Gurinovich@bntu.by)



of scientific research. Based on the results of the analysis, it was determined that the main topics of research in the field of prefabricated construction are design and information modeling, organization of construction and production of prefabricated structures, delivery of structures to the construction site and their installation, including reliability, efficiency, environmental friendliness of prefabricated construction. At the same time, less attention is paid to topics in the field of technology research and the organization of the production of reinforced concrete products in the factory and production management, which requires further research in these areas. The results of the executed scientometric analysis make it possible to identify trends, priority areas for further scientific research and their relationship with other areas of science, and can be a scientific basis for identifying gaps in current research in the field of prefabricated construction.

**Keywords:** scientometric analysis, prefabricated construction, precast reinforced concrete structures, precast production, scientometric metrics, research, topic cluster, bibliographic search

**For citation:** Gurinovich V. Yu. (2022) Comprehensive Study of Development of Prefabricated Construction. *Science and Technique*. 21 (5), 397–409. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-21-5-397-409> (in Russian)

## Введение

Государственная политика в области жилищного строительства в части возведения доступного жилья и обеспечения прогнозных показателей средней стоимости 1 м<sup>2</sup> жилья способствует развитию в республике индустриального домостроения как основного метода, позволяющего строить жилье с минимальными затратами и в кратчайшие сроки [1, 2]. В ряде стран рост индустриального домостроения также определяется государственной политикой развития высокотехнологичных, экологических и экономических методов строительства вне стройплощадки [3].

Средняя доля зданий из сборного железобетона в государствах Европейского союза составляет 20–25 %, в странах Северной Европы она достигает 40–50 %, в Российской Федерации – порядка 30 %, а на долю Китая приходится более 30 % мирового рынка индустриального строительства [4, 5]. В Республике Беларусь доля возведения зданий в индустриальном исполнении составляет 40–45 %.

Технология строительства зданий из сборных железобетонных конструкций и элементов в мировой практике известна давно, но только в последнее десятилетие данное направление привлекает все больше внимания ученых и практикующих специалистов [6, 7]. Обзор литературы, входящей в международные базы научного цитирования, показывает значительный рост количества публикаций по данной тематике начиная с 2015 г.

## Планирование проведения исследований

Для анализа направлений и тенденций научных исследований в области индустриального домостроения, определения уровня его развития в Республике Беларусь в разрезе экономи-

чески развитых государств, изучения структуры цитирования, ключевых исследователей, учреждений, стран и степени их взаимодействия проведен наукометрический анализ, который позиционируется как основной инструмент изучения отдельных направлений науки, сетей научных коммуникаций, средств оценки результативности научных исследований [8]. Наукометрический анализ выполнен в аналитической системе SciVal, которая обеспечивает представление и оценку результатов научно-исследовательской деятельности более 12000 организаций (вузов, научно-исследовательских организаций и центров) из 230 стран с использованием инструментов визуализации и современных метрик цитируемости. В SciVal все публикации сгруппированы по областям научных исследований в 1500 базовых тематических кластерах, которые включают 96000 отдельных предметных категорий. Анализ научных исследований в области индустриального домостроения проводился по состоянию на декабрь 2021 г. Исследования были разделены на отдельные этапы, очередность проведения которых представлена на рис. 1.

На первом этапе проведен библиографический поиск научной литературы в области индустриального домостроения в трех тематических кластерах аналитической системы SciVal, включающих более 250 отдельных предметных категорий в строительстве. На втором выполнены наукометрический анализ результатов исследований, тематик, ключевых слов, цитирования, журналов, авторов, учреждений и оценка результативности научных исследований в отобранных предметных категориях. На завершающем этапе проведено обсуждение результатов наукометрического анализа, закономерностей и тенденций в области индустриального домостроения.



Рис. 1. Схема проведения исследований

Fig. 1. Workflow of study

### Библиографический поиск

Библиографический поиск выполнен в трех тематических кластерах аналитической системы SciVal: TC.295 «Строительство, строительная промышленность, управление проектами» (Construction, Construction Industry, Project Management), ТК.68 «Бетоны, прочность на сжатие, цементы» (Concretes, Compressive Strength, Cements) и ТК.137 «Железобетон, бетоны, сталь» (Reinforced Concrete, Concretes, Steel). Анализ публикационной активности в выбранных тематических кластерах за период с 2011 по 2020 г. показал интенсивный ежегод-

ный рост публикаций в каждом тематическом кластере начиная с 2015 г. (рис. 2).

По результатам проведения библиографического поиска в трех кластерах выбраны две предметные категории Т.26767 «Сборные здания, заводское производство, сборный железобетон» (Prefabricated Buildings, Off-Site, Precast Concrete) и Т.57073 «Готовые бетонные изделия, производство/планирование, управление» (Ready Mixed Concrete, Production/Scheduling, Dispatching), непосредственно отражающие результаты исследований в области промышленного домостроения.

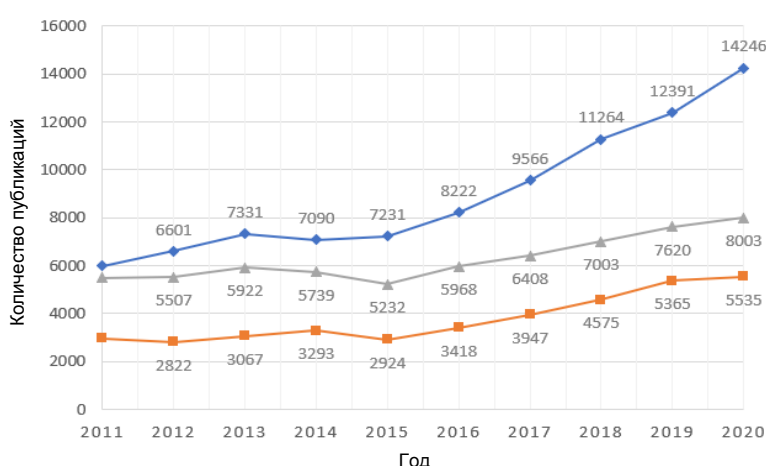


Рис. 2. Количество публикаций в тематических кластерах в 2011–2020 гг.:

—◆— ТК.68; —■— ТК.137; —▲— TC.295

Fig. 2. Number of publications in topic clusters in 2011–2020: —◆— concretes, compressive strength, cements (TK.68); —■— reinforced concrete, concrete, steel (TK.137); —▲— construction, construction industry, project management (TC.295)

Для повышения качества наукометрического анализа в отобранных предметных категориях были проанализированы только статьи в рецензируемых журналах, как демонстрирующие более полное и качественное представление результатов исследований в предметной области, и исключены книжные обзоры, тезисы, препринты и пр. Также дополнительно отсеяны публикации по областям исследований, которые включены в анализируемые предметные категории, но по направлению не относятся к индустриальному домостроению (биология, медицина, сельское хозяйство, наука о Земле и пр.).

### Наукометрический анализ

Наукометрический анализ выполнен за период наибольшей публикационной активности результатов исследований с 2016 по 2020 г. по количественным и качественным показателям для 474 отобранных статей. В качестве количественных метрик приняты показатели количества публикаций, цитирований и просмотров публикаций, вовлеченности стран, учреждений и журналов, а в качестве качественных – показатели нормализованного по области индекса

цитирования, актуальности темы исследований, доли публикаций на квартиль журнала.

За период 2016–2020 гг. ежегодное количество публикаций результатов исследований в области индустриального домостроения в предметных категориях Т.26767 и Т.57073 увеличилось практически вдвое (рис. 3).

Общее количество публикаций показывает только публикационную активность, но не отражает значимости исследования и интереса к его результатам. Для определения значимости публикаций в научных исследованиях и интереса к публикациям проанализированы показатели цитируемости и количества просмотров публикаций за период 2016–2020 гг. (рис. 4).

Для определения ведущих стран, учреждений и журналов по вовлеченности в исследования в области индустриального домостроения отобраны и распределены по анализируемым показателям 20 стран, 20 учреждений и 20 научных журналов. Показатели научной результативности стран, учреждений и научных журналов в предметных категориях Т.26767 и Т.57073 за период 2016–2020 гг. представлены в табл. 1–3.

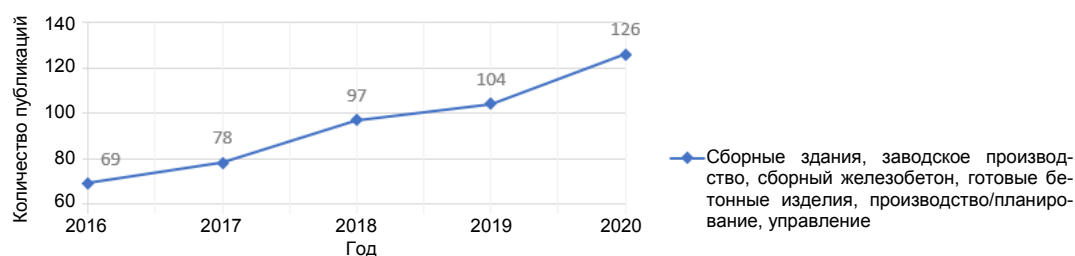


Рис. 3. Общее количество публикаций в предметных категориях Т.26767 и Т.57073

Fig. 3. Total number of publications in topics T.26767 and T.57073

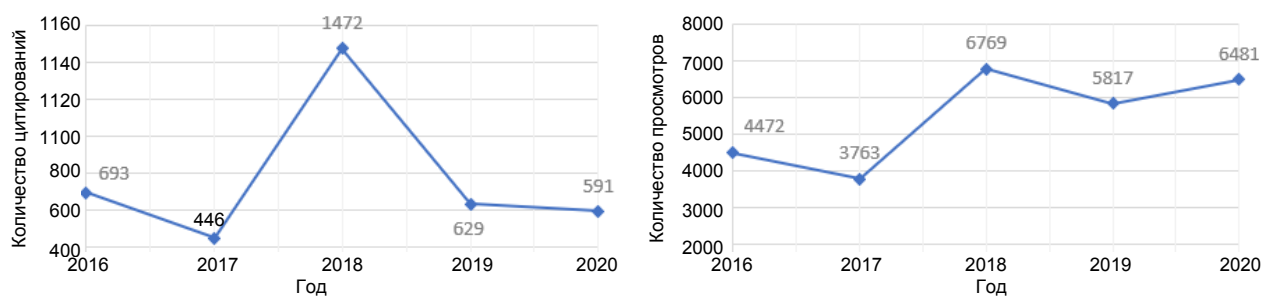


Рис. 4. Количество цитирований и просмотров публикаций в предметных категориях Т.26767 и Т.57073

Fig. 4. Number of citations and views of publications in topics T.26767 and T.57073

Таблица 1

**Ведущие страны по результативности исследований**  
**Leading countries in research performance**

| № п/п | Страна/регион        | Количество |            | Нормализованный индекс цитирования | Количество цитирований |
|-------|----------------------|------------|------------|------------------------------------|------------------------|
|       |                      | публикаций | просмотров |                                    |                        |
| 1     | Китай                | 120        | 7796       | 1,61                               | 1626                   |
| 2     | Австралия            | 69         | 6815       | 2,01                               | 1245                   |
| 3     | Малайзия             | 58         | 3943       | 0,83                               | 254                    |
| 4     | Великобритания       | 53         | 3922       | 1,15                               | 521                    |
| 5     | США                  | 40         | 3095       | 2,32                               | 544                    |
| 6     | Гонконг              | 33         | 3990       | 3,06                               | 786                    |
| 7     | Индия                | 24         | 835        | 0,31                               | 35                     |
| 8     | Канада               | 18         | 1050       | 1,16                               | 254                    |
| 9     | Швеция               | 18         | 852        | 1,47                               | 89                     |
| 10    | Иран                 | 13         | 716        | 1,89                               | 102                    |
| 11    | Германия             | 11         | 537        | 0,33                               | 32                     |
| 12    | Российская Федерация | 11         | 174        | 0,49                               | 6                      |
| 13    | Сингапур             | 9          | 1410       | 3,30                               | 218                    |
| 14    | Словакия             | 8          | 480        | 1,03                               | 23                     |
| 15    | Египет               | 7          | 330        | 0,54                               | 45                     |
| 16    | Индонезия            | 7          | 263        | 0,11                               | 4                      |
| 17    | Новая Зеландия       | 7          | 378        | 1,42                               | 31                     |
| 18    | Южная Корея          | 7          | 588        | 1,41                               | 65                     |
| 19    | Чешская Республика   | 6          | 224        | 0,69                               | 18                     |
| 20    | Италия               | 6          | 520        | 0,87                               | 41                     |

Низшее наивысшее значение метрики.

Таблица 2

**Ведущие учреждения по результативности исследований**  
**Leading institutions in terms of research performance**

| № п/п | Учреждение                                        | Количество |            | Нормализованный индекс цитирования | Количество цитирований |
|-------|---------------------------------------------------|------------|------------|------------------------------------|------------------------|
|       |                                                   | публикаций | просмотров |                                    |                        |
| 1     | Харбинский технологический институт               | 25         | 756        | 0,66                               | 90                     |
| 2     | Гонконгский политехнический университет           | 25         | 2652       | 2,58                               | 572                    |
| 3     | Мельбурнский университет                          | 16         | 1734       | 2,17                               | 407                    |
| 4     | Университет Сайнс Малайзия                        | 14         | 1109       | 0,82                               | 74                     |
| 5     | Чунцинский университет                            | 12         | 1355       | 2,48                               | 360                    |
| 6     | Университет Технологии МАРА                       | 12         | 764        | 0,35                               | 22                     |
| 7     | Технологический университет Лулео                 | 11         | 436        | 1,34                               | 38                     |
| 8     | Университет Кертин                                | 10         | 1056       | 2,71                               | 216                    |
| 9     | Университет Нового Южного Уэльса                  | 10         | 665        | 0,98                               | 105                    |
| 10    | Университет Тун Хусейн Онн Малайзия               | 9          | 699        | 0,79                               | 40                     |
| 11    | Университет Альберты                              | 8          | 289        | 1,46                               | 28                     |
| 12    | Университет Утара Малайзия                        | 8          | 463        | 0,23                               | 18                     |
| 13    | Университет Западного Сиднея                      | 8          | 553        | 1,84                               | 63                     |
| 14    | Технический университет в Кошице                  | 7          | 370        | 0,84                               | 21                     |
| 15    | Университет Цинхуа                                | 7          | 616        | 4,22                               | 181                    |
| 16    | Министерство образования, Китай                   | 6          | 269        | 0,70                               | 22                     |
| 17    | Национальный университет Сингапура                | 6          | 1323       | 4,96                               | 218                    |
| 18    | Квинслендский технологический университет         | 6          | 767        | 2,15                               | 86                     |
| 19    | Мельбурнский королевский технологический институт | 6          | 792        | 3,38                               | 284                    |
| 20    | Ратгерский университет штата Нью-Джерси           | 6          | 872        | 4,10                               | 200                    |

Низшее наивысшее значение метрики.

Таблица 3

## Ведущие журналы по публикациям в области индустриального домостроения

## Leading sources in the field of prefabricated construction

| № п/п | Издание                                                                | Количество |            | Нормализованный индекс цитирования | Количество цитирований |
|-------|------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------------------------------|------------------------|
|       |                                                                        | публикаций | просмотров |                                    |                        |
| 1     | Journal of Cleaner Production                                          | 30         | 4534       | 2,88                               | 1115                   |
| 2     | IOP Conference Series: Materials Science and Engineering               | 29         | 839        | 0,81                               | 36                     |
| 3     | Journal of Construction Engineering and Management                     | 15         | 1470       | 1,41                               | 189                    |
| 4     | Malaysian Construction Research Journal                                | 15         | 470        | 0,10                               | 4                      |
| 5     | Automation in Construction                                             | 14         | 1916       | 3,27                               | 559                    |
| 6     | International Journal of Construction Management                       | 12         | 986        | 2,19                               | 159                    |
| 7     | Procedia Engineering                                                   | 12         | 706        | 2,28                               | 153                    |
| 8     | Engineering, Construction and Architectural Management                 | 9          | 675        | 2,37                               | 93                     |
| 9     | Lecture Notes in Civil Engineering                                     | 9          | 518        | 0,89                               | 7                      |
| 10    | Architectural Engineering and Design Management                        | 8          | 1259       | 3,46                               | 147                    |
| 11    | ICCREM 2020                                                            | 8          | 23         | 0,76                               | 2                      |
| 12    | Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering   | 8          | 345        | 0,60                               | 31                     |
| 13    | Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology | 7          | 88         | 0                                  | 0                      |
| 14    | ICCREM 2017                                                            | 7          | 176        | 1,09                               | 8                      |
| 15    | International Journal of Civil Engineering and Technology              | 7          | 375        | 0,09                               | 9                      |
| 16    | Jurnal Teknologi                                                       | 7          | 640        | 0,61                               | 35                     |
| 17    | Buildings                                                              | 6          | 328        | 1,58                               | 60                     |
| 18    | Construction Innovation                                                | 6          | 736        | 1,86                               | 123                    |
| 19    | ICCREM 2018                                                            | 6          | 152        | 0,53                               | 4                      |
| 20    | ICCREM 2019                                                            | 6          | 144        | 2,08                               | 8                      |

Низшее  наивысшее значение метрики.

Динамика изменения показателя нормализованного по области индекса цитирования (Field-Weighted Citation Impact), определяющего научный уровень публикаций, представлена на рис. 5. Для предметных категорий Т.26767 и Т.57073 среднее значение данного показателя за период 2016–2020 гг. составило 1,15, что демонстрирует цитируемость публикаций анализируемых предметных категорий на 15 % больше мирового.

Показатель актуальности темы исследований (Topic Prominence), который отражает популярность (известность) темы, изображен на рис. 6. Для предметных категорий Т.26767 и Т.57073 данный параметр увеличился с 2016 г. на 14,2 и 14,7 % соответственно.

Доля публикаций в журнальных квартилях отражает авторитетность публикации. За анализируемый период 2016–2020 гг. в журналах пер-

вого квартиля в среднем издавалось около 38 % публикаций предметных категорий Т.26767 и Т.57073. Распределение публикаций анализируемых предметных категорий по квартилям журналов за 2016–2020 гг. представлено на рис. 7.

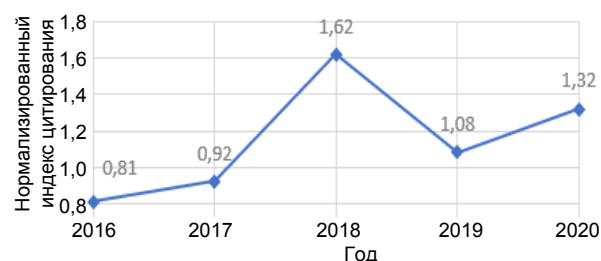


Рис. 5. Динамика изменения нормализованного показателя цитирования публикаций в предметных категориях Т.26767 и Т.57073

Fig. 5. Dynamics of change in the normalized citation rate of publications in topics T.26767 and T.57073

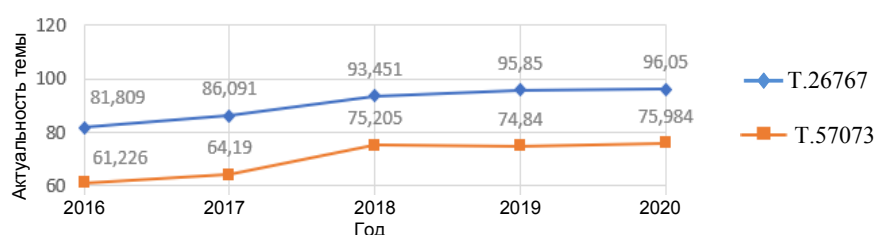


Рис. 6. Актуальность предметных категорий T.26767 и T.57073

Fig. 6. Topic prominence T.26767 and T.57073

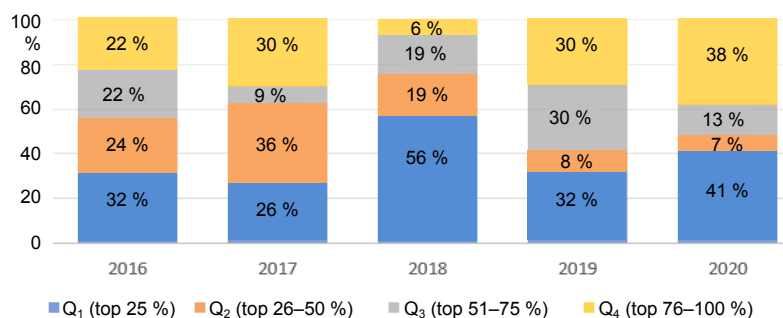


Рис. 7. Доля публикаций предметных категорий T.26767 и T.57073 в журнальных квартилях

Fig. 7. Proportion of publications of topics T.26767 and T.57073 in journal quartiles

## Обсуждение результатов исследований

Возведение зданий и сооружений из сборных железобетонных конструкций является одним из основных методов строительства во многих европейских странах и в последнее время интенсивно развивается в Азиатском регионе – в Китае, Малайзии, Индии, Южной Корее, Иране и др. Индустриальное домостроение рассматривается в зарубежной практике как инструмент оптимизации строительства за счет развития производства строительных изделий вне стройплощадки [3, 9].

Среди лидеров по объемам индустриального домостроения выделяются скандинавские страны, в частности Швеция, а по уровню автоматизации и роботизации промышленного изготовления строительных конструкций мировое лидерство удерживает Япония. Производительность японских домостроительных заводов в семь раз превышает соответствующие показатели европейских предприятий [10].

Несмотря на успехи индустриализации жилищного строительства, в большинстве экономически развитых стран до сих пор преобладают методы строительства без применения сборных железобетонных конструкций.

Так, в США и Турции доля зданий из сборного железобетона составляет всего 6 и 2 % соответственно [4].

Преимущества технологии сборного железобетона представлены в исследованиях [11–16] и определяют, прежде всего, высокое качество, сокращение продолжительности и стоимости строительства, снижение трудовых и материальных ресурсов, повышение безопасности строительства, а также экологичность строительства, которая обеспечивается сокращением отходов. К основным ограничениям интенсивного развития индустриального домостроения в мировой строительной практике относят отсутствие квалифицированных рабочих и специалистов, опыта проектирования зданий из сборных железобетонных конструкций, ограниченное архитектурное разнообразие зданий, сложность доставки крупногабаритных конструкций на стройплощадки в городских условиях, низкую сейсмостойчивость зданий из сборного железобетона, а также государственную политику в области развития индустриального строительства [4]. Следует отметить, что на развитие индустриального домостроения в отдельных регионах оказывают влияние климатические условия, определяющие приоритет

выбора альтернативных методов строительства, имеющих преимущества по срокам и стоимости.

Результаты сравнения эффективности индустриального домостроения с традиционными методами возведения зданий, предусматривающими проведение всего цикла строительства в условиях стройплощадки, оказались весьма противоречивыми. Так, L. Jaillon и C. S. Poon [17] определили, что сборное строительство индивидуальных жилых домов в Индии по типовым проектам может быть эффективно для массового возведения более 100 жилых зданий площадью примерно 25 м<sup>2</sup>, а строительство одного индивидуального двухэтажного жилого дома в индустриальном исполнении привело к увеличению стоимости на 21 %, но сокращению продолжительности строительства на 49 %. Однако, согласно исследованиям авторов [16], строительство из сборных железобетонных конструкций в Гонконге обеспечивает сокращение сроков до 15 % и потребность в рабочей силе на стройплощадке до 16 %, при этом стоимость строительства увеличивается незначительно, в среднем на 1,4 %. Также отмечено, что количество несчастных случаев на стройплощадке уменьшилось на 63 %, а строительных отходов – на 65 %.

Исследования индустриального домостроения в Китае, проведенные J. Hong с соавторами [18], показали, что себестоимость сборных зданий оказалась на 26,3–72,1 % больше, чем обычных домов, при этом, по мнению авторов [19], производство сборных железобетонных изделий, транспортировка и проектирование дизайна зданий – самые трудоемкие и затратные технологические переделы индустриального домостроения, а стоимость отделочных работ, сроки строительства и общее количество рабочих на стройплощадке определяют экономическую эффективность индустриального домостроения.

Анализ результатов исследований в [20–22] показал экономическую эффективность индустриального домостроения при условии применения передовых конструктивных и технологических решений, корректной организации работ на всех технологических этапах строительства. В то же время в [23, 24] на примере развития индустриального домостроения в Великобри-

тании и Китае показано, что внедрение современных технологий и инновационных подходов в индустриальном домостроении ограничивается недостаточным уровнем подготовки и нехваткой профессиональных навыков у руководителей и рабочих.

В отечественной строительной практике на высокоорганизованных и оснащенных средствами механизации строительных площадках при возведении крупнопанельных жилых зданий, по данным [5, 25], суммарные трудовые затраты на 1 м<sup>2</sup> общей площади сокращаются почти вдвое по сравнению с традиционными методами строительства, а до 60 % общих затрат труда переносится в заводские условия.

Исходя из перечисленного выше, эффективность индустриального домостроения необходимо рассматривать в контексте конкретной страны или региона и оценивать ее, применяя системный анализ затрат и выгод.

При анализе тематик публикаций предметных категорий Т.26767 и Т.57073 установлено, что наиболее востребованными тематиками исследований в области индустриального домостроения являются проектирование и информационное моделирование, организация производства сборных конструкций, доставка конструкций на строительную площадку и их монтаж, в том числе надежность, экономичность, экологичность индустриального домостроения и пр. Для анализа тенденций в области исследований индустриального домостроения построен график публикационной активности для предметных категорий Т.26767 и Т.57073 (рис. 8).

График на рис. 8 подтверждает выводы, приведенные в [7], что интерес к индустриальному домостроению из сборных железобетонных конструкций в мире возрастает, но в исследованиях преобладают темы, ориентированные на изучение архитектурных и конструктивных решений зданий, железобетонных конструкций заводского изготовления и их свойств, на организацию строительства в условиях строительной площадки и т. д., а тематикам, связанным с организацией производства железобетонных изделий, управлением производством, исследованием технологий производства изделий в заводских условиях, уделяется меньшее внимание.



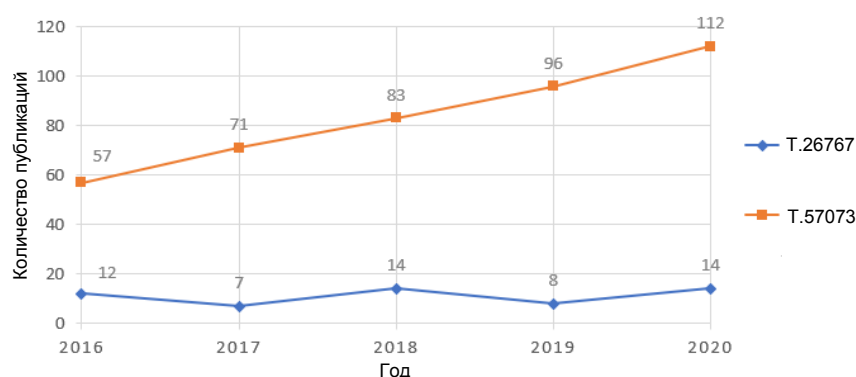


Рис. 8. Количество публикаций в предметных категориях T.26767 и T.57073

Fig. 8. Number of publications in topics T.26767 and T.57073

Согласно табл. 1–3, наукометрический анализ в области индустриального домостроения за период 2016–2020 гг. в разрезе стран, учреждений и исследований по количественным показателям показал общее лидерство Китая, на долю которого приходится 38 % публикаций, отобранных для анализа в предметных категориях T.26767 и T.57073. В топ-20 учреждений по количеству публикаций вошли четыре китайских учреждения. Однако по нормализованному индексу цитирования КНР занимает только 6-е место, при этом для Министерства образования Китая и Харбинского технологического института показатель нормализованного индекса цитирования оказался ниже среднего мирового уровня и составил 0,70 и 0,66 соответственно. Лидерами среди стран по нормализованному индексу цитирования являются Сингапур, Гонконг и Австралия, а среди учреждений – Национальный университет Сингапура, Университет Цинхуа (Китай) и Ратгерский университет (США), уровень цитирования публикаций которых в четыре раза больше среднего мирового.

Ведущим направлением исследований в Китае является изучение воздействия развития индустриального домостроения на окружающую среду. Приоритет данного направления обусловлен государственной политикой в области экологической безопасности КНР, в том числе сокращения вредных выбросов в строительной промышленности.

Интенсивность исследований в области индустриального домостроения в Великобритании, Австралии, Гонконге и Малайзии определяется государственной политикой развития

высокотехнологичных методов строительства в этих странах. В Великобритании разработаны программы поддержки развития и финансирования мероприятий, направленных на удовлетворение растущего спроса в доступном жилье и модернизацию технологий строительства с низким качеством и низкой производительностью на высокотехнологичные методы строительства, одним из которых является внеплощадочное строительство. В Малайзии развитию индустриального домостроения способствовала принятая еще в 2003 г. Дорожная карта, направленная на обеспечение создания индустриализированного строительного сектора. В том числе развитие индустриального домостроения в Малайзии мотивируется освобождением от уплаты строительных налогов застройщиков при возведении зданий с применением сборных конструкции заводского производства в объеме более 50 % [3].

Среди анализируемых журналов наибольшее количество опубликованных статей и самая высокая цитируемость публикаций за период 2016–2020 гг. отмечены в Journal of Cleaner Production и IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Наибольший показатель нормализованного индекса цитирования публикаций у Architectural Engineering and Design Management, что отражает востребованность и актуальность статей в области индустриального домостроения, издающихся в этом журнале.

Для определения учреждений и стран, активно публикующих результаты исследований в наиболее влиятельных журналах, из общего перечня были отобраны пять рейтинговых

изданий по количеству публикаций и пять по показателю нормализованного индекса цитирования публикаций. После сопоставления анализируемых наукометрических данных для журналов отобраны семь ведущих изданий: Journal of Cleaner Production, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Journal of Construction Engineering and Management, Malaysian Construction Research Journal, Automation in Construction, Architectural Engineering and Design Management, Procedia Engineering. Рейтинг этих журналов по метрике CiteScore представлен на рис. 9.

Наиболее влиятельными по метрике CiteScore являются Journal of Cleaner Production, Automation in Construction и Journal of Construction Engineering and Management, в которых за период 2016–2020 гг. опубликовано 59 статей из общего количества анализируемых публикаций. В данных журналах представлены публикации 67 учреждений из 17 стран мира. Наибольшее количество – от исследователей Гонконгского политехнического университета – 12 статей, Шанхайского университета Джао Тонг (Китай) и Ратгерского университета (США) – по пять статей соответственно. Среди стран наибольшее количество публикаций представлено исследователями Китая (30 статей), Гонконга (17) и Австралии (17 статей).

Анализ публикаций установил авторитетных исследователей и востребованные тематики в сфере индустриального домостроения. Наиболее рейтинговыми по нормализованному индексу цитирования являются публикации в области исследований ресурсосбережения и экологичности индустриального строительства на примере строительной практики Китая [26], организации, оптимизации и моделирования цепочки поставок железобетонных изделий «предприятие – строительная площадка» [27], анализа затрат и определения направлений снижения стоимости индустриального домостроения [18]. Показатель нормализованного по области индекса цитирования данных публикаций – более 10.

Среди публикаций с наибольшим количеством просмотров выделяются работы в области моделирования процессов индустриального домостроения [28], оптимизации индустриального домостроения путем разработки инновационных решений монтажных соединений и организации монтажа конструкций [29], исследования тенденций развития индустриального домостроения и выявления проблемных вопросов развития индустриального домостроения в США [30], нормализованный по области индекс просмотра публикаций которых составил 22,63; 15,25 и 13,85 соответственно.

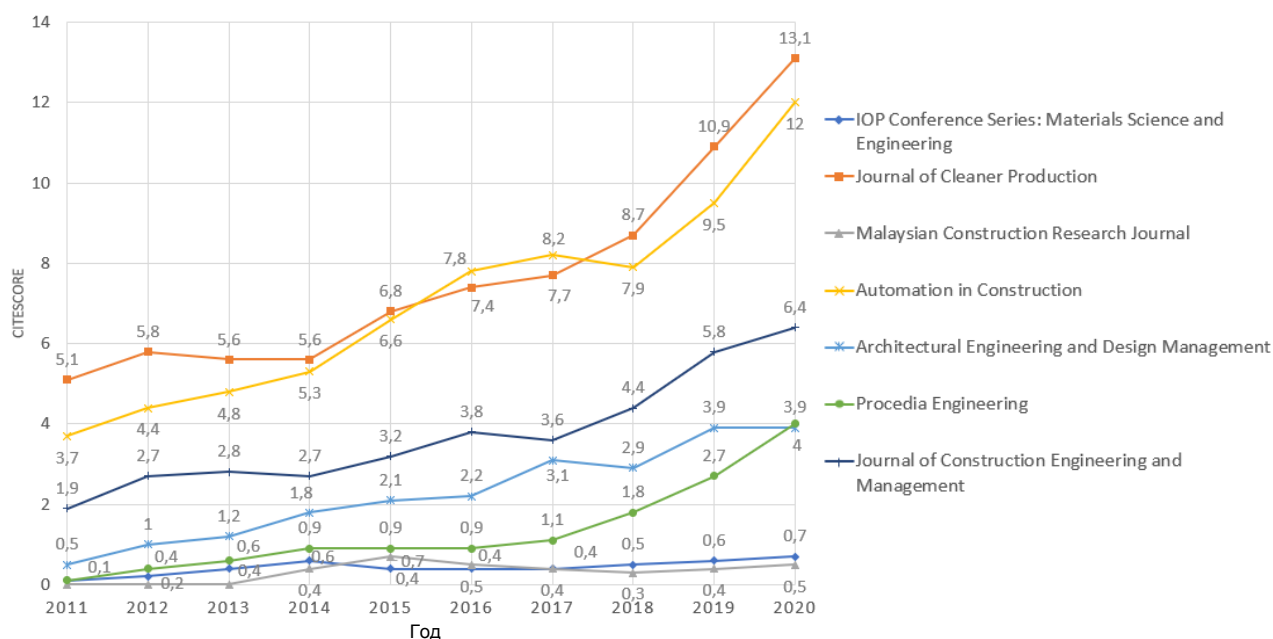


Рис. 9. Рейтинг журналов по показателю CiteScore

Fig. 9. Journal ranking by CiteScore

## ВЫВОДЫ

1. Проведенный наукометрический анализ установил рост интереса к исследованиям в области индустриального домостроения, что подтверждается ежегодным увеличением количества публикаций в данной сфере, ростом наукометрических метрик, определяющих количественные и качественные показатели результатов исследований, в том числе актуальность, значимость и авторитетность исследований. Но, несмотря на общемировой рост исследований в области индустриального домостроения и высокие в отечественной строительной практике показатели возведения жилья в индустриальном исполнении в Республике Беларусь, исследования в этом направлении ведутся недостаточно активно.

2. Данные наукометрического анализа показывают, что наиболее активно исследования в области индустриального домостроения ведутся в Китае, Австралии, Малайзии, Гонконге, Сингапуре, США и Великобритании. Самыми рейтинговыми являются темы: ресурсосбережения и экологичности индустриального строительства; организации, оптимизации и моделирования цепочки поставок железобетонных изделий; анализа затрат и определения направлений снижения стоимости индустриального домостроения; разработки инновационных монтажных соединений и организации монтажа конструкций; исследование тенденций и выявление проблемных вопросов развития индустриального домостроения. А наиболее влиятельные издания по метрике CiteScore, в которых публикуются результаты исследований в данных областях, – это *Journal of Cleaner Production*, *Automation in Construction* и *Journal of Construction Engineering and Management*.

3. Обобщая ключевые слова и основные тематики исследований, можно отметить, что исследования в области индустриального домостроения проводятся по многим направлениям, таких как изучение архитектурных и конструктивных решений зданий, железобетонных конструкций заводского изготовления и их свойств, монтажных соединений, организация строительства в условиях строительной площадки и пр. Однако исследования в области технологий и организации производства желе-

зобетонных изделий в заводских условиях и управления производством ведутся в мировой практике не так интенсивно и требуют дальнейшего изучения в связи с внедрением на предприятиях высокопроизводительного оборудования и технологий, повышением уровня автоматизации и роботизации современных производств.

4. Развитие индустриального домостроения в мировой строительной практике сдерживается рядом факторов, среди которых отсутствие опыта проектирования зданий из сборных железобетонных конструкций и недостаточная квалификация рабочих и специалистов, ограниченное архитектурное разнообразие зданий, сложность доставки крупногабаритных конструкций на стройплощадки в городских условиях, низкая сейсмоустойчивость зданий из сборного железобетона. При этом эффективность индустриального домостроения определяется, прежде всего, применением передовых конструктивных и технологических решений, корректной организацией работ на всех технологических этапах строительства, внедрением современных технологий и инновационных подходов строительства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пилипенко, В. М. Перспективы развития индустриального домостроения в Республике Беларусь / В. М. Пилипенко, В. А. Потершук, Т. М. Пецольд // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства: сб. Междунар. науч.-техн. ст. Минск: БНТУ, 2015. С. 8–14.
2. Государственная программа «Строительство жилья» на 2016–2020 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 21 апр. 2016, № 325 // Право.by. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600325&p1=1>.
3. Azman, M. N. A. Comparative Study on Prefabrication Construction Process / M. N. A. Azman, M. S. S. Ahamad, W. M. A. Wan Hussin // *International Surveying Research Journal*. 2012. Vol. 2, No 1. P. 45–58.
4. Polat, G. Precast Concrete Systems in Developing Vs. Industrialized Countries / G. Polat // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2010. Vol. 16, No 1. P. 85–94. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.08>.
5. Ефименко, А. З. Развитие и выявление резервов мощности предприятий стройиндустрии / А. З. Ефименко. М.: МГСУ, 2012. 198 с.
6. A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings [Electronic Resource] / Wenhui Liu [et al.] // *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. P. 1–18. <https://doi.org/10.1155/2021/8869315>.

7. Critical Evaluation of Off-Site Construction Research: a Scientometric Analysis / M. R. Hosseini [et al.] // *Automation in Construction*. 2018. Vol. 87. P. 235–247. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.002>.
8. Руководство по наукометрии: индикаторы развития науки и технологии / М. Акоев [и др.]; под ред. М. А. Акоева. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. 250 с. <https://doi.org/10.15826/b978-5-7996-1352-5.0000>.
9. Alinaitwe, H. M. Assessing the Degree of Industrialization in Construction – a Case of Uganda / H. M. Alinaitwe, J. A. Mwakali, B. Hansson // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2006. Vol. 12, No 3. P. 221–229. <https://doi.org/10.3846/13923730.2006.9636396>.
10. Vogler, A. The House as a Product / A. Vogler. Amsterdam: IOS Press, 2015. 198 p.
11. A Comparative Study of Environmental Performance between Prefabricated and Traditional Residential Buildings in China / X. Cao [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 109. P. 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.120>.
12. Precast Concrete Value Engineering Accommodates Difficult Sites / P. Hamill [et al.] // *PCI Journal*. 2006. Vol. 51, No 4. P. 2–25. <https://doi.org/10.15554/pcij.07012006.18.40>.
13. Case Study-Based Challenges of Quality Concrete Finishing for Architecturally Complex Structures / J. D. Manrique [et al.] // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2007. Vol. 133, No 3. P. 208–216. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2007\)133:3\(208\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:3(208)).
14. Towards Adoption of Prefabrication in Construction / V. W. Tam [et al.] // *Building and Environment*. 2007. Vol. 42, No 10. P. 3642–3654. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.003>.
15. VanGeem, M. Achieving Sustainability with Precast Concrete / M. VanGeem // *PCI Journal*. 2006. Vol. 51, No 1. P. 42–61. <https://doi.org/10.15554/pcij.01012006.42.61>.
16. Application of Sustainable Prefabricated Wall Technology for Energy Efficient Social Housing / R. Chippagiri [et al.] // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No 3. P. 1195. <https://doi.org/10.3390/su13031195>.
17. Jaillon, L. Sustainable Construction Aspects of Using Prefabrication in Dense Urban Environment: a Hong Kong Case Study / L. Jaillon, C. S. Poon // *Construction Management and Economics*. 2008. Vol. 26, No 3. P. 953–966. <https://doi.org/10.1080/01446190802259043>.
18. Barriers to Promoting Prefabricated Construction in China: a Cost-Benefit Analysis / J. Hong [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 172. P. 649–660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.171>.
19. Cost Analysis for Sustainable Off-Site Construction Based on a Multiple-Case Study in China / C. Mao [et al.] // *Habitat International*. 2016. Vol. 57. P. 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.08.002>.
20. Pan, W. Demystifying the Cost Barriers to Offsite Construction in the UK / W. Pan, R. Sidwell // *Construction Management and Economics*. 2011. Vol. 29, No 11. P. 1081–1099. <https://doi.org/10.1080/01446193.2011.637938>.
21. Li, Z. Critical Review of the Research on the Management of Prefabricated Construction / Z. Li, G. Q. Shen, X. Xue // *Habitat International*. 2014. Vol. 43. P. 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.04.001>.
22. Best Practice of Prefabrication Implementation in the Hong Kong Public and Private Sectors / V. W. Tam [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 109. P. 216–231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.045>.
23. Nadim, W. Offsite Production in the UK: the Way Forward? A UK Construction Industry Perspective / W. Nadim, J. S. Goulding // *Construction Innovation*. 2010. Vol. 10, No 2. P. 181–202. <https://doi.org/10.1108/14714171011037183>.
24. Zhai, X. Factors Impeding the Offsite Production of Housing Construction in China: an Investigation of Current Practice / X. Zhai, R. Reed, A. Mills // *Construction Management and Economics*. 2014. Vol. 32, No 1–2. P. 40–52. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.787491>.
25. Технология строительного производства и охрана труда / А. П. Коршунова [и др.]; под общ. ред. Г. Н. Фомина. М.: Архитектура-С, 2007. 375 с.
26. Unlocking the Green Opportunity for Prefabricated Buildings and Construction in China / Y. Chang [et al.] // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 139. P. 259–261. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.025>.
27. Precast Supply Chain Management in Off-Site Construction: a Critical Literature Review / Z. Wang [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 232. P. 1204–1217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.229>.
28. Matthew, Goh. Production Theory-Based Simulation of Modular Construction Processes / Matthew Goh, Yang Miang, Goh Lean // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 101. P. 227–244. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.017>.
29. Liew, J. Innovation in Modular Building Construction / J. Liew, Y. Richard // 9<sup>th</sup> International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS 2018), Hong Kong, 5–7 Decem. 2018. P. 1–14. <https://doi.org/10.18057/ICASS2018.K.05>.
30. Grosskopf, K. R. Offsite Construction – U.S. Market Trends in Prefabrication Challenges for Technology Innovation: an Agenda for the Future / K. R. Grosskopf, J. W. Elliott, J. E. Killingsworth // *International Conference on Sustainable Smart Manufacturing (S2M)*, Lisbon, 20–22 Oct. 2016. P. 393–398. <https://doi.org/10.1201/9781315198101-69>.

Поступила 13.05.2022

Подписана в печать 14.07.2022

Опубликована онлайн 30.09.2022

## REFERENCES

1. Pilipenko V. M., Potershchuk V. A., Petsold T. M. (2015) Prospects for Development of Industrial Housing Construction in the Republic of Belarus. *Sovremennye Problemy Vnedreniya Evropeiskikh Standartov v Oblasti Stroitel'stva: Sb. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. St.* [Modern Problems of Implementation of European Standards in the Field of Construction: Collection of International Scientific and Technical Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, 8–14 (in Russian).
2. Government Program “Housing Construction” for 2016–2020: Approved by the Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus on 21.04.2016 No 325. *Pravo.by*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600325&p1=1> (in Russian).
3. Azman M. N. A., Ahamad M. S. S., Wan Hussin W. M. A. (2012) Comparative Study on Prefabrication Construction Process. *International Surveying Research Journal*, 2 (1), 45–58.
4. Polat G. (2010) Precast Concrete Systems in Developing Vs. Industrialized Countries. *Journal of Civil Engineering*

- and Management, 16 (1), 85–94. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.08>.
5. Efimenko A. Z. (2012) *Development and Identification of Power Reserves of Construction Industry Enterprises*. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering. 198 (in Russian).
  6. Wenhui Liu, Hong Zhang, Qian Wang, Tianran Hua, Hong Xue (2021) A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2021/8869315>.
  7. Hosseini M. R., Martek I., Zavadskas E. K., Aibinu A. A., Arashpour M., Chileshe N. (2018) Critical Evaluation of Off-Site Construction Research: a Scientometric Analysis. *Automation in Construction*, 87, 235–247. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.002>.
  8. Akoev M., Markusova V., Moskaleva O., Pisyakov V. (2014) Handbook for Scientometrics: Indicators of Science and Technology Development. Ekaterinburg, Publishing House of the Ural University. 250. <https://doi.org/10.15826/b978-5-7996-1352-5.0000> (in Russian).
  9. Alinaitwe H. M., Mwakali J. A., Hansson B. (2006) Assessing the Degree of Industrialization in Construction – a Case of Uganda. *Journal of Civil Engineering and Management*, 12 (3), 221–229. <https://doi.org/10.3846/13923730.2006.9636396>.
  10. Vogler A. (2015) *The House as a Product*. Amsterdam, IOS Press. 198.
  11. Cao X., Li X., Zhu Y., Zhang Z. (2015) A Comparative Study of Environmental Performance between Prefabricated and Traditional Residential Buildings in China. *Journal of Cleaner Production*, 109, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.120>.
  12. Hamill P., Bertolini M., Biebighauser M., Bechara C. H., Wilden H. (2006) Precast Concrete Value Engineering Accommodates Difficult Sites. *PCI Journal*, 51 (4), 2–25. <https://doi.org/10.15554/pci.07012006.18.40>.
  13. Manrique J. D., Al-Hussein M., Telyas A., Funston G. (2007) Case Study-Based Challenges of Quality Concrete Finishing for Architecturally Complex Structures. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133 (3), 208–216. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2007\)133:3\(208\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:3(208)).
  14. Tam V. W., Tam C. M., Zeng S. X., Ng W. C. (2007) Towards Adoption of Prefabrication in Construction. *Building and Environment*, 42 (10), 3642–3654. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.003>.
  15. VanGeem M. (2006) Achieving Sustainability with Precast Concrete. *PCI Journal*, 51 (1), 42–61. <https://doi.org/10.15554/pci.01012006.42.61>.
  16. Chippagiri R., Gavali H. R., Ralegaonkar R. V., Riley M., Shaw A., Bras A. (2021) Application of Sustainable Prefabricated Wall Technology for Energy Efficient Social Housing. *Sustainability*, 13 (3), 1195. <https://doi.org/10.3390/su13031195>.
  17. Jaillon L., Poon C. S. (2008) Sustainable Construction Aspects of Using Prefabrication in Dense Urban Environment: a Hong Kong Case Study. *Construction Management and Economics*, 26 (3), 953–966. <https://doi.org/10.1080/01446190802259043>.
  18. Hong J., Shen G. Q., Li Z., Zhang B., Zhang W. (2018) Barriers to Promoting Prefabricated Construction in China: a Cost-Benefit Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 172, 649–660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.171>.
  19. Mao C., Xie F., Hou L., Wu P., Wang J., Wang X. (2016) Cost Analysis for Sustainable Off-Site Construction Based on a Multiple-Case Study in China. *Habitat International*, 57, 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.08.002>.
  20. Pan W., Sidwell R. (2011) Demystifying the Cost Barriers to Offsite Construction in the UK. *Construction Management and Economics*, 29 (11), 1081–1099. <https://doi.org/10.1080/01446193.2011.637938>.
  21. Li Z., Shen G. Q., Xue X. (2014) Critical Review of the Research on the Management of Prefabricated Construction. *Habitat International*, 43, 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.04.001>.
  22. Tam V. W., Fung I. W., Sing M. C., Ogunlana S. O. (2015) Best Practice of Prefabrication Implementation in the Hong Kong Public and Private Sectors. *Journal of Cleaner Production*, 109, 216–231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.045>.
  23. Nadim W., Goulding J. S. (2010) Offsite Production in the UK: the Way Forward? A UK Construction Industry Perspective. *Construction Innovation*, 10 (2), 181–202. <https://doi.org/10.1108/14714171011037183>.
  24. Zhai X., Reed R., Mills A. (2014) Factors Impeding the Offsite Production of Housing Construction in China: an Investigation of Current Practice. *Construction Management and Economics*, 32 (1–2), 40–52. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.787491>.
  25. Korshunova A. P., Mushtaeva N. E., Nikolaev V. A., Senatorov N. Ya., Strunkin N. P., Fomin G. N. (2007) Technology of Construction Production and Labor Protection. Moscow, Arkhitektura-S Publ. 375 (in Russian).
  26. Chang Y., Li X., Masanet E., Zhang L., Huang Z., Ries R. (2018) Unlocking the Green Opportunity for Prefabricated Buildings and Construction in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 259–261. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.025>.
  27. Wang Z., Hu H., Gong J., Ma X., Xiong W. (2019) Precast Supply Chain Management in Off-Site Construction: a Critical Literature Review. *Journal of Cleaner Production*, 232, 1204–1217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.229>.
  28. Matthew Goh, Yang Miang, Goh Lean (2019) Production Theory-Based Simulation of Modular Construction Processes. *Automation in Construction*, 101, 227–244. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.017>.
  29. Liew J., Richard Y. (2018) Innovation in Modular Building Construction. *9<sup>th</sup> International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS 2018)*, Hong Kong, 5–7 Decem. 2018, 1–14. <https://doi.org/10.18057/ICASS2018.K.05>.
  30. Grosskopf K. R., Elliott J. W., Killingsworth J. E. (2016) Offsite Construction – U.S. Market Trends in Prefabrication Challenges for Technology Innovation: an Agenda for the Future. *International Conference on Sustainable Smart Manufacturing (S2M)*, Lisbon, 20–22 Oct. 2016, 393–398. <https://doi.org/10.1201/9781315198101-69>.

Received: 13.05.2022

Accepted: 14.07.2022

Published online: 30.09.2022

## Эффективная многослойная стеновая панель

Канд. техн. наук, доц. В. Д. Сизов<sup>1)</sup>, А. В. Павловская<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Выполнен комплексный анализ многослойной стеновой панели. Исследован теплоизоляционный слой, толщина которого влияет как на размеры ограждающей конструкции, так и на теплозащитную эффективность стеновой панели. Уменьшение толщины слоя теплоизоляции – важный вопрос, поскольку производство трехслойных панелей затратно в энергетическом и материальном плане. Представлены особенности применения различного количества экранов для снижения размеров теплоизоляционного слоя. Приведен пример возможности максимального снижения размера теплоизоляционного слоя, когда толщина прослойки  $\delta_{пр}$  не может быть менее 3–5 мм. Показано, что общая толщина слоя теплоизоляции составит 0,057 м при наличии максимально возможного количества экранов – 12. Для данных условий рассчитаны температуры в плоскостях ограждения, по значениям которых определены величины максимальных парциальных давлений  $E$  и парциальных давлений водяного пара  $e$  (при вариантах перфорированных  $e'$  и неперфорированных  $e''$  экранов). По полученным значениям построены зависимости  $E$ ,  $e'$ ,  $e''$  от температуры в плоскостях ограждения. Проведенные расчеты и обобщающая оценка тепловлажностного режима в ограждающих конструкциях подтверждены с помощью составленной программы и расчета необходимых параметров  $e$  и  $t$  в слоях конструкции. Установлено, что для исключения зон конденсации при эксплуатации ограждающих конструкций можно использовать различные экранирующие материалы.

**Ключевые слова:** стеновая панель, толщина, ограждающая конструкция, теплоизоляционный слой, теплопередача, лучеиспускание, тепловая изоляция, экран

**Для цитирования:** Сизов, В. Д. Эффективная многослойная стеновая панель / В. Д. Сизов, А. В. Павловская // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 410–418. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-410-418>

## Efficient Multi-Layer Wall Panel

V. D. Sizov<sup>1)</sup>, A. V. Pavlovskaya<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** A comprehensive analysis of the multilayer wall panel has been performed. The heat-insulating layer, the thickness of which affects both the dimensions of the enclosing structure and the heat-shielding efficiency of the wall panel, has been studied. Reducing the thickness of the thermal insulation layer is an important issue, since the production of three-layer panels is expensive in energy and material terms. The features of using a different number of screens to reduce the size of the thermal insulation layer are presented. An example of the possibility of a maximum reduction in the size of the heat-insulating layer, when the thickness of the interlayer  $\delta_{in}$  cannot be less than 3–5 mm is given. It is shown that the total thickness of the thermal insulation layer will be 0.057 m in the presence of the maximum possible number of screens – 12. For these conditions, the temperatures in the enclosure planes are calculated, according to the values of which the values of the maximum partial pressures  $E$  and partial pressures of water vapor  $e$  are determined (for the variants of perforated  $e'$  and non-perforated  $e''$  screens). According to the obtained values the dependences  $E$ ,  $e'$ ,  $e''$  on the temperature in the planes of the fence are constructed. The calculations carried out and a general assessment of the heat and humidity regime in the enclosing structures were confirmed with the help of the compiled program and the calculation of the necessary parameters  $e$  and  $t$

### Адрес для переписки

Сизов Валерий Дмитриевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-93-52  
tg\_v\_fes@bntu.by

### Address for correspondence

Sizov Valeriy D.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-93-52  
tg\_v\_fes@bntu.by

in the layers of the structure. It has been established that various shielding materials can be used to exclude condensation zones during the operation of enclosing structures.

**Keywords:** wall panel, thickness, enclosing structure, heat insulation layer, heat transfer, radiation emission, thermal insulation, screen

**For citation:** Sizov V. D., Pavlovskaya A. V. (2022) Efficient Multi-Layer Wall Panel. *Science and Technique*. 21 (5), 410–418. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-21-5-410-418> (in Russian)

## Введение

В настоящее время для производства наружных ограждающих конструкций в виде трехслойных панелей на заводах крупнопанельного домостроения и в монолитном строительстве тратится немало материальных и энергетических ресурсов. Трехслойные панели представляют собой сложную структуру, и чтобы изучить происходящие в них тепломассообменные процессы, следует проводить экспериментальные исследования. Но для этого нужно использовать большой парк массивных форм для тепловлажностной обработки (ТВО) панели, толщина которой 0,30 м и более. Кроме того, процесс самой ТВО достаточно длительный, что увеличивает как расход топливно-энергетические ресурсы, так и подъемно-транспортные расходы при перевозке и монтаже. Таким образом, максимальное уменьшение толщины панели в целом и толщины слоя теплоизоляции в частности (что существенно влияет на общую толщину изделия) является актуальной задачей.

Вместе с тем, даже используя любой эффективный теплоизоляционный материал (например, пенополистирол, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,04$  Вт/(м·°C)), при нормативной величине термического сопротивления для оболочек жилых зданий  $R_{\text{норм}} = 3,2$  м<sup>2</sup>·°C/Вт [1] толщина слоя теплоизоляции составляет  $\delta_{\text{и}} = 0,12$  м, а общая толщина панели  $\delta_{\text{п}} \approx 0,30$  м (в СП 2.04.01–2020 с учетом повышающего коэффициента, равного 1,90,  $R_{\text{норм}} = 6,08$  м<sup>2</sup>·°C/Вт). Уменьшить толщину наружных ограждающих конструкций можно различными способами. Например, используя эффективные теплоизоляционные материалы и конструкции, а также вакуумированные прослойки, заполняя их газами с меньшей теплопроводностью [2].

## Применение экранов

### для уменьшения толщины многослойной стеновой панели

Поскольку в экранах в качестве тепловой изоляции используются воздушные прослойки, это позволяет значительно снизить теплоотдачу лучеиспусканием [2]. Наличие экранов [2] дает возможность уменьшить теплоперенос через прослойку в  $(n + 1)$  раз за счет снижения теплопередачи излучением при степенях черноты  $\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{экв}} = \varepsilon_{\text{ч}}$ . В [3] показано, что такой способ уменьшает толщину воздушной прослойки и размер панели как наружной ограждающей конструкции, увеличивая ее термическое сопротивление, снижая энергозатраты на ТВО и сокращая время ее проведения.

При малой толщине воздушной газовой прослойки теплоперенос лучепрозрачным газом осуществляется в условиях, когда произведение критериев Грасгофа и Прандтля  $G_r \cdot P_r < 1000$ , влияние конвективных переносов теплоты не учитывается [4]. В широком интервале температур этому условию удовлетворяют газовые прослойки толщиной  $\delta_g < 10\text{--}20$  мм [5, 6], влияние температуры воздуха (от плюс 15 °C до минус 10 °C) в прослойке на ее теплопроводность незначительно.

Уменьшить толщину как теплоизоляционного слоя, так и всей конструкции панели без снижения величины нормативного термического сопротивления для жилых зданий ( $R_{\text{норм}} = 3,2$  м<sup>2</sup>·°C/Вт [1]) возможно в случае применения большого количества экранов из алюминиевой фольги без перфорации (или других аналогичных материалов) с минимально возможным расстоянием между ними. Перфорация экранов [7] нецелесообразна, так как увеличивает конвективные потоки, уменьшает площадь теплоотражающей поверхности и повышает степень черноты [4]. В случае алюминиевой фольги без перфорации герметичные воздушные прослойки защищены от попадания парообразной или капельной влаги, и даже при возникновении в слое температуры точки росы конденсация отсутствует. Такую конструкцию можно представить в виде фраг-



мента стеновой панели с экранированными воздушными прослойками (рис. 1).

При использовании пенополистирола ( $\lambda = 0,04$  Вт/(м·°C)) толщина теплоизоляционного слоя обычно принимается  $\delta = 0,12$  м, толщины наружного и внутреннего конструктивных слоев  $\delta_n = 0,06$  м и  $\delta_{вн} = 0,12$  м соответственно.

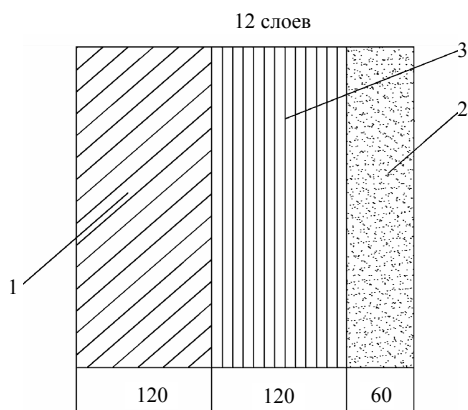


Рис. 1. Фрагмент стеновой панели (ед. измер. в мм):  
1 – внутренний слой; 2 – наружный слой бетона;  
3 – экранированная прослойка с лучепрозрачным газом в зазорах

Fig. 1. Fragment of wall panel (measuring units in mm):  
1 – inner layer; 2 – outer layer of concrete;  
3 – shielded layer with a ray-transparent gas in the gaps

### Максимальное уменьшение размеров теплоизоляционного слоя

Возможность максимального уменьшения толщины теплоизоляционного слоя, исходя из конструктивных особенностей панели, когда толщина  $\delta_{пр}$  каждой прослойки не может быть менее 3–5 мм, покажем на следующем примере. При условиях, соответствующих производству критериев  $G_r \cdot P_r < 1000$ , величина суммарной теплопередачи (за счет радиации и теплопроводности) определяется по формуле [4]

$$q_{\text{общ}} = q_{\text{л}} + q_{\text{к}} = C_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] + \frac{\lambda_r}{\delta_r} (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где  $q_{\text{л}}$  – радиационный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{\text{к}}$  – тепловой поток теплопроводностью через газовую прослойку;  $T_1$ ,  $T_2$  – температура излучающей ( $T_1 = 290,04$  К) и поглощаю-

щей ( $T_2 = 272,43$  К) поверхностей [3];  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности газовой прослойки,  $\lambda_r = 0,025$  Вт/(м·К);  $\delta_r$  – толщина газовой прослойки,  $\delta_r = 0,12$  м;  $C_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>),

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}; \quad (2)$$

$C_0$  – отражательная способность абсолютно черного тела,  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – степени черноты поверхностей,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,05$ .

Подставив в (1) численные значения, получим:

$$q_{\text{общ}} = q_{\text{л}} + q_{\text{к}} = \frac{5,67}{\frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,05} - 1} \times \left[ \left( \frac{290,04}{100} \right)^4 - \left( \frac{272,43}{100} \right)^4 \right] + \frac{0,025}{0,12} (290,04 - 272,43) = 2,28 + 3,67 = 5,95 \text{ Вт/м}^2.$$

При использовании  $n$  экранов приведенный коэффициент излучения запишется в следующем виде:

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{(n+1) \cdot 2 \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{2} \right)}, \quad (3)$$

где  $n$  – число экранов;  $\varepsilon_1$  – степень черноты алюминиевой фольги.

Радиационный тепловой поток при наличии двух экранов и величина теплопередачи составят:

$$q_{\text{л}} = \frac{5,67}{(2+1) \cdot 2 \left( \frac{1}{0,05} - \frac{1}{2} \right)} \times \left[ \left( \frac{290,04}{100} \right)^4 - \left( \frac{272,43}{100} \right)^4 \right] = 0,76 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{общ}} = 0,76 + 3,67 = 4,43 \text{ Вт/м}^2.$$

Эффективное термическое сопротивление

$$R_{эф} = \frac{t_1 - t_2}{q_{общ}} = \frac{17,04 - (-0,57)}{4,43} = 3,97 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}, \quad (4)$$

где  $t_1, t_2$  – температуры на внутренней и внешней границах теплоизоляционного слоя, принятые по [3].

Следовательно, толщину теплоизоляционного слоя  $\delta'$  можно уменьшить на величину

$$\Delta\delta = \lambda(R_{эф} - R_{п.с}) = 0,04 \cdot (3,97 - 3,0) = 0,04 \text{ м},$$

где  $R_{п.с}$  – термическое сопротивление слоя пенополистирола,  $R_{п.с} = 3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ .

Тогда общая толщина слоя теплоизоляции при двух экранах

$$\delta' = \delta_{и} - \Delta\delta = 0,12 - 0,04 = 0,08 \text{ м}. \quad (5)$$

При наличии четырех экранов получим следующие значения вышеприведенных показателей:

$$q_{л} = \frac{5,67}{(4+1) \cdot 2 \cdot \left( \frac{1}{0,05} - \frac{1}{2} \right)} \times \left[ \left( \frac{290,04}{100} \right)^4 - \left( \frac{272,43}{100} \right)^4 \right] = 0,46 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{общ} = 0,46 + 3,67 = 4,13 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_{эф} = \frac{17,04 + 0,57}{4,13} = 4,26 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт};$$

$$\Delta\delta = 0,04 \cdot (4,26 - 3,0) = 0,05 \text{ м};$$

$$\delta' = 0,12 - 0,05 = 0,07 \text{ м}.$$

Для шести экранов получим следующие данные:

$$q_{л} = \frac{5,67}{(6+1) \cdot 2 \cdot \left( \frac{1}{0,05} - \frac{1}{2} \right)} \times \left[ \left( \frac{290,04}{100} \right)^4 - \left( \frac{272,43}{100} \right)^4 \right] = 0,33 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{общ} = 0,33 + 3,67 = 4,0 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_{эф} = \frac{17,04 + 0,57}{4,0} = 4,4 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт};$$

$$\Delta\delta = 0,04 \cdot (4,4 - 3,0) = 0,056 \text{ м};$$

$$\delta' = 0,12 - 0,056 = 0,064 \text{ м}.$$

При наличии десяти экранов:

$$q_{л} = \frac{5,67}{(10+1) \cdot 2 \cdot \left( \frac{1}{0,05} - \frac{1}{2} \right)} \times \left[ \left( \frac{290,04}{100} \right)^4 - \left( \frac{272,43}{100} \right)^4 \right] = 0,21 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{общ} = 0,21 + 3,67 = 3,88 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_{эф} = \frac{17,04 + 0,57}{3,88} = 4,53 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт};$$

$$\Delta\delta = 0,04 \cdot (4,53 - 3,0) = 0,061 \text{ м};$$

$$\delta' = 0,12 - 0,061 = 0,059 \text{ м}.$$

Для двенадцати экранов значения показателей будут следующими:

$$q_{л} = \frac{5,67}{(12+1) \cdot 2 \cdot \left( \frac{1}{0,05} - \frac{1}{2} \right)} \times \left[ \left( \frac{290,04}{100} \right)^4 - \left( \frac{272,43}{100} \right)^4 \right] = 0,18 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{общ} = 0,18 + 3,67 = 3,85 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_{эф} = \frac{17,04 + 0,57}{3,85} = 4,57 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт};$$

$$\Delta\delta = 0,04 \cdot (4,57 - 3,0) = 0,063 \text{ м};$$

$$\delta' = 0,12 - 0,063 = 0,057 \text{ м}.$$

Толщина газовой прослойки при наличии 12 экранов

$$\delta_r = \frac{\delta'}{n} = \frac{0,057}{12} = 4,8 \text{ мм}.$$

Приведенные расчеты показывают, что при максимальном количестве экранов – 12 (рис. 2) – общая величина слоя теплоизоляции составит 0,057 м, а толщина газовой прослойки  $\delta_r = 4,8$  мм. В данном случае  $G_r \cdot P_r < 1000$ , и теплоперенос будет осуществляться только за счет теплопроводности лучепрозрачных газов [4].

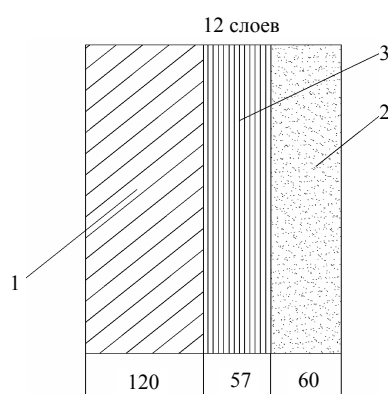


Рис. 2. Фрагмент стеновой панели с рассчитанной толщиной слоя теплоизоляции (ед. измер. в мм):  
1–3 – то же, что на рис. 1

Fig. 2. Fragment of wall panel with calculated thermal insulation layer thickness (measuring units in mm):  
1–3 – the same as in Fig. 1

Дальнейшее увеличение количества экранов нерационально из-за сложности их изготовления и установки с зазором до 5 мм. Целесообразность использования перфорированных или неперфорированных экранов для исключе-

ния перетока газов между прослойками подтверждается расчетом тепловлажностного режима ограждающей конструкции для этих двух случаев при наиболее неблагоприятных условиях – средней месячной температуре воздуха самого холодного месяца  $t_n = -6,9$  °С для г. Минска. Следует отметить, что применение неперфорированных экранов предотвращает появление зон конденсации в конструкции в любом случае [7].

При наличии 12 экранов и общей толщине теплоизоляционного слоя 0,057 м были рассчитаны температуры в плоскостях ограждения. По этим значениям определяли величины максимальных парциальных давлений  $E$  [1, 8, 9], а по известным соотношениям [8] – значения парциальных давлений водяного пара  $e$  при вариантах перфорированных  $e'$  или неперфорированных  $e''$  экранов. В случае перфорированных экранов сопротивление паропроницанию  $R_n = 11$  м<sup>2</sup>·ч·Па/мг, а для неперфорированных  $R_n = 100$  м<sup>2</sup>·ч·Па/мг [8–11]. Полученные в процессе исследований величины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальные и действительные парциальные давления в плоскостях ограждения  
Maximum and actual partial pressures in the fencing planes

| Средняя месячная температура воздуха наиболее холодного месяца | Определяемый параметр                                                               | Номер плоскости |      |      |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                |                                                                                     | 1               | 2    | 3    | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| $t_n = -6,9$ °С                                                | Температура в плоскостях ограждения $t$ , °С                                        | 17,3            | 16,6 | 14,8 | 13,1  | 11,3  | 9,6   | 7,8   | 6,04  |
|                                                                | Максимальное парциальное давление $E$ , Па                                          | 1975            | 1889 | 1684 | 1498  | 1330  | 1190  | 1058  | 935   |
|                                                                | Действительное парциальное давление $e'$ , Па, $R_n = 11$ м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг   | 1135            | 1117 | 1048 | 980   | 912   | 844   | 775   | 707   |
|                                                                | Действительное парциальное давление $e''$ , Па, $R_n = 100$ м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг | 1135            | 1133 | 1062 | 992   | 922   | 851   | 780   | 710   |
| Средняя месячная температура воздуха наиболее холодного месяца | Определяемый параметр                                                               | Номер плоскости |      |      |       |       |       |       |       |
|                                                                |                                                                                     | 9               | 10   | 11   | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| $t_n = -6,9$ °С                                                | Температура в плоскостях ограждения $t$ , °С                                        | 4,3             | 2,5  | 0,73 | -1,03 | -2,78 | -4,57 | -6,28 | -6,79 |
|                                                                | Максимальное парциальное давление $E$ , Па                                          | 831             | 732  | 643  | 563   | 484   | 416   | 359   | 344   |
|                                                                | Действительное парциальное давление $e'$ , Па, $R_n = 11$ м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг   | 639             | 571  | 503  | 434   | 366   | 298   | 298   | 279   |
|                                                                | Действительное парциальное давление $e''$ , Па, $R_n = 100$ м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг | 639             | 569  | 498  | 428   | 357   | 287   | 287   | 285   |

По значениям из табл. 1 построены зависимости  $E$ ,  $e'$  и  $e''$  от температуры в плоскостях ограждения (рис. 3). По данным табл. 1 и графикам на рис. 3 видно, что в обоих случаях (для экранов с перфорацией и без нее) отсутствуют зоны конденсации ( $e'' > e'$ ). Но при использовании экранов без перфорации этот фактор в большинстве слоев более существен.

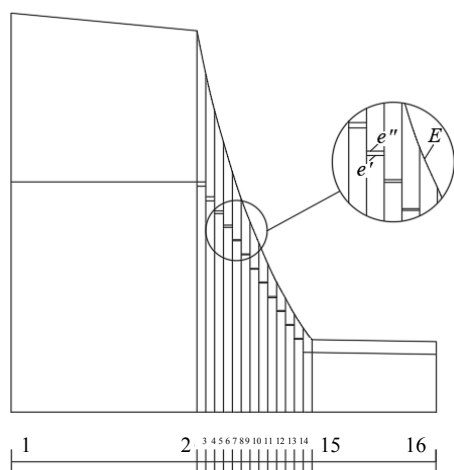


Рис. 3. Зависимости  $E$ ,  $e'$ ,  $e''$  от температуры в плоскостях ограждения 1–16

Fig. 3. Dependence  $E$ ,  $e'$ ,  $e''$  from temperature in the fence planes 1–16

### Оценка тепловлажностного режима стеновой панели

Для подтверждения проведенных расчетов и обобщающей оценки тепловлажностного режима в стеновой панели составили программу и произвели расчет необходимых параметров  $e$ ,  $t$  при различных значениях температур наружного и внутреннего воздуха. Конструкцию рассчитывали при наличии 10 экранов

и толщине прослойки 10 мм (рис. 4). Экраны были изготовлены из стекловолокна.

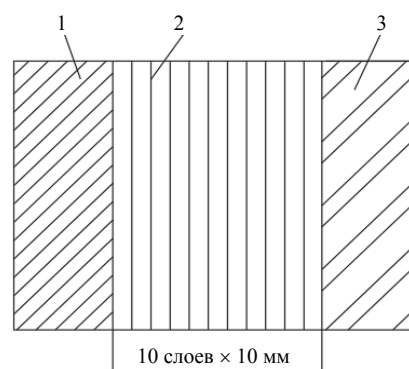


Рис. 4. Фрагмент стеновой панели при наличии 10 экранов из стекловолокна: 1, 3 – внутренний и наружный слой; 2 – экранированная прослойка

Fig. 4. Fragment of wall panel in the presence of 10 fiberglass screens: 1, 3 – inner and outer layers; 2 – shielded interlayer

В табл. 2 приведены показатели, рассчитанные при следующих вариантах начальных условий для плоскостей стеновой панели:

- степень черноты стекловолокна  $\varepsilon = 0,924 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;
- $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;
- количество экранов  $n = 10$  шт.;
- приведенный коэффициент излучения  $C_{\text{пр}} = 0,442639$ ;
- коэффициент теплопроводности газовой прослойки  $\lambda_r = 0,025 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;
- толщина газовой прослойки  $\delta_r = 0,01 \text{ м}$ .

По значениям, приведенным в табл. 2, находили максимальные парциальные давления  $E$ , а по известным соотношениям – величины парциальных давлений водяного пара  $e$ . Полученные показатели сведены в табл. 3.

Таблица 2

### Данные для расчета

#### Data for calculation

| Показатель                                                        | Вариант расчета |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|
|                                                                   | 1               | 2     | 3     | 4     |
| Температура внутреннего воздуха $t_{\text{вн}}$ , °C              | 18              | 14    | 12    | 10    |
| Температура излучающей поверхности $T_1$ при $t_{\text{вн}}$ , К  | 291             | 287   | 285   | 283   |
| Температура наружного воздуха $t_{\text{н}}$ , °C                 | –25             | –15   | –10   | 0     |
| Температура поглощающей поверхности $T_2$ при $t_{\text{н}}$ , К  | 248             | 258   | 263   | 273   |
| $q_{\text{общ}}$ , Вт/м <sup>2</sup>                              | 122,5           | 82,92 | 63,03 | 28,81 |
| $q_{\text{общ}}$ без учета толщины прослойки, Вт/м <sup>2</sup>   | 15              | 10,42 | 8,03  | 3,81  |
| Эффективное термическое сопротивление $R$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт | 0,35            | 0,35  | 0,35  | 0,35  |

Таблица 3

Максимальные парциальные давления  $E$  и парциальные давления водяного пара  $e$  в плоскостях ограждения  
Maximum partial pressures  $E$  and partial pressures of water vapor  $e$  in the fencing planes

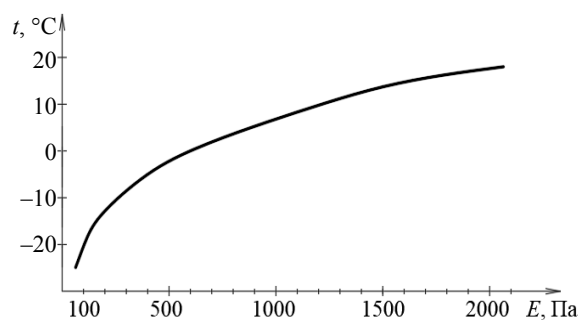
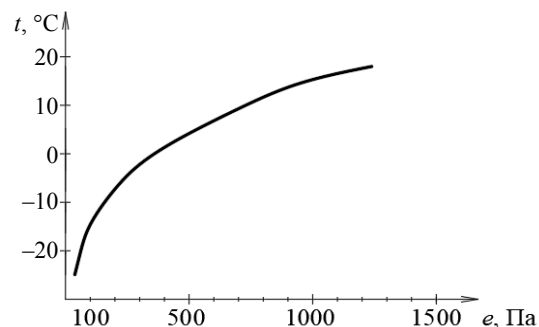
| Показатель          | Номер плоскости |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |
|---------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8      | 9      | 10     | 11     |
| Вариант 1           |                 |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |
| $t, ^\circ\text{C}$ | 18,00           | 13,71 | 9,42  | 5,13  | 0,84  | -3,45 | -7,74 | -12,03 | -16,32 | -20,61 | -24,9  |
| $E, \text{Па}$      | 2064            | 1500  | 1175  | 892   | 642   | 452   | 321   | 217    | 141    | 98     | 63     |
| $e, \text{Па}$      | 1238,4          | 900,0 | 705,0 | 535,2 | 385,2 | 271,2 | 192,6 | 130,2  | 84,6   | 58,8   | 37,8   |
| Вариант 2           |                 |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |
| $t, ^\circ\text{C}$ | 14,0            | 11,1  | 8,2   | 5,3   | 2,4   | -0,5  | -3,4  | -6,3   | -9,2   | -12,1  | -15,0  |
| $E, \text{Па}$      | 1599            | 1321  | 1091  | 884   | 731   | 576   | 452   | 341    | 274    | 215    | 165    |
| $e, \text{Па}$      | 959,4           | 792,6 | 654,6 | 530,4 | 438,6 | 345,6 | 271,2 | 204,6  | 164,4  | 129,0  | 99,0   |
| Вариант 3           |                 |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |
| $t, ^\circ\text{C}$ | 12,00           | 9,79  | 7,58  | 5,37  | 3,16  | 0,95  | -1,26 | -3,47  | -5,68  | -7,89  | -10,10 |
| $E, \text{Па}$      | 1403            | 1210  | 1050  | 901   | 770   | 650   | 540   | 453    | 380    | 315    | 254    |
| $e, \text{Па}$      | 841,8           | 726,0 | 630,0 | 540,6 | 462   | 390,0 | 324,0 | 271,8  | 228,0  | 189,0  | 152,4  |
| Вариант 4           |                 |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |
| $t, ^\circ\text{C}$ | 10,00           | 8,99  | 7,98  | 6,97  | 5,96  | 4,95  | 3,94  | 2,93   | 1,92   | 0,91   | -0,10  |
| $E, \text{Па}$      | 1228            | 1148  | 1072  | 1001  | 935   | 872   | 813   | 760    | 705    | 657    | 614    |
| $e, \text{Па}$      | 736,8           | 688,8 | 643,2 | 600,6 | 561,0 | 523,2 | 487,8 | 456,0  | 423,0  | 394,2  | 368,4  |

С учетом данных табл. 3 построены зависимости  $E$  и  $e$  от температуры в плоскостях ограждения для четырех вариантов начальных условий (рис. 5–12).

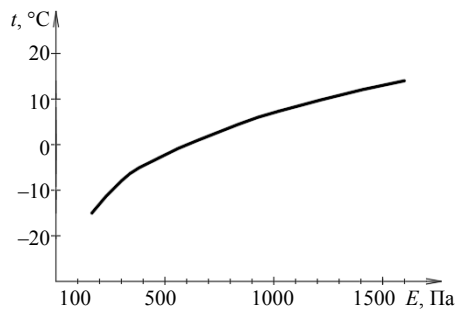
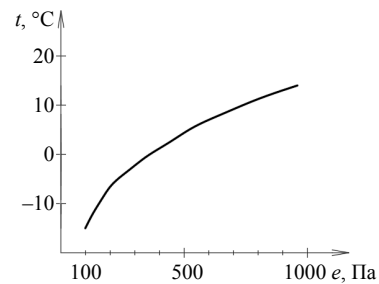
Проведенные расчеты и графики показывают, что, с точки зрения возможности появле-

ния конденсации, можно использовать любые экранирующие материалы, в том числе стекловолокно с отражающим эффектом. При этом величина теплового потока уменьшается в 4,25 раза при снижении разности температур в 4,3 раза, а  $E \geq e$  постоянно.

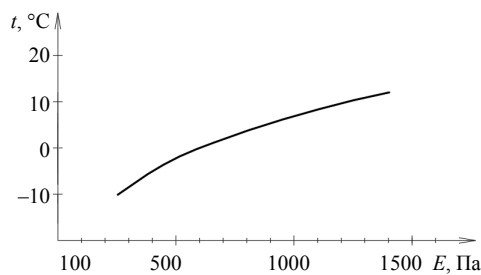
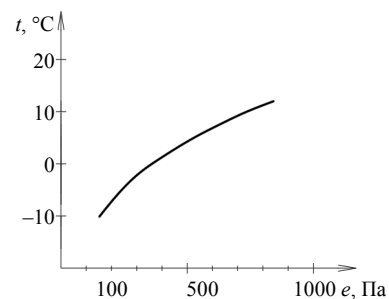
Вариант 1

Рис. 5  
Fig. 5Рис. 6  
Fig. 6

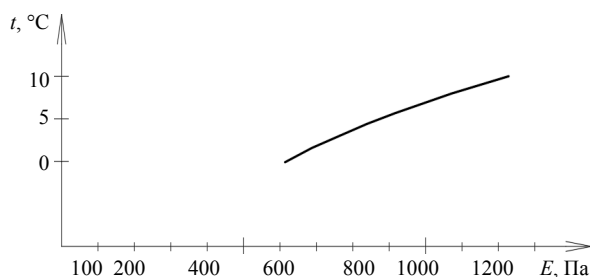
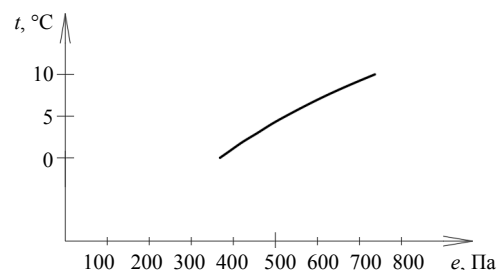
## Вариант 2

Рис. 7  
Fig. 7Рис. 8  
Fig. 8

## Вариант 3

Рис. 9  
Fig. 9Рис. 10  
Fig. 10

## Вариант 4

Рис. 11  
Fig. 11Рис. 12  
Fig. 12

## ВЫВОДЫ

1. Для максимального уменьшения толщины ограждающих конструкций целесообразно между воздушными прослойками устраивать экраны из алюминиевой фольги (или другого материала) с минимальными размерами прослоек между ними, что исключает применение полиуретана, сохраняя значение нормативного термического сопротивления  $R_{\text{норм}} = 3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ .

2. Использование экранной теплоизоляции с экранами из любых материалов исключает

появление зон конденсации при эксплуатации ограждающих конструкций в неблагоприятном температурном режиме.

3. Разработанный метод позволяет уменьшить толщину ограждающей конструкции и размеры форм, применять старый парк форм, повысить эффективность использования тепловых ресурсов при тепловлажностной обработке на 15–20 %.

4. В качестве экранов можно применять любые экранирующие материалы, например сетку из полиэтилена, алюминиевую фольгу с эле-

ментами рифления, деформированную стеклоткань с отражающим эффектом.

# ЛИТЕРАТУРА

1. Здания и сооружения. Энергетическая эффективность: СН 2.04.02–2020. Введ. 30.03.2021. Минск: Минстрой-архитектуры, 2021. 24 с.
2. Тепло- и массообмен: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2007. Ч. 1. 606 с.
3. Сизов, В. Д. Влияние отражательной способности экранов на процесс теплопередачи в ограждающих конструкциях / В. Д. Сизов, Л. В. Нестеров, В. М. Копко // Энергетика. Изв. высш. учебн. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. № 1. С. 46–55.
4. Иванцов, Г. П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках (инженерные решения задач) / Г. П. Иванцов. М.: Энергия, 1970. 400 с.
5. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. 5-е изд. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
6. Многослойная стеновая панель: пат. Респ. Беларусь № 18473 / Б. М. Хрусталева, В. Д. Сизов, Л. В. Акельев, Л. В. Нестеров. Опубл. 30.08.2014.
7. Сизов, В. Д. Влияние местоположения неперфорированного экрана на процесс теплопередачи в наружных ограждающих конструкциях зданий / В. Д. Сизов, Л. В. Нестеров, В. М. Копко // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 2. С. 119–124. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-119-124>.
8. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций и микроклимат помещений / А. М. Протасевич. Минск: БНТУ, 2016. 452 с.
9. Кудинов, А. А. Строительная теплофизика / А. А. Кудинов. М.: ИНФРА-М, 2016. 262 с.
10. Multi-Layer Building Insulation and Wallboard Sheet with Multi-Layer Insulation: Pat. US8011151B2 / R. W. Pollack. Publ. date 06.09.2011.
11. Многослойная стеновая панель: пат. Респ. Беларусь № 20723 / Б. М. Хрусталева, В. Д. Сизов, Л. В. Нестеров. Опубл. 28.02.2017.

Поступила 20.05.2022

Подписана в печать 21.07.2022

Опубликована онлайн 30.09.2022

# REFERENCES

1. SN [Building Regulation] 2.04.02–2020. Buildings and Structures. Energy Efficiency. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2021. 24 (in Russian).
2. Khroustalev B. M., Nesenichuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Akel'ev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerez'ko A. V. (2007) *Heat and Mass Transfer. Part 1*. Minsk, Belarusian National Technical University. 606 (in Russian).
3. Sizov V. D., Nesterov L. V., Kopko V. M. (2016) Effect of the Screens Radiant Reflectance on Thermal Transport Process in the Cladding Structures. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 46–55 (in Russian).
4. Ivantsov G. P. (1970) *Heat Transfer by Radiation in Fire Engineering Installations (Engineering Problem Solving)*. Moscow, Energiya Publ. 400 (in Russian).
5. Fokin K. F. (2006) Construction Heat Engineering of Enclosing Parts of Buildings. 5<sup>th</sup> ed. Moscow, AVOK-PRESS Publ. 256 (in Russian).
6. Khroustalev B. M., Sizov V. D., Akeliev V. D., Nesterov L. V. (2014) *Multilayer wall Panel*. Patent of the Republic of Belarus No 18473 (in Russian).
7. Sizov V. D., Nesterov L. V., Kopko V. M. (2017) Influence of Non-Perforated Screen Location on Heat Transfer Process in Building Enclosing Parts. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (2), 119–124. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-119-124> (in Russian).
8. Protasevich A. M. (2016) *Building Thermal Physics of Enclo-Sing Structures and Indoor Microclimate*. Minsk, Belarusian National Technical University. 452 (in Russian).
9. Kudinov A. A. (2016) *Building Thermal Physics*. Moscow, INFRA-M Publ. 262 (in Russian).
10. Pollack R. W. (2011) *Multi-Layer Building Insulation and Wallboard Sheet with Multi-Layer Insulation*. Patent US8011151B2.
11. Khroustalev B. M., Sizov V. D., Nesterov L. V. (2017) *Multilayer Wall Panel*. Patent of the Republic of Belarus No 20723 (in Russian).

Received: 20.05.2022

Accepted: 21.07.2022

Published online: 30.09.2022



<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-419-425>

УДК 621.316.925

## Повышение устойчивости функционирования измерительных органов тока микропроцессорных защит

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. А. Романюк<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. В. Ю. Румянцев<sup>1)</sup>, канд. техн. наук Ю. В. Румянцев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** В измерительных органах тока микропроцессорных защит контролируемые величинами обычно являются действующие значения основной гармоники тока. Они определяются по ортогональным составляющим входных сигналов, которые формируются цифровыми фильтрами Фурье. Вследствие инерционности указанных фильтров время получения достоверных действующих значений составляет один и более периодов входного тока, что преимущественно определяет быстродействие измерительного органа. При отклонении частоты входного сигнала от номинальной его действующие значения приобретают колебательный характер. В результате этого может иметь место неустойчивое функционирование указанного органа при величинах тока, находящихся вблизи областей срабатывания и возврата. Для повышения быстродействия измерительного органа предложено определить действующее значение тока путем умножения его величины, полученной с использованием ортогональных составляющих Фурье, на корректирующий коэффициент. Для обеспечения устойчивого функционирования органа тока рекомендовано осуществлять фильтрацию действующего значения тока с помощью цифрового фильтра скользящего среднего. Оценка эффективности предложенных решений выполнялась методом вычислительного эксперимента с использованием среды динамического моделирования MATLAB-Simulink. Предложенные решения обеспечивают повышение быстродействия измерительных органов тока и их устойчивое функционирование при отклонении частоты от номинальной. В результате проведенных исследований установлено, что предложенный цифровой измерительный орган тока в сравнении с органом на основе алгоритма Фурье имеет быстродействие в 1,4–2 раза больше. Кроме того, он устойчиво функционирует как при условии, когда ток срабатывания меньше тока повреждения, так и в случае, когда указанные токи соизмеримы при отклонении частоты от номинальной на  $\pm 2$  Гц. Предложенный цифровой измерительный орган может быть использован во многих микропроцессорных токовых защитах электроустановок.

**Ключевые слова:** измерительный орган тока, устойчивость функционирования, быстродействие, вычислительный эксперимент, MATLAB-Simulink

**Для цитирования:** Романюк, Ф. А. Повышение устойчивости функционирования измерительных органов тока микропроцессорных защит / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 419–425. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-419-425>

## Improving of Functioning Stability of Current Measuring Elements in Microprocessor Protections

F. A. Romaniuk<sup>1)</sup>, V. Yu. Rumiantsev<sup>1)</sup>, Yu. V. Rumiantsev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** In the measuring elements of the current of microprocessor protection, the controlled values are usually the effective values of the fundamental harmonic of the currents. They are determined by the orthogonal components of the input

### Адрес для переписки

Романюк Федор Алексеевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 331-00-51  
faromanuk@bntu.by

### Address for correspondence

Romaniuk Fiodar A.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 331-00-51  
faromanuk@bntu.by

signals, which are formed by digital Fourier filters. Due to the inertia of these filters, the time for obtaining reliable effective values is one or more periods of the input current, which mainly determines the speed of the measuring element. When the frequency of the input signal deviates from the nominal value, its effective values become oscillatory. As a result of this, unstable functioning of the specified organ may occur at current values that are close to the operation and return areas. To increase the speed of the measuring body, it is proposed to determine the effective value of the current by multiplying its value obtained using the orthogonal Fourier components by a correction factor. To ensure the stable functioning of the current organ, it is recommended to filter the effective current value using a digital moving average filter. Evaluation of the effectiveness of the proposed solutions has been carried out by the method of computational experiment using the dynamic simulation environment MATLAB-Simulink. The proposed solutions provide an increase in the speed of the current measuring organs and their stable operation when the frequency deviates from the nominal. As a result of the research, it has been found that the proposed digital current measuring organ in comparison with an organ based on the Fourier algorithm has a speed of 1.4-2 times greater. In addition, it functions stably both under the condition when the tripping current is less than the fault current, and in the case when the indicated currents are comparable when the frequency deviates from the nominal by  $\pm 2$  Hz. The proposed digital measuring body can be used in many microprocessor-based current protection of electric installations.

**Keywords:** current measuring element, stability of functioning, speed of operation, computational experiment, MATLAB-Simulink

**For citation:** Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2022) Improving of Functioning Stability of Current Measuring Elements in Microprocessor Protections. *Science and Technique*. 21 (5), 419–425. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-419-425> (in Russian)

## Введение

В основе действия измерительных органов тока (ИОТ) лежит принцип сравнения контролируемого информационного параметра, характеризующего входной сигнал, с заранее заданными значениями. По результатам этого сравнения фиксируется сработавшее либо несработавшее состояние ИОТ.

Измерительные органы тока с учетом свойств микропроцессорной защиты, в которой они используются, должны, помимо других требований, иметь высокое быстродействие и обеспечивать устойчивое состояние при контролируемом информационном параметре, находящемся вблизи областей срабатывания и возврата. В ИОТ микропроцессорных защит контролируемыми информационными параметрами, как правило, являются действующие значения основной гармоники токов. Для их определения широко используются ортогональные составляющие (ОС) входных сигналов. Формирование ОС указанных сигналов осуществляется главным образом с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и его модификаций [1]. Реализация ДПФ в большинстве микропроцессорных защит производится нерекурсивными цифровыми фильтрами (ЦФ) в силу их простоты и устойчивости функционирования.

Вследствие инерционности ЦФ время получения достоверных значений действующих величин основной гармоники входного тока затягивается до одного и более периодов, что преимущественно определяет быстродействие ИОТ. Для его повышения в [2] предложено вычислять указанные величины по эквивалентным ОС, которые формируются на основе ОС Фурье.

При отклонении частоты входного тока от номинальной действующие значения эквивалентного сигнала приобретают незатухающий колебательный характер [3]. Это приводит к неустойчивому функционированию ИОТ при величинах указанного тока, находящихся вблизи областей срабатывания и возврата. В результате может возникнуть необходимость введения ограничений на величину коэффициента возврата ИОТ, что, в конечном итоге, явится сдерживающим фактором в обеспечении высокой чувствительности микропроцессорной защиты. Для устранения данного недостатка могут использоваться формирователи ОС с соответствующей адаптивностью [4] либо специализированные алгоритмы с коррекцией коэффициентов ЦФ при отклонении частоты от номинальной. Наиболее простым решением, позволяющим уменьшить амплитуду колебаний действующих значений эквивалентного сигнала, является использование цифрового фильтра скользящего среднего [5].

## Основная часть

Для повышения динамических свойств ИОТ реализуется следующая последовательность действий.

С использованием нерекурсивных ЦФ Фурье по выборкам входного тока  $i_n$  выделяются его косинусная  $i_{cn}$  и синусная  $i_{sn}$  ОС основной частоты:

$$\begin{aligned} i_{cn} &= \sum_{n=0}^{N-1} a_{cn} i_n; \\ i_{sn} &= \sum_{n=0}^{N-1} a_{sn} i_n, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $N$  – число выборок на периоде основной частоты;  $a_{cn}$ ,  $a_{sn}$  – коэффициенты косинусного и синусного ЦФ соответственно.

Вычисляется амплитуда основной гармоники тока для произвольной выборки  $n$

$$I_{mn} = \sqrt{i_{cn}^2 + i_{sn}^2}. \quad (2)$$

Амплитуда  $I_{mn}$  пропускается через цифровое усилительное звено с нелинейным коэффициентом усиления, который в дальнейшем будем называть корректирующим  $k_{rn}$ . В результате этого формируется амплитуда эквивалентного тока

$$I_{meqn} = k_{rn} I_{mn}. \quad (3)$$

Для получения положительного эффекта, помимо прочего,  $k_{rn}$  задается с учетом характера изменения во времени амплитуды  $I_{mn}(t)$ . При этом необходимо обеспечить: в случае возрастания  $I_{mn}(t)$   $k_{rn} > 1$ ; когда уровень  $I_{mn}(t)$  не изменяется,  $k_{rn} = 1$ ; при снижении  $I_{mn}(t)$   $k_{rn} < 1$ .

Перечисленным выше характерным изменениям  $I_{mn}(t)$  присваивается признак  $l$ . Для этой цели фиксируются две смежные выборки амплитуды основной гармоники тока  $I_{mn}$  и  $I_{m(n-1)}$ , по которым с использованием методики и выражений, приведенных в [6, 7], вычисляется признак  $l$ . В результате, если  $l = 1$ , это свидетельствует о возрастании  $I_{mn}(t)$ , при  $l = 0$   $I_{mn}(t)$  не изменяется, а когда  $l = -1$ , это указывает на снижение  $I_{mn}(t)$ .

Выражения, по которым рассчитываются численные значения  $k_{rn}$ , определяются призна-

ком  $l$  и соотношением амплитуд сложного входного тока  $I_{mnd}$  и его основной гармоники  $I_{mn}$ . При этом амплитуда  $I_{mnd}$  для произвольной выборки  $n$  вычисляется по выражению

$$I_{mnd} = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_n^2}. \quad (4)$$

На основе проведенных исследований [2], а также изложенных в [8] результатов для определения  $k_{rn}$  предлагаются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} k_{rn} &= \frac{I_{mnd}^2}{I_{mn}^2} \text{ при } l = 1; \\ k_{rn} &= 1 \text{ при } l = 0; \\ k_{rn} &= \frac{I_{mn}^3}{I_{mnd}^3} \text{ при } l = -1. \end{aligned} \quad (5)$$

Принимая во внимание изложенное выше, с учетом (5) общее выражение для  $k_{rn}$  запишем в виде

$$k_{rn} = (|l| + 1) \frac{I_{mnd}^2}{I_{mn}^2} + (|l| - 1) \frac{I_{mn}^3}{I_{mnd}^3} + 1 - |l|. \quad (6)$$

Реализация предложенного алгоритма и использование в качестве контролируемого информационного параметра эквивалентного тока позволят улучшить динамику ИОТ. Однако при отклонении частоты входного тока от номинальной амплитуда эквивалентного тока изменяется во времени с незатухающими колебаниями и содержит при длине ЦФ Фурье  $N = 24$ , помимо постоянной составляющей, наиболее ярко выраженную вторую гармонику [9]. Амплитуда составляющей двойной частоты в этом случае при синусоидальном входном токе не превышает величину [9]

$$\Delta I_{\max} = |0,15 - 0,03f| I_{meq}, \quad (7)$$

где  $f$  – частота входного тока.

Однако ее наличие может обуславливать неустойчивое функционирование ИОТ при величинах эквивалентного тока, находящихся около областей срабатывания и возврата.

Наиболее рациональным решением, обеспечивающим уменьшение амплитуды колебательного процесса, является использование ЦФ скользящего среднего, который формирует амплитуду подлежащего сравнению тока в соответствии с выражением [10]

$$I_{mrn} = I_{mr(n-1)} + \frac{1}{M} (I_{meqn} - I_{meq(n-m)}), \quad (8)$$

где  $M$  – количество используемых при реализации ЦФ выборок из общего числа  $N$ .

Решение задачи синтеза ЦФ скользящего среднего состоит в выборе оптимального  $M$ , при котором обеспечивается приемлемая степень снижения колебаний с выполнением условия  $M < N$ . Следует учитывать, что с увеличением  $M$  амплитуда колебательного процесса уменьшается, однако при этом возрастает вносимая в установление  $I_{mrn}$  задержка:

$$t_y = M\Delta t, \quad (9)$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации входного тока.

На рис. 1 представлены амплитудно-частотные характеристики  $A(f)$  ЦФ скользящего среднего при  $N = 24$  и различных  $M$ . Их анализ позволяет определить оптимальное  $M$ , которое с учетом изложенного выше принято равным 10.

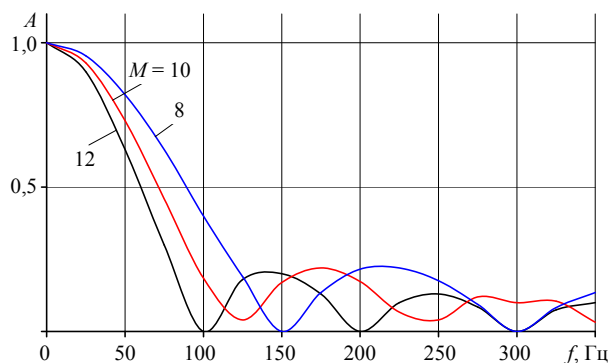


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики цифрового фильтра скользящего среднего

Fig. 1. Frequency response of digital moving average filter

По амплитудному значению тока  $I_{mrn}$  определяется его действующее значение, которое сравнивается с параметрами срабатывания и возврата. По результатам сравнения вырабатывается исполнительная команда о сработавшем или несработавшем состоянии ИОТ.

Благодаря использованию ЦФ скользящего среднего будет обеспечено повышение устойчивости функционирования ИОТ при отклонении частоты тока от номинальной.

## Моделирование

Оценка эффективности предложенных решений, направленных на совершенствование ИОТ микропроцессорных защит, выполнялась с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink. С этой целью в системе динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems реализована структура модели энергосистемы [11] для испытаний ИОТ (рис. 2а), включающая в себя модель энергосистемы, модель трансформатора тока (ТТ), которая позволяет воспроизводить насыщение его магнитной системы, нагрузку, блок задания вида короткого замыкания (КЗ), а также испытуемый блок ИОТ – Max Relay.

**Энергосистема (System)** представляется блоком модели трехфазного источника напряжения *3-Phase Source* из библиотеки SimPowerSystems (SPS).

**Трехфазная группа ТТ** с соединением вторичных обмоток и нагрузок по схеме «звезда с нулевым проводом» (блок *CT*). Поскольку библиотечный блок ТТ в библиотеке SPS отсутствует, из стандартных блоков Simulink была создана модель ТТ, в которой все геометрические параметры, необходимые для моделирования ТТ, рассчитываются по его паспортным данным [12].

**Короткое замыкание** (блок *Three-Phase Fault*) представляется блоком модели из библиотеки SPS, который моделирует трехфазное устройство, замыкающее фазы между собой, а также на землю.

**Нагрузка** (блок *Three-Phase Series RLC Load*) задается активными и реактивными мощностями.

**Модель ИОТ** выполнена в соответствии с вышеизложенной методикой и реализована в виде подсистемы (*Max Relay*).

В составной блок *ph. A signals* передаются все моделируемые сигналы, которые выводятся на осциллограф Scope.

На рис. 2б приведена структурная схема ИОТ фазы *A* (подсистема *Max Relay*), состоящая из библиотечных блоков среды моделирования MATLAB-Simulink.

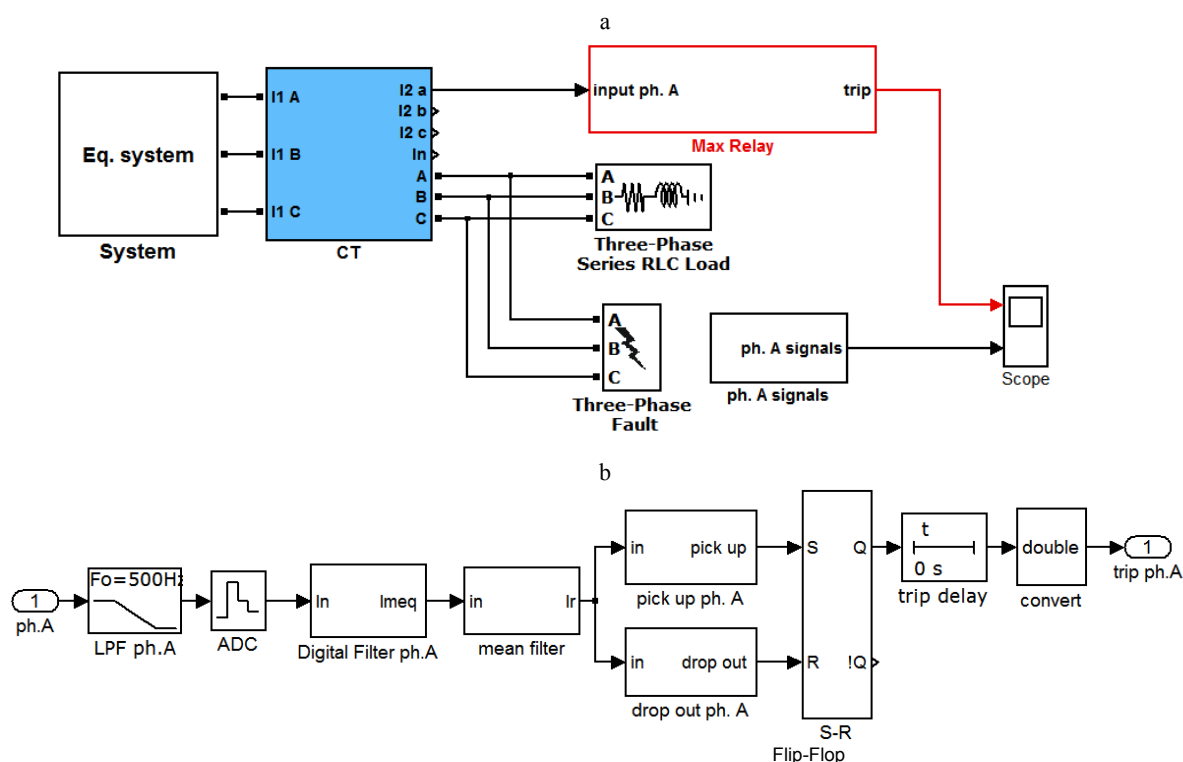


Рис. 2. Структура модели энергосистемы (а) и структурная схема измерительного органа тока фазы А (б)

Fig. 2. Structure of power system model (a) and block diagram of phase current measuring organ A (b)

Вторичный ток ТТ, являющийся входным сигналом для ИОТ, подается на антиалязинговый фильтр нижних частот (ФНЧ) второго порядка (*LPF ph. A*), частота среза которого выбирается равной половине частоты дискретизации. Выход ФНЧ соединяется с аналого-цифровым преобразователем (блок *ADC*), преобразующим непрерывный выходной сигнал ФНЧ в дискретный с числом отсчетов на период основной частоты, равным 24. В подсистеме *Digital Filter ph. A* определяется амплитуда эквивалентного тока в соответствии с (3). Далее эквивалентный ток  $I_{meq}$  поступает на вход ЦФ скользящего среднего (*mean filter*), где в соответствии с (8) формируется амплитудное, а затем и действующее значение выходного тока  $I_{mr}$ , в котором колебания подавлены до приемлемого уровня.

Для надежного функционирования ИОТ необходимо, чтобы условие его пуска (возврата) выполнялось в течение определенного времени. Эти операции реализуют блоки «Пуск» / «Возврат» (*pick up ph. A / drop out ph. A*). Если условие пуска (возврата) выполняется (не выполняется), то на выходе соответствующего блока формируются логические сигналы 1 (0). Сигнал с выхода блока «Пуск» поступает

на *S*-вход (установить), а сигнал с выхода блока «Возврат» – на *R*-вход (сбросить) *RS*-триггера, представленного блоком модели *S-R Flip-Flop*. Прямой выход *RS*-триггера *Q* подключается к блоку «Выдержка времени», представленному *trip delay*, который начинает отсчет выдержки времени (при условии ее задания), если на его входе присутствует логическая 1. Блок *convert* реализован стандартным блоком *Data Type Conversion*, который преобразует логический сигнал в сигнал удвоенной точности *double*.

На рис. 3 приведены результаты функционирования ИОТ, реализованного в соответствии с рассмотренной структурной схемой (рис. 2b), в сравнении с ИОТ, выполненным по такой же схеме, но на основе ЦФ Фурье (в дальнейшем – ИОТ Фурье) при тестовом воздействии, приближенном к реальному вторичному току ТТ.

В промежутке времени  $t = 0-0,1$  с моделируется доаварийный режим, при котором вторичный ток ТТ синусоидален. В момент времени  $t = 0,1$  с происходит трехфазное КЗ – аварийный режим, при котором форма вторичного тока ТТ искажается (рис. 3, кривая 1). Кривая 2 отражает работу ИОТ Фурье, а 4 – функционирование предлагаемого ИОТ.

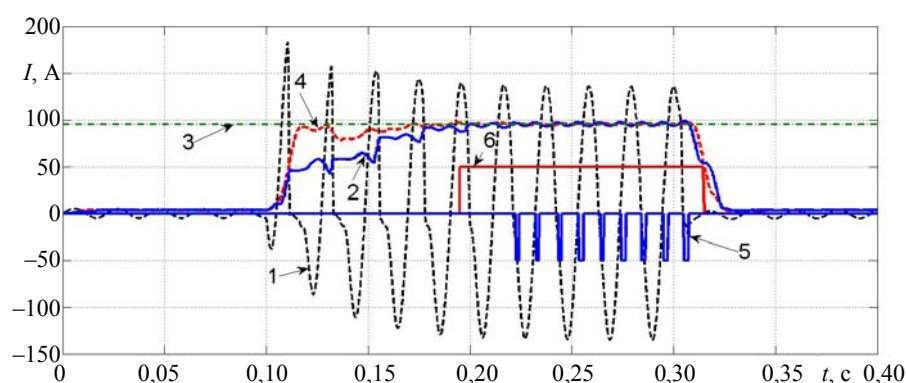


Рис. 3. Результаты моделирования двух измерительных органов тока – предлагаемого и выполненного на основе цифровых фильтров Фурье

Fig. 3. Simulation results of two current measuring elements – proposed and implemented on the basis of digital Fourier filters

Срабатывание ИОТ – *trip* (рис. 3, кривые 5, 6) происходит при условии превышения контролируемым сигналом уставки срабатывания (прямая 3) через время, установленное параметром успешных отсчетов, превышающих уставку срабатывания (в приведенных расчетах равно трем). Параметр *trip* принимает значение 1 – срабатывание ИОТ и 0 – несрабатывание ИОТ (для наглядности эти значения умножены на  $\pm 50$ ). На рис. 3 показан случай, когда КЗ, помимо искажения формы кривой тока, сопровождается понижением частоты до 48 Гц, что проявляется в колебательном характере действующего значения выходного сигнала ИОТ Фурье. При этом, если ток КЗ близок к уставке срабатывания ИОТ (принята равной 95 А), как изображено на рис. 3, нарушается устойчивость функционирования последнего, которая выражается в регулярном переключении параметра *trip* у ИОТ Фурье (рис. 3, кривая 5) из состояния несрабатывания в состояние срабатывания и наоборот.

Предлагаемый ИОТ выполнен с использованием сглаживающего ЦФ скользящего среднего, который снижает уровень колебаний выходного сигнала. При этом несколько ухудшается динамика работы ИОТ при возрастании и уменьшении сигнала. Однако при использовании для его реализации 10 из 24 выборок на период основной частоты снижение динамики не является критичной. Поэтому предлагаемый ИОТ будет устойчиво функционировать как при условии, когда ток срабатывания защиты и ток КЗ соизмеримы, так и в случае, когда ток срабатывания меньше тока КЗ. В последнем

случае, если понизить уставку срабатывания, например, до 75 А (мысленно провести прямую 3 на указанном уровне), то время нарастания выходных сигналов рассматриваемых ИОТ до уровня срабатывания у предлагаемого ИОТ наступает в момент времени, равный 0,12 с, а у ИОТ Фурье – 0,16 с, т. е. последний срабатывает на два периода промышленной частоты позже.

## ВЫВОДЫ

1. Предложены алгоритмические решения для построения быстродействующих цифровых измерительных органов тока, обеспечивающие их устойчивое функционирование при отклонении частоты от номинального значения.
2. Реализованные на основе разработанных и исследованных решений цифровые измерительные органы тока могут быть использованы во многих микропроцессорных токовых защитах электроустановок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.
3. Снижение влияния изменений частоты на формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений

- СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 42–54. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54>.
4. Kasztenny, B. Two Measuring Algorithms for Generator and Transformer Relaying / B. Kasztenny, E. Rosolowski // IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. Vol. 13, Iss. 4. P. 1053–1059. <https://doi.org/10.1109/61.714447>.
  5. Фадке Арун, Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / Г. Фадке Арун, С. Торп Джеймс. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
  6. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108>.
  7. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339>.
  8. Компенсация динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208>.
  9. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417>.
  10. Обработка сигналов в интеллектуальных сетях энергосистем / Ф. П. Рибейро [и др.]. М.: Техносфера, 2020. 496 с.
  11. Цифровой измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформатора тока / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493>.
  12. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
  - nents of the Relay Protection Input Signals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 42–54. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54> (in Russian).
  4. Kasztenny B., Rosolowski E. (1998) Two Measuring Algorithms for Generator and Transformer Relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13 (4), 1053–1059. <https://doi.org/10.1109/61.714447>.
  5. Phadke Arun G., Thorp James S. (2019) *Computer Relaying for Power Systems*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Tekhnosfera Publ. 370 (in Russian).
  6. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Improvement of Algorithm for Formation of Orthogonal Components of Input Quantities in Microprocessor Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108> (in Russian).
  7. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Kachenya V. S. (2020) Orthogonal Components Forming of the Microprocessor-Based Protection Input Signals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339> (in Russian).
  8. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2022) Compensation of Dynamic Phase Error in the Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Microprocessor Protections. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208> (in Russian).
  9. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417> (in Russian).
  10. Rebeiro P. F., Duque C. A., da Silveira P. M., Cerqueira A. S. (2013) *Power Systems Signal Processing for Smart Grids*. Wiley. 448.
  11. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2018) Digital Current Measurement Element for Operation During Current Transformer Severe Saturation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493> (in Russian).
  12. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor Current Protection: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, Belarusian National Technical University. 168 (in Russian).

Поступила 12.05.2022

Подписана в печать 11.07.2022

Опубликована онлайн 30.09.2022

## REFERENCES

1. Schneerson E. M. (2007) Digital relay protection. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. A., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412> (in Russian).
3. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A. (2020) Reducing the Impact of the Frequency Change on the Formation of Orthogonal Components of the Relay Protection Input Signals.

Received: 12.05.2022

Accepted: 11.07.2022

Published online: 30.09.2022



<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-426-435>

УДК 332.1

## Методическое обеспечение оценки уровня развития логистической инфраструктуры

Докт. экон. наук, проф. Р. Б. Ивуть<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. П. В. Попов<sup>2)</sup>,  
канд. экон. наук, доц. П. И. Лапковская<sup>1)</sup>, канд. пед. наук, доц. О. П. Меркулова<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Волжский филиал Волгоградского государственного университета  
(Волжский, Российская Федерация),

<sup>3)</sup>Волгоградский государственный социально-педагогический университет  
(Волгоград, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** В статье представлены результаты исследования в области оценки уровня развития логистической инфраструктуры регионов. Проведенный анализ существующих подходов и методов оценки логистической инфраструктуры выявил, что большинство из них учитывают преимущественно транспортную составляющую логистической инфраструктуры, а финансовая и информационная составляющие представлены показателями прямых иностранных инвестиций в человеческий капитал и стоимости логистических объектов. При этом оценка некоторых показателей производится исследователями в основном с помощью экспертных методов. Для оценки уровня развития логистической инфраструктуры областей Республики Беларусь с целью их сравнительного анализа и изучения динамики разработана методика оценки логистической инфраструктуры регионов. Чтобы устранить выявленные особенности существующих подходов к оценке логистической инфраструктуры, в представленной авторами методике использовались показатели, описывающие развитие как транспортной, так и складской, информационной и финансовой составляющих логистической инфраструктуры, с применением экономико-математических методов обработки и оценки данных. После отбора показателей и сбора данных оценивали соответствие распределения значений показателей в выборке нормальному закону распределения с использованием критерия Колмогорова – Смирнова с проверкой на мультиколлинеарность. Далее осуществляли перевод всех показателей в одну шкалу измерения и проверку их внутренней согласованности с использованием коэффициента  $\alpha$ -Кронбаха. Для апробации разработанной методики проводили сравнение логистической инфраструктуры регионов Беларуси и оценку ее динамики по данным за 2015, 2018 и 2021 гг. с помощью факторного анализа. Расчеты по всем этапам выполняли в программе IBM SPSS Statistics 20.

**Ключевые слова:** логистическая инфраструктура, факторный анализ, регионы, моделирование

**Для цитирования:** Методическое обеспечение оценки уровня развития логистической инфраструктуры / Р. Б. Ивуть [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 426–435. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-426-435>

### Адрес для переписки

Ивуть Роман Болеславович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-75-31  
eut\_atf@bntu.by

### Address for correspondence

Ivut Roman B.  
Belarusian National Technical University  
12, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-75-31  
eut\_atf@bntu.by



# Methodological Support for Assessing Development Level of Logistics Infrastructure

R. B. Ivut<sup>1)</sup>, P. V. Popov<sup>2)</sup>, P. I. Lapkovskaya<sup>1)</sup>, O. P. Merkulova<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Volga Branch of Volgograd State University (Volzhsky, Russian Federation),

<sup>3)</sup>Volgograd State Pedagogical University (Volgograd, Russian Federation)

**Abstract.** The paper presents the results of a study in the field of assessing the level of development of the logistics infrastructure of the regions. The analysis of existing approaches and methods for assessing the logistics infrastructure revealed that most of them take into account mainly the transport component of the logistics infrastructure, and the financial and information components are represented by indicators of foreign direct investment in human capital and the cost of logistics facilities. At the same time, the assessment of some indicators is carried out by researchers mainly with the help of expert methods. To assess the level of development of the logistics infrastructure of the regions of the Republic of Belarus for the purpose of their comparative analysis and study of the dynamics, a methodology has been developed for assessing the logistics infrastructure of the regions. In order to eliminate the identified features of existing approaches to the assessment of the logistics infrastructure, the methodology presented by the authors used indicators that describe the development of both the transport and storage, information and financial components of the logistics infrastructure using economic and mathematical methods for processing and evaluating data. After selecting indicators and collecting data on them, an assessment was made of the correspondence of the distribution of indicator values in the sample to the normal distribution law using the Kolmogorov – Smirnov criterion with a check for multicollinearity. Further, all indicators were transferred to one measurement scale and the internal consistency of the indicators was checked using the  $\alpha$ -Cronbach coefficient. To test the developed methodology, a comparison was made of the logistics infrastructure of the regions of the Republic of Belarus and an assessment of its dynamics based on data for 2015, 2018 and 2021, using factor analysis. Calculations for all stages of the developed methodology were carried out using the IBM SPSS Statistics 20 program.

**Keywords:** logistics infrastructure, factor analysis, regions, modeling

**For citation:** Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I., Merkulova O. P. (2022) Methodological Support for Assessing Development Level of Logistics Infrastructure. *Science and Technique*. 21 (5), 426–435. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-21-5-426-435> (in Russian)

## Введение

В настоящее время конкурентоспособность отдельных регионов страны определяется наличием эффективно функционирующей логистической инфраструктуры, которая способствует продвижению отечественной продукции на внутренний и зарубежный рынки. В то же время в [1] отмечается, что для успешной интеграции региона в систему мировых хозяйственных связей и возможности выхода поставщиков транспортных услуг на зарубежные рынки требуется развитая транспортно-логистическая инфраструктура. Л. Ю. Бережная обозначила, что «развитие торговли и увеличение объемов товарооборота приводят к необходимости формирования эффективной логистической инфраструктуры» [2], при этом особо актуальным является вопрос развития логистической инфраструктуры в условиях экономической стагнации. В [3] отмечено, что для оценки объективного состояния динамики и перспектив экономического развития регионов страны следует

использовать рейтинг логистической инфраструктуры, где целесообразно проводить оценку основных ее составляющих: транспорта, хранения, наличия сервисных фирм, выполняющих экспедиторские и прочие услуги, связанные с движением материальных потоков, информационного обеспечения, наличия налаженных схем взаимодействия с логистическими операторами. В [4, 5] дана оценка влияния транспортно-логистической инфраструктуры регионов Республики Беларусь и Российской Федерации на социально-экономические показатели их развития. Отдельные авторы [6] выделяют в особый предмет исследования цифровую составляющую логистической инфраструктуры, что весьма актуально.

Особое внимание логистической инфраструктуре уделяется в программах развития логистических систем Республики Беларусь и Российской Федерации. Например, в Республиканской программе развития логистической системы и транзитного потенциала Беларуси отмечено, что совершенствование логистиче-

ской инфраструктуры страны будет выступать ключевым драйвером ее социально-экономического развития [7]. Инновационный сценарий развития Российской Федерации [8] предусматривает создание конкурентоспособных на мировом уровне транспортных коридоров на базе технически и технологически интегрированной транспортно-логистической инфраструктуры, а также систем координации бизнес-процессов в цепях поставок на основе интеллектуальных транспортных систем. Таким образом, повышению уровня развития логистической инфраструктуры регионов уделяется значительное внимание и на государственном уровне.

### Основная часть

Наиболее известной методикой оценки транзитного потенциала страны и уровня развития транспортной инфраструктуры является расчет индекса эффективности логистики *LPI*, разработанной экспертами Всемирного банка совместно с учеными Университета г. Турку. Индекс рассчитывается по формуле

$$LPI = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6}{6},$$

где  $l_1-l_6$  – критерий оценки функционирования и уровня развития таможен, инфраструктуры, международных перевозок, логистического обслуживания, возможности отслеживания грузов и своевременности поставок соответственно.

Оценка каждого критерия производится на основании опроса специалистов, работающих в сфере международных грузоперевозок. Оценка качества транспортной инфраструктуры может проводиться также на основании методики, разработанной Министерством транспорта Российской Федерации в рамках программы «Развитие транспортной системы» [9]. Методика включает в себя расчет интегрального показателя – индекса качества транспортной инфраструктуры – по формуле

$$I_i = K_1V_1 + K_2V_2 + K_3V_3 + K_4V_4 + K_5V_5,$$

где  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  – индекс качества инфраструктуры железнодорожного, автомобильного, морского, внутреннего водного и воздушного транспорта соответственно;  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  – объем транспортной работы железнодорожно-

го, автомобильного, морского, внутреннего водного и воздушного транспорта соответственно.

Методика применима для оценки уровня развития транспортно-логистической инфраструктуры как Российской Федерации в целом, так и регионов страны. Количественное значение индексов качества инфраструктур должно определяться на основе опроса экспертов, работающих в сфере оказания транспортно-логистических услуг. К методикам, основанным на опросе экспертов в области грузоперевозок, следует отнести расчет индекса качества портовой инфраструктуры. Данный индекс входит в показатель конкурентоспособности путешествий и туризма (*TTCI*), который публикуется Всемирным экономическим форумом. Он позволяет оценивать и сравнивать уровень развития портовой инфраструктуры с позиции качества функционирования экспертным методом по семибалльной шкале. Значение индекса рассчитывается как среднее арифметическое баллов экспертов.

Необходимо отметить также методику многофакторной оценки транзитного потенциала стран, предложенную в [10]. Автор рекомендует анализ уровня развития проводить раздельно по трем группам факторов:

- инфраструктурные;
- экономико-правовые;
- технологические.

Количественная оценка инфраструктурных факторов включает расчет таких показателей, как: густота сети, транспортная обеспеченность населения на 10 тыс. чел., обобщенный показатель Энгеля и уточненный Успенского. Экономико-правовые факторы предполагают расчет объема транзитного грузооборота и статистическое значение величины экспорта транспортных услуг. Методика оценки влияния технологических факторов основана на расчете *LPI*. Общую оценку развития транзитного потенциала страны Р. Б. Ивуть предлагает осуществлять путем сравнения количественных значений факторов со значениями других стран.

Все вышеперечисленные методики включают опрос экспертов, что не исключает субъективность полученных данных.

Количественную оценку качества транспортной инфраструктуры по показателю отно-

сительной транспортной доступности региона предложил М. В. Иванов [11]

$$\text{УТД} = \frac{\text{КТД}_i}{\overline{\text{КТД}}} \cdot 100 \%,$$

где  $\text{КТД}_i$  – комплексный показатель транспортной доступности  $i$ -го региона;  $\overline{\text{КТД}}$  – среднее значение комплексного показателя транспортной доступности по макрорегиону.

Комплексный показатель транспортной доступности территориально-транспортной системы взаимоувязывался с макроэкономическими индикаторами субъекта страны

$$\text{КТД} = \frac{A\Phi}{C},$$

где  $A$  – приведенный объем перевезенных грузов и количества пассажиров территориально-транспортной системы, привед. т;  $\Phi$  – стоимость основных фондов транспортной инфраструктуры, руб.;  $C$  – транспортные расходы территориально-транспортной системы, руб.

Комплексный метод оценки региональной логистической инфраструктуры предложен А. Н. Рахмангуловым и О. А. Копыловой в [12]. Авторы выделили три группы факторов, характеризующих деятельность транспорта, состояние транспортных коммуникаций и принадлежность к климатической зоне. Уровень развития региональной логистической инфраструктуры они определяли по формуле

$$S_j = \sqrt{\frac{K_1^2 + K_2^2 + K_3^2}{3}},$$

где  $K_1^2$ ,  $K_2^2$ ,  $K_3^2$  – консолидированные коэффициенты по группам – инфраструктурные и географические факторы, транспортная работа соответственно.

Ф. Carlucci с соавторами [13] предложили оценивать уровень развития логистической инфраструктуры провинций и районов Италии с помощью интегрального показателя *ACIT*. Для районов *ACIT* рассчитывается как сумма произведений количественных значений показателей транспортной работы и инвестиций в основной капитал на их значимость. Значимость предлагается определять экспертным ме-

тодом путем опроса специалистов в области оказания транспортных услуг. Для провинций оценка интегрального показателя *ACIT* основывалась на значениях индексов деятельности всех видов транспорта, а также на обеспечивающей составляющей логистической инфраструктуры (стоимости логистических объектов, количестве транспорта и специалистов по логистике).

Представленные выше методы учитывают преимущественно транспортную составляющую логистической инфраструктуры. Финансовая и информационная составляющие представлены показателями прямых иностранных инвестиций в человеческий капитал и стоимости логистических объектов.

На основе алгоритма оценки логистической инфраструктуры в [14] для оценки уровня развития логистической инфраструктуры областей Беларуси с целью их сравнительного анализа и изучения динамики представлена методика оценки уровня развития логистической инфраструктуры, включающая следующие этапы:

1) определение показателей оценки уровня логистической инфраструктуры. В качестве показателей основной и обеспечивающей составляющих логистической инфраструктуры приняты:

- объем перевозок порта (морские и внутренние водные), млн т ( $K_1$ );
- число организаций, занимающихся транспортной, почтовой и курьерской деятельностью, складированием, шт. ( $K_2$ );
- число логистических центров, шт. ( $K_3$ );
- отправление грузов автомобильным транспортом, тыс. т ( $K_4$ );
- перевозка грузов воздушным транспортом, тыс. т ( $K_5$ );
- объем иностранных инвестиций в транспортную, почтовую и курьерскую деятельность, складирование, млн дол. ( $K_6$ );
- количество предприятий, оказывающих финансовые и страховые услуги, шт. ( $K_7$ );
- количество компаний, использующих в своей деятельности ИКТ, шт. ( $K_8$ );
- перевозка пассажиров автомобильным транспортом, млн чел. ( $K_9$ );
- перевозка пассажиров внутренним водным транспортом, тыс. чел. ( $K_{10}$ );

2) проведение оценки соответствия распределения значений в выборке нормальному закону распределения с использованием критерия Колмогорова – Смирнова. Если распределение значений в выборке отлично от нормального закона, показатель исключается из дальнейшего исследования;

3) проведение проверки на мультиколлинеарность для оставшихся характеристик. Для этого можно использовать матрицу интеркорреляций, построенную с помощью метода линейной корреляции Пирсона. Из дальнейшего рассмотрения исключаются критерии, для которых характерно наибольшее количество значений коэффициента Пирсона, равного или более 0,7;

4) применение метода z-оценок для перевода всех показателей в одну шкалу измерения;

5) проверку внутренней согласованности показателей с использованием коэффициента  $\alpha$ -Кронбаха. Если корреляционная зависимость между всеми характеристиками более 0,7, это свидетельствует о невозможности проведения исследования вследствие сильной тесноты взаимосвязи между показателями;

6) сравнение уровня развития логистической инфраструктуры регионов и оценка ее динамики.

Для апробации разработанной методики проводили сравнение логистической инфраструктуры регионов Республики Беларусь и оценку ее динамики по данным за 2015, 2018

и 2021 гг. с использованием факторного анализа и способа вращения – варимакс с нормализацией Кайзера. Расчеты по всем этапам разработанной методики выполняли в программе IBM SPSS Statistics 20.

Основные статистические данные показателей, значение критерия Колмогорова – Смирнова и значимость за 2015 г. приведены в табл. 1.

Согласно табл. 1, полученные результаты показали значительный разброс количественных значений по всем исследуемым показателям за 2015 г. Это свидетельствует о неравномерности деятельности транспорта в областях Республики Беларусь, а также о наличии различного количества предприятий, оказывающих услуги в области грузоперевозок, финансовой и информационной сферах. Наибольшее различие в значениях характерно для показателя  $K_6$ , что обусловлено доминированием Минской области по объему иностранных инвестиций по сравнению с другими регионами страны.

Значение критерия Колмогорова – Смирнова и уровень значимости  $p \geq 0,05$  позволяют сделать вывод об отсутствии различий между распределением значений в выборке и нормальным законом распределения. Исходя из этого, все показатели могут быть использованы для дальнейшего исследования.

Таблица 1

Статистические данные показателей по областям Беларуси за 2015 г.  
Statistical data of indicators by regions of Belarus for 2015

| Показатель | Статистические данные показателей |          |          | Стандартное отклонение | Статистика критерия | Значимость показателя |
|------------|-----------------------------------|----------|----------|------------------------|---------------------|-----------------------|
|            | Минимум                           | Максимум | Среднее  |                        |                     |                       |
| $K_1$      | 0                                 | 945      | 493,33   | 434,51                 | 0,503               | 0,962                 |
| $K_2$      | 1284                              | 6548     | 2345,33  | 2067,75                | 1,080               | 0,194                 |
| $K_3$      | 0                                 | 29       | 6,17     | 11,32                  | 0,917               | 0,370                 |
| $K_4$      | 14947,3                           | 82325,4  | 30037,63 | 25906,06               | 0,996               | 0,274                 |
| $K_5$      | 0                                 | 37,1     | 6,47     | 15,02                  | 1,121               | 0,162                 |
| $K_6$      | 0,40                              | 3535,4   | 596,6    | 1439,73                | 1,196               | 0,114                 |
| $K_7$      | 26                                | 538      | 122      | 204,08                 | 1,132               | 0,154                 |
| $K_8$      | 485                               | 838      | 647,17   | 127,21                 | 0,376               | 0,999                 |
| $K_9$      | 107,16                            | 221,21   | 154,42   | 41,12                  | 0,636               | 0,813                 |
| $K_{10}$   | 0,10                              | 66       | 24,12    | 29,818                 | 0,898               | 0,396                 |

Значение коэффициента  $\alpha$ -Кронбаха равно 0,243, что свидетельствует о низкой тесноте связи между выбранными характеристиками, а, следовательно, об их низкой согласованности. Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии избыточности данных.

Показатели описательной статистики, значение критерия Колмогорова – Смирнова и значимость за 2018 г. приведены в табл. 2.

Как и для 2015 г., анализ статистических данных в табл. 2 свидетельствует об их большом разбросе для всех показателей, что позволяет сделать вывод о существенных различиях областей Беларуси по объему грузовых и пассажирских перевозок, количеству предприятий, оказывающих складские, финансовые и страховые услуги, использующих ИКТ. Заметно существенное отличие Минской области от остальных регионов страны по количеству логистических центров и объему иностранных

инвестиций в объекты транспортной составляющей логистической инфраструктуры.

Уровень значимости  $p \geq 0,05$  и значения критерия Колмогорова – Смирнова позволяют сделать вывод о подтверждении нулевой гипотезы, т. е. об отсутствии различий между распределением значений для каждого показателя и нормальным законом распределения. Таким образом, из дальнейшего исследования не должен быть исключен ни один показатель. Проверка на мультиколлинеарность показала малую тесноту связи между исследуемыми характеристиками, так как значение коэффициента  $\alpha$ -Кронбаха равно 0,222. Это свидетельствует об отсутствии избыточности выбранных показателей.

Показатели описательной статистики, значение критерия Колмогорова – Смирнова и значимость за 2021 г. приведены в табл. 3.

Таблица 2

Статистические данные показателей по областям Беларуси за 2018 г.

Statistical data of indicators by regions of Belarus for 2018

| Показатель | Статистические данные показателей |          |          | Стандартное отклонение | Статистика критерия | Значимость показателя |
|------------|-----------------------------------|----------|----------|------------------------|---------------------|-----------------------|
|            | Минимум                           | Максимум | Среднее  |                        |                     |                       |
| $K_1$      | 0                                 | 744,6    | 365,75   | 332                    | 0,485               | 0,973                 |
| $K_2$      | 1087                              | 5286     | 1978     | 1634,17                | 1,018               | 0,251                 |
| $K_3$      | 1                                 | 36       | 7,83     | 13,93                  | 0,945               | 0,334                 |
| $K_4$      | 13534,1                           | 68600,1  | 28479,37 | 20117,97               | 0,988               | 0,283                 |
| $K_5$      | 0                                 | 48,8     | 8,6      | 19,72                  | 1,100               | 0,178                 |
| $K_6$      | 0,20                              | 1859,9   | 316,93   | 755,94                 | 1,187               | 0,120                 |
| $K_7$      | 19                                | 454      | 101,33   | 173,1                  | 1,107               | 0,172                 |
| $K_8$      | 504                               | 846      | 633,5    | 126,516                | 0,471               | 0,980                 |
| $K_9$      | 101,54                            | 211,49   | 147,01   | 38,77                  | 0,619               | 0,839                 |
| $K_{10}$   | 5,3                               | 79,9     | 27,87    | 30,3                   | 0,647               | 0,797                 |

Таблица 3

Статистические данные показателей по областям Беларуси за 2021 г.

Statistical data of indicators by regions of Belarus for 2021

| Показатель | Статистические данные показателей |          |          | Стандартное отклонение | Статистика критерия | Значимость показателя |
|------------|-----------------------------------|----------|----------|------------------------|---------------------|-----------------------|
|            | Минимум                           | Максимум | Среднее  |                        |                     |                       |
| $K_1$      | 0                                 | 1291,7   | 416,367  | 473,26                 | 0,647               | 0,797                 |
| $K_2$      | 985                               | 5083     | 1822,83  | 1607,38                | 1,028               | 0,242                 |
| $K_3$      | 1                                 | 42       | 9,5      | 16,02                  | 1,028               | 0,241                 |
| $K_4$      | 12442,7                           | 61389,2  | 25800,58 | 17930,61               | 0,955               | 0,321                 |
| $K_5$      | 0                                 | 36,4     | 6,1      | 14,84                  | 1,195               | 0,115                 |
| $K_6$      | 0,07                              | 971,5    | 164,86   | 395,19                 | 1,185               | 0,120                 |
| $K_7$      | 21                                | 465      | 102,5    | 177,8                  | 1,132               | 0,154                 |
| $K_8$      | 502                               | 882      | 644      | 139,32                 | 0,544               | 0,929                 |
| $K_9$      | 82,7                              | 181,27   | 125,13   | 33,75                  | 0,508               | 0,958                 |
| $K_{10}$   | 0,30                              | 21,4     | 8,68     | 8,43                   | 0,476               | 0,977                 |

Данные описательной статистики в табл. 3 свидетельствуют о большом разбросе значений по областям Беларуси по каждому показателю, что обусловлено неравномерностью развития различных видов транспорта в регионах страны. В дальнейшем исследовании могут быть использованы все показатели, так как уровень значимости  $p \geq 0,05$  и значения критерия Колмогорова – Смирнова свидетельствуют о нормальном распределении значений каждой характеристики. Проверка исходных данных на избыточность показала малую корреляционную связь между ними, так как значение коэффициента  $\alpha$ -Кронбаха равно 0,206. Это позволяет далее в исследовании использовать все выбранные характеристики.

На следующем этапе работы проводили оценку уровня развития логистической инфраструктуры областей Республики Беларусь и их сравнение. Для этого использовали факторный анализ. Полученные в результате расчета данные показали наличие двухфакторной структуры представления данных, так как накопленный процент от общей дисперсии составляет: 2015 г. – 96,177 %, 2018 г. – 95,766 %, 2021 г. – 95,797 %. Значения факторных нагрузок после вращения по методу варимакс представлены в табл. 4.

Результаты, приведенные в табл. 4, подтверждают предположение о наличии двух факторов для всех исследуемых временных интервалов. Извлеченные факторы позволяют

описать исследуемые характеристики основной и обеспечивающей составляющих логистической инфраструктуры. Необходимо отметить, что факторная структура в 2015, 2018 и 2022 гг. по включенным в них признакам идентична.

Фактор 1 (табл. 4) положительно связан с показателями основной (грузоперевозки всеми видами транспорта, за исключением внутреннего водного, и перераспределение товаров) и обеспечивающей (финансовые и страховые услуги, объем иностранных инвестиций) составляющих логистической инфраструктуры. Фактор 2 может быть однозначно интерпретирован как обобщающий деятельность автомобильного транспорта в области пассажирских перевозок и внутреннего водного – в области перевозок грузов. Следует отметить большие значения факторных нагрузок для каждого признака, позволяющие четко определить факторную структуру.

На рис. 1 показана связь между извлеченными факторами в виде объектной диаграммы, где оси представлены первым и вторым факторами.

Согласно рис. 1, есть существенный дисбаланс в уровне логистической инфраструктуры областей республики. Все регионы страны можно разделить на три группы вне зависимости от календарного года:

- 1 – Минская область;
- 2 – Гомельская и Брестская области;
- 3 – Витебская, Могилевская и Гродненская области.

Таблица 4

**Факторные нагрузки показателей логистической инфраструктуры после вращения**

**Factor loads of indicators of logistics infrastructure after rotation**

| Показатель | Факторная нагрузка |        |         |        |         |        |
|------------|--------------------|--------|---------|--------|---------|--------|
|            | 2015 г.            |        | 2018 г. |        | 2021 г. |        |
|            | 1                  | 2      | 1       | 2      | 1       | 2      |
| $K_1$      | -0,362             | 0,868  | -0,352  | 0,862  | -0,233  | 0,939  |
| $K_2$      | 0,962              | -0,270 | 0,971   | 0,239  | 0,975   | -0,222 |
| $K_3$      | 0,980              | -0,186 | 0,976   | -0,205 | 0,969   | -0,245 |
| $K_4$      | 0,969              | -0,242 | 0,954   | -0,260 | 0,937   | -0,315 |
| $K_5$      | 0,949              | -0,296 | 0,956   | -0,276 | 0,967   | -0,230 |
| $K_6$      | 0,955              | -0,269 | 0,964   | -0,237 | 0,969   | -0,222 |
| $K_7$      | 0,968              | -0,232 | 0,975   | -0,199 | 0,978   | 0,190  |
| $K_8$      | 0,896              | 0,311  | 0,942   | 0,226  | 0,941   | 0,190  |
| $K_9$      | -0,075             | 0,970  | -0,058  | 0,978  | -0,042  | 0,968  |
| $K_{10}$   | -0,119             | 0,959  | -0,112  | 0,926  | -0,214  | 0,892  |

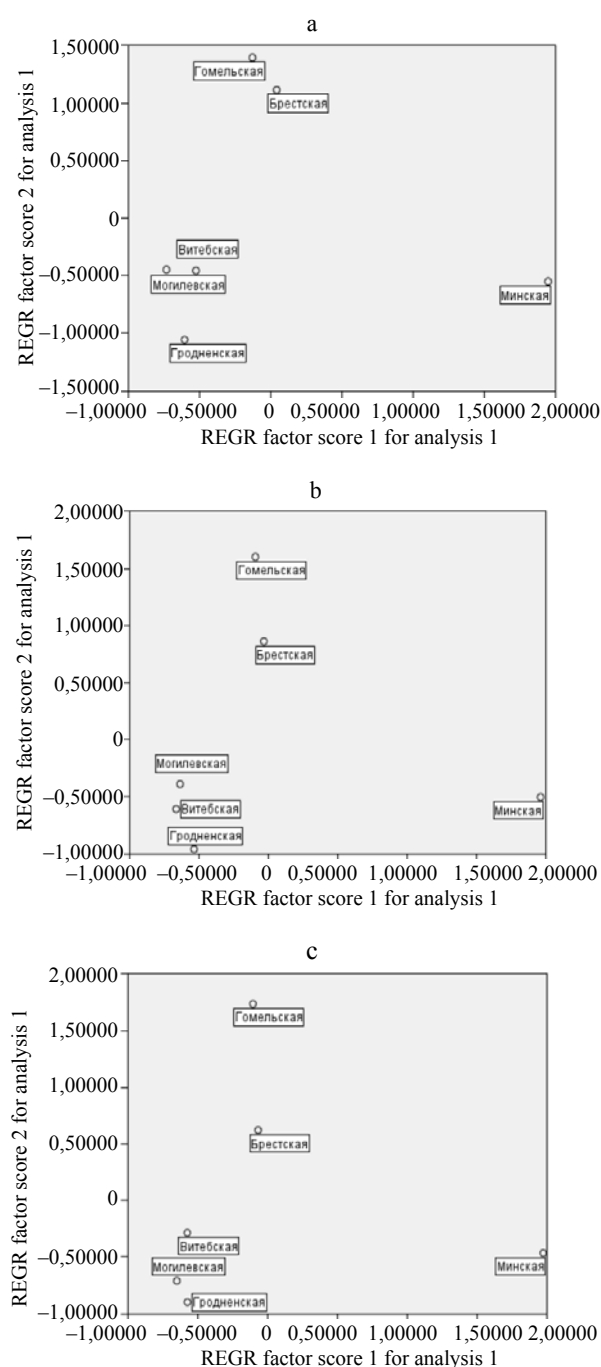


Рис. 1. Объектная диаграмма областей Республики Беларусь: а – 2015 г.; б – 2018 г.; в – 2021 г.

Fig. 1. Region object diagram of the Republic of Belarus: а – 2015; б – 2018; в – 2021

Необходимо отметить, что структура групп для каждого года идентична.

К первой группе следует отнести регион, для которого характерно доминирование первого фактора. Для Минской области отмечается преобладание грузовых перевозок над пасса-

жирскими по сравнению с другими областями. В данном регионе сконцентрировано существенно большее количество финансовых и страховых предприятий, а также компаний, оказывающих услуги по хранению товаров и их транспортировке. Также следует отметить, что на Минскую область приходится большая часть объема иностранных инвестиций в развитие транспортной инфраструктуры. Исходя из этого, можно сделать вывод, что в данной области более широк спектр оказываемых логистических услуг.

Вторая группа характеризуется доминированием в большей мере второго фактора. В Гомельской и Брестской областях заметнее выражена транспортная деятельность в сфере пассажирских перевозок (автомобильный и внутренний водный транспорт) и грузоперевозок (внутренний водный транспорт). Это позволяет сделать вывод о более высоком уровне развития портовой инфраструктуры по сравнению с другими регионами страны.

В третью группу отнесены области республики, для которых характерны более низкие показатели объемов пассажирских перевозок (автомобильный и внутренний водный транспорт) и грузоперевозок (внутренний водный транспорт) по сравнению с областями второй группы. Это обусловлено как слабым развитием портовой инфраструктуры (Гродненская область), так и меньшим объемом иностранных инвестиций в транспортную инфраструктуру.

Следует отметить, что за рассматриваемый период (2015, 2018 и 2021 гг.) произошло незначительное изменение в соотношении уровня логистической инфраструктуры регионов. В Гомельской области в 2018 и 2021 гг., по сравнению с 2015-м, наблюдалось увеличение пассажирских перевозок в общем объеме транспортных услуг. Для Брестской области за 2015, 2018 и 2021 гг. характерно уменьшение выраженности признаков второго фактора, что свидетельствует о большем сокращении пассажирских перевозок по сравнению с грузовыми. Для регионов третьей группы сохранились достаточно малые нагрузки по каждому из выявленных факторов.

## ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного исследования дана оценка уровня развития логистической инфраструктуры областей Республики Беларусь по разработанной методике и изучено ее изменение за 2015, 2018 и 2021 гг.

2. За период 2015, 2018 и 2021 гг. не произошло существенных изменений структуры взаимосвязей между исследуемыми характеристиками. Для трех рассмотренных наборов данных получены аналогичные по структуре двухфакторные модели. Во всех случаях содержание первого фактора определяется показателями основной (за исключением внутреннего водного транспорта) и обеспечивающей (финансовые и страховые услуги, объем иностранных инвестиций) составляющих логистической инфраструктуры, а второго фактора – показателями деятельности автомобильного транспорта в области пассажирских перевозок и внутреннего водного транспорта – в области перевозок грузов.

3. С помощью объектной диаграммы все области были распределены на три группы по степени доминирования факторов. Следует отметить, что за рассматриваемый период времени произошло незначительное изменение в конфигурации факторных значений, обобщающих включенные в исследование показатели уровня логистической инфраструктуры регионов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тойменцева, И. А. Мировые тенденции развития транспортной логистической инфраструктуры / И. А. Тойменцева, Р. В. Федоренко, М. А. Панченков // *Universum: экономика и юриспруденция*. 2022. Т. 90, № 3. С. 28–32.
2. Бережная, Л. Ю. К вопросу о формировании региональной логистической инфраструктуры / Л. Ю. Бережная // *Актуальные вопросы экономических наук*. 2016. № 51. С. 98–102.
3. Шендалев, А. Н. Оценивание логистической инфраструктуры региона / А. Н. Шендалев, О. А. Шендалева // *Экономика и современный менеджмент: теория и практика*. 2013. № 30. С. 197–202.
4. Ивуть, Р. Б. Оценка влияния транспортно-логистической инфраструктуры регионов Республики Беларусь на

- ее социально-экономические показатели / Р. Б. Ивуть, П. В. Попов, П. И. Лапковская // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 2. С. 93–100. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-93-100>.
5. Попов, П. В. Влияние транспортно-логистической инфраструктуры федеральных округов на экономические показатели Российской Федерации / П. В. Попов // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2019. № 12. С. 19–35.
6. Шульженко, Т. Г. Экономическое обоснование стратегий развития цифровой логистической инфраструктуры в цепях поставок / Т. Г. Шульженко, Д. О. Яковлева // *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2022. № 2. С. 85–93.
7. Об утверждении Республиканской программы развития логистической системы и транзитного потенциала на 2016–2020 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 18 июля 2016 г. № 560 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: <http://www.pravo.by/document/?guid=3871&p=C21600560>. Дата доступа: 19.02.2022.
8. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf>. Дата доступа: 19.02.2022.
9. Об утверждении Методики расчета показателей (индикаторов) государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы», транспортной части комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года и федеральных проектов, входящих в его состав (ред. от 30.04.2019) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gks.ru/metod/nazproekt/MET130000.pdf>. Дата доступа: 18.03.2022.
10. Транспортно-логистическая система Республики Беларусь: теория, методология, практика / под общ. и науч. ред. Р. Б. Ивуть. Волгоград: Сфера, 2016. 292 с.
11. Иванов, М. В. Транспортная обеспеченность и экономическое развитие регионов (на примере регионов Поволжья) / М. В. Иванов // *Вестник СамГУПС*. 2014. Т. 24, № 2. С. 125–131.
12. Рахмангулов, А. Н. Оценка социально-экономического потенциала региона для размещения объектов логистической инфраструктуры / А. Н. Рахмангулов, О. А. Копылова // *Экономика региона*. 2014. № 2. С. 254–263.
13. Infrastructure and Logistics Divide: Regional Comparisons between North Eastern & Southern Italy / F. Carlucci [et al.] // *Technological and Economic Development of Economy*. 2017. Vol. 2, No 23. P. 243–269. <https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1070768>.
14. Попов, П. В. Алгоритм оценки уровня эффективности логистической инфраструктуры региона / П. В. Попов, А. Г. Кравец // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2021. № 3. С. 54–61.

Поступила 10.05.2022

Подписана в печать 19.07.2022

Опубликована онлайн 30.09.2022



## REFERENCES

1. Toymentseva I. A., Fedorenko R. V., Panchenkov M. A. (2022) World Trends in the Development of Transport Logistics Infrastructure. *Universum: Ekonomika i Yurisprudentsiya* [Universum: Economics and Law], 90 (3), 28–32 (in Russian).
2. Berezhnaya L. Yu. (2016) To the Question of the Formation of Regional Logistics Infrastructure. *Aktual'nye Voprosy Ekonomicheskikh Nauk* [Topical Issues of Economic Sciences], (51), 98–102 (in Russian).
3. Shendalev A. N., Shendaleva O. A. (2013) Estimation of the Logistics Infrastructure of the Region. *Ekonomika i Sovremenniy Menedzhment: Teoriya i Praktika* [Economics and Modern Management: Theory and Practice], (30), 197–202 (in Russian).
4. Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I. (2020) Estimation of Transport and Logistics Infrastructure Impact of Regions in the Republic of Belarus on its Socio-Economic Indicators. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 19 (2), 93–100. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-93-100> (in Russian).
5. Popov P. V. (2019) Influence of the Transport and Logistics Infrastructure of Federal Districts on the Economic Indicators of the Russian Federation. *Transport: Nauka, Tekhnika, Upravlenie. Nauchnyi Informatsionnyi Sbornik* [Transport: Science, Technology, Management. Scientific Information Collection], (12), 19–35 (in Russian).
6. Shulzhenko T. G., Yakovleva D. O. (2022) Economic Substantiation of Strategies for Development of Digital Logistics Infrastructure in Supply Chains. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta* [Proceedings of Saint-Petersburg State University of Economics], (2), 85–93 (in Russian).
7. On Approval of the Republican Program for Development of Logistics System and Transit Potential for 2016–2020. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, July 18, 2016. No 560. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <http://www.pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21600560> (Accessed 19 February 2022) (in Russian).
8. Forecast of Long-Term Socio-Economic Development of the Russian Federation for the Period up to 2030. Available at: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (Accessed 19 February 2022) (in Russian).
9. On Approval of Methodology for Calculating Indicators (Indicators) of the State Program of the Russian Federation “Development of Transport System”, Transport Part of Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of Main Infrastructure for the Period up to 2024 and the Federal Projects Included in it (as Amended on 30.04.2019). Available at: <http://www.gks.ru/metod/naz-proekt/MET130000.pdf> (Accessed 18 March 2022) (in Russian).
10. Ivut' R. B., Kisel' T. R., Popov P. V., Khartovskii V. E., Shevchenko O. V. (2016) *Transport and Logistics System of the Republic of Belarus: Theory, Methodology, Practice*. Volgograd, Sfera Publ. 292 (in Russian).
11. Ivanov M. V. (2014) Transport Security and Economic Development of Regions (on the Example of the Regions of the Volga Region). *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya* [Bulletin of Samara State University of Transport Communications – SamGUPS], 24 (2), 125–131 (in Russian).
12. Rakhmangulov A. N., Kopylova O. A. (2014) Evaluation of Socio-Economic Potential of Region for Placement of Logistics Infrastructure Facilities. *Ekonomika Regiona = Economy of the Region*, (2), 254–263 (in Russian).
13. Carlucci F., Cirà A., Forte E., Siviero L. (2017) Infrastructure and Logistics Divide: Regional Comparisons between North Eastern & Southern Italy. *Technological and Economic Development of Economy*, 2 (23), 243–269. <https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1070768>.
14. Popov P. V., Kravets A. G. (2021) Algorithm for Assessing Level of Efficiency of the Region's Logistics Infrastructure. *Prikaspiysky Zhurnal: Upravlenie i Vysokie Tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, (3), 54–61 (in Russian).

Received: 10.05.2022

Accepted: 19.07.2022

Published online: 30.09.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-436-443>

УДК 334.012

## Особенности функционирования малого и среднего предпринимательства на современном этапе экономического развития

Асп. Н. А. Киселёва<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Существенным резервом обеспечения социально-экономического развития Республики Беларусь является рациональное использование предпринимательского потенциала субъектов хозяйствования как важной составляющей экономической политики государства. В статье проанализированы основные теоретические подходы к определению предпринимательской деятельности. Многогранность подходов создает сложности в формулировании универсального термина ввиду изменения содержания данной категории в процессе развития экономической науки. Предложено авторское определение предпринимательской деятельности, учитывающее современные особенности ее развития. В понятие введен показатель добавленной стоимости (созданной организацией), который позволит учесть часть стоимости товаров (работ, услуг), а также оценить эффективность региональной экономики. Развитие интеграционных процессов и фрагментация производственной деятельности увеличивают количество участников в производственной цепочке из разных стран, создающих промежуточный импорт, в состав которого входит сегментированная ими добавленная стоимость. Следовательно, выигрыш страны от внешней торговли, ее экспортный и технологический потенциалы во многом будут определяться тем, какую добавленную стоимость она создает. Такого рода оценка становится наиболее востребованной в анализе показателей торговли субъектов предпринимательства, включая их внешнюю торговлю. Проанализированы основные критерии отнесения предприятий к крупным, средним и малым. В разных странах количественные критерии неодинаковы, начальным критерием является численность работников. Сложность определения критериев заключается в том, что они не могут быть равнозначны для всех сфер экономики и для отдельных стран, так как существует зависимость от сложившейся практики и целей государственной политики в отношении к малому и среднему предпринимательству. Точная характеристика субъектов предпринимательства по размеру позволит выявить их особенности, закономерности развития, преимущества и недостатки. Предложен дополнительный количественный критерий отнесения к субъектам предпринимательства в Республике Беларусь – валовая выручка.

**Ключевые слова:** предпринимательство, субъекты предпринимательства, малый бизнес, среднее предпринимательство, критерии предпринимательства

**Для цитирования:** Киселёва, Н. А. Особенности функционирования малого и среднего предпринимательства на современном этапе экономического развития / Н. А. Киселёва // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 436–443. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-436-443>

## Peculiarities of Functioning of Small and Medium-Sized Entrepreneurship at the Modern Stage of Economic Development

N. A. Kisseleva<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** A significant reserve for ensuring the socio-economic development of the Republic of Belarus is the rational use of the entrepreneurial potential of business entities as an important component of the economic policy of the state. The paper

### Адрес для переписки

Киселёва Наталья Анатольевна  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 67,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-91-97  
[nkiseleva@bntu.by](mailto:nkiseleva@bntu.by)

### Address for correspondence

Kisseleva Natallia A.  
Belarusian National Technical University  
67, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-91-97  
[nkiseleva@bntu.by](mailto:nkiseleva@bntu.by)

analyzes the main theoretical approaches to the definition of entrepreneurial activity. The versatility of approaches creates difficulties in formulating a universal term due to the change in the content of this category in the process of development of economic science. The paper proposes the author's definition of entrepreneurial activity, taking into account the modern features of its development. The value added indicator has been introduced into the concept, which will allow taking into account a part of the cost of goods (works, services) incremented by the organization, as well as assessing the efficiency of the regional economy. The development of integration processes and the fragmentation of production activities increase the number of participants in the production chain from different countries that create intermediate imports, which include the added value segmented by them. Consequently, the country's gain from foreign trade, its export and technological potential will be largely determined by the added value it creates. This kind of assessment becomes the most demanded in the analysis of trade indicators of business entities, including their foreign trade. The main criteria for classifying enterprises as large, medium and small have been analyzed in the paper. In different countries, quantitative criteria are not the same, the initial criterion is the number of employees. The difficulty in determining the criteria lies in the fact that they cannot be equivalent for all sectors of the economy and for individual countries, since there is a dependence on established practice and the goals of state policy in relation to small and medium-sized businesses. An accurate description of business entities in terms of size will make it possible to identify their features, patterns of development, advantages and disadvantages. An additional quantitative criterion for referring to business entities in the Republic of Belarus is proposed – gross revenue.

**Keywords:** entrepreneurship, business entities, small business, medium business, business criteria

**For citation:** Kisseleva N. A. (2022) Peculiarities of Functioning of Small and Medium-Sized Entrepreneurship at the Modern Stage of Economic Development. *Science and Technique*. 21 (5), 436–443. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-436-443> (in Russian)

## Введение

Современная тенденция развития мировой экономики – возрастающая роль малого и среднего предпринимательства. Являясь неотъемлемой частью национальной экономики, субъекты малого и среднего предпринимательства становятся перспективным стратегическим направлением социально-экономического развития страны. Гибкий механизм функционирования, высокий потенциал обновления позволяют быстро адаптироваться к изменениям рыночной конъюнктуры. Создавая конкурентную среду, организации малого и среднего предпринимательства способствуют освоению новых видов продукции, современных технологий, расширяя масштабы рыночной экономики. Успешная реализация их преимуществ приводит к рационализации структуры экономики, повышению доходной части бюджетов, сокращению безработицы и обеспечению социальной стабильности. Таким образом, содействие развитию предпринимательства – важный элемент экономической политики стран.

Актуальной необходимостью современного этапа развития экономики является систематизация теоретических концепций о предпринимательстве как об одном из основных направлений развития экономических отношений. Однако единый теоретический подход к определению этой деятельности отсутствует. Сложность формулировки универсального термина

предпринимательства заключается в многогранных подходах к определению. Данная категория имеет различное содержание в зависимости от этапа экономического развития компании, страны. Роль и значение предпринимательской деятельности выражаются в высокой доле ВВП стран, формируемой данным сектором, а также в значительных долях налоговых поступлений и оборотов во внешнеторговой деятельности. Она усиливается интеграционными процессами во внешней торговле, предоставлением налоговых льгот субъектам предпринимательской деятельности и тем самым требует разработки единого универсального теоретического подхода к ее определению.

Зарождение и формирование теории предпринимательства связаны с деятельностью ученых-экономистов Ж.-Б. Сэя (Франция) и Р. Кантильона (Англия), рассматривающих предпринимательскую деятельность как экономическую активность, источник получения прибыли через торговую надбавку [1, 2]. Приоритетным видом деятельности в создании дохода Ж.-Б. Сэй видел производство, а не торговлю. Разделяя производственный процесс на три стадии (научную, предпринимательскую и производственную), он относил две последние к непосредственной деятельности предпринимателя. Выступая в роли экономического агента, предприниматель комбинирует факторы производства, превращая экономические ресурсы

с низкими производительностью и доходами в высокие производительность и прибыльность [2].

У истоков формирования классической экономической теории стоят такие ученые, как А. Смит, Д. Рикардо, А. Маршалл. В их понимании предприниматель выступал в роли собственника капитала, способного идти на риск при планировании и изготовлении продукции с целью получения дохода. Й. Тюнен, Г. Мангольдт, Ф. Найт также реализовывали рисковый подход в своих трудах к определению предпринимательской деятельности. А. Смит отождествлял предпринимательство с кругооборотом средств, в своих трудах писал, что в условиях конкуренции предпринимателя «ведет невидимая рука рынка» [3].

А. Маршалл добавил четвертый фактор производства к трем классическим (земля, труд, капитал) – организацию. Австрийский ученый-новатор Й. Шумпетер в начале XX в. выделяет «особую социальную роль предпринимателя» [4], предпринимательство начинает рассматриваться как производственная деятельность с инновационным характером. Теории рынка А. Смита и Й. Шумпетера базируются не только на личном обогащении предпринимателя, обеспечивающем экономический рост, но и на выполнении общественных функций, которые проявляются в масштабе всей экономики.

Концепция предпринимательской инновации отражена в трудах американского ученого П. Друкера, который отождествлял предпринимательскую деятельность с нововведениями во всех видах деятельности, включая управление. В теории конкуренции М. Портера доказано, что непрерывное совершенствование производства и других видов предпринимательской деятельности является неотъемлемым условием сохранения конкурентных преимуществ.

В научной литературе часто отождествляют термины «бизнес» и «предпринимательство». Английский ученый А. Хоскинг определяет бизнес как «деятельность, осуществляемую частными лицами, организациями по извлечению природных благ, производству или приобретению для продажи товаров или оказанию услуг в обмен на другие товары или деньги к взаимной выгоде заинтересованных лиц или организаций» [5].

Многие ученые разделяют мнение о том, что предпринимательство начинается с малого бизнеса, основывается на мотивации, которая ради достижения поставленных целей побуждает человека к риску.

Некоторые экономисты, например Й. Шумпетер, рассматривали бизнес как традиционную деятельность, а предпринимательство как «творческую инновационную хозяйственную жизнь» [4]. Таким образом, любая предпринимательская деятельность является бизнесом, но не каждый бизнес предпринимательством.

### Основная часть

Законодательством Республики Беларусь предусмотрено определение предпринимательской деятельности в ст. 1 Гражданского кодекса Республики Беларусь [6]. Предпринимательство является разновидностью человеческой деятельности, направленной на получение прибыли, основанной на самостоятельности, инициативе, личной и экономической ответственности субъектов хозяйствования, рассматривается одним из важнейших составляющих элементов экономической системы.

Описание социально-экономической сущности предпринимательской деятельности требует некоторой корректировки, так как самостоятельная деятельность исключает деятельность организаций в интегрированных объединениях, не учитывается ее инновационный и социальный характер. Показатель добавленной стоимости позволит оценить приращенный вклад организации в национальную экономику. Такого рода оценка становится наиболее востребованной в анализе показателей торговли организаций малого и среднего предпринимательства, в частности при осуществлении ими внешнеэкономической деятельности, связанной с фрагментацией производственного процесса и наличием большого количества участников в цепочке из разных стран.

Для актуализации и учета современных особенностей предлагается следующая авторская формулировка: предпринимательская деятельность – инициативная экономическая деятельность субъектов хозяйствования различных форм собственности, направленная на получение добавленной стоимости от продажи това-

ров, оказания услуг или выполнения работ, носящая инновационный и социальный характер.

Для дальнейшего определения статуса предпринимательства необходимо изучить критерии отнесения предприятий к крупным, средним и малым. Точная характеристика субъектов предпринимательства по размеру позволит выявить их особенности, закономерности развития, преимущества и недостатки. Мировая практика показывает, что отнесение организаций к малым, средним или крупным происходит по количественным, качественным и комбинированным показателям. Чаще всего применяются количественные критерии за счет удобства их использования. Однако в разных

странах нормативные значения критериев имеют достаточно сильный разброс, который также находит свое проявление в пределах одного вида деятельности. Основными количественными критериями отнесения организаций к субъектам предпринимательства являются: численность занятых, годовой оборот, предельный или среднегодовой доход, прибыль или балансовая стоимость активов (табл. 1). В Законе Республики Беларусь «О поддержке малого и среднего предпринимательства» [7] разделение субъектов предпринимательства на микро-, малый и средний бизнес осуществляется на основе критерия численности работников.

Таблица 1

**Количественные критерии отнесения организаций  
к субъектам малого и среднего предпринимательства в разных странах**  
**Quantitative criteria for classifying organizations  
as small and medium-sized businesses in different countries**

| Страна                                                                 | Субъект предпринимательства                                                                                                                       |                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                        | Микробизнес                                                                                                                                       | Малый бизнес                                                                                                    | Средний бизнес                                                                                                                                                                                |
| Беларусь                                                               | Численность: до 15 чел.                                                                                                                           | Численность: 16–100 чел.                                                                                        | Численность: 101–250 чел.                                                                                                                                                                     |
| Россия                                                                 | Численность: 1–15 чел.                                                                                                                            | Численность: 16–100 чел.                                                                                        | Численность: 101–250 чел.                                                                                                                                                                     |
|                                                                        | Предельный доход: до 120 млн руб. ( $\approx 1,41$ млн евро)                                                                                      | Предельный доход: до 800 млн руб. ( $\approx 9,42$ млн евро)                                                    | Предельный доход: до 2 млрд руб. ( $\approx 24$ млн евро)                                                                                                                                     |
| Армения                                                                | Численность: до 10 чел.                                                                                                                           | Численность: до 50 чел.                                                                                         | Численность: до 250 чел.                                                                                                                                                                      |
|                                                                        | Прибыль или балансовая стоимость активов: не превышает 100 млн драм ( $\approx 170$ тыс. евро)                                                    | Прибыль или балансовая стоимость активов: не превышает 500 млн драм ( $\approx 870$ тыс. евро)                  | Прибыль: не превышает 1500 млн драм ( $\approx 2,61$ млн евро); или балансовая стоимость активов: не превышает 1000 млн драм ( $\approx 1,74$ млн евро)                                       |
| Казахстан                                                              | Численность: не более 15 чел.                                                                                                                     | Численность: не более 100 чел.                                                                                  | Численность: не более 250 чел.                                                                                                                                                                |
|                                                                        | Среднегодовой доход: не более 30-тысячекратного месячного расчетного показателя (МРП) на 01.01.2021 финансового года ( $\approx 176,1$ тыс. евро) | Среднегодовой доход: не более 300-тысячекратного МРП на 01.01.2021 финансового года ( $\approx 1,76$ млн евро)  | Среднегодовой доход: не более трехмиллионкратного МРП на 01.01.2021 финансового года ( $\approx 17,61$ млн евро)                                                                              |
| Кыргызстан                                                             |                                                                                                                                                   | Объем валовой выручки, не превышающей в год регистрационного порога по НДС, предусмотренного Налоговым кодексом | Объем валовой выручки, равной или превышающей в год регистрационный порог по НДС, предусмотренный Налоговым кодексом, но составляет сумму не более 30 млн сомов ( $\approx 302,93$ тыс. евро) |
| Страны<br>Евро-<br>союза                                               | Численность: не более 10 чел.                                                                                                                     | Численность: не более 50 чел.                                                                                   | Численность: не более 250 чел.                                                                                                                                                                |
|                                                                        | Годовой оборот и/или годовой баланс: не более 2 млн евро                                                                                          | Годовой оборот и/или годовой баланс: не более 10 млн евро                                                       | Годовой оборот: не более 50 млн евро, годовой баланс: не более 43 млн евро                                                                                                                    |
| <b>Примечание.</b> Источник – собственная разработка на основе [7–12]. |                                                                                                                                                   |                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                               |

В разных странах количественные критерии неодинаковы. Сложность их определения в том, что они не равнозначны для различных видов деятельности и отдельных стран, так как существует зависимость от сложившейся практики и целей государственной политики в отношении малого и среднего предпринимательства. Тем не менее анализ количественных критериев отнесения организаций к субъектам малого и среднего предпринимательства в странах ЕАЭС и Евросоюза показывает наличие двух базовых критериев: стоимостного и численности работников. Однако в законодательстве Республики Беларусь используется лишь критерий численности работников, а стоимостный (валовой размер выручки) – лишь при переходе организаций и индивидуальных предпринимателей на одну из упрощенных систем налогообложения ([13], гл. 32). Организация может иметь достаточно большой валовой размер выручки, работая по общей системе налогообложения без применения преференций, и при этом небольшой штат работников, относящий организацию к субъекту малого предпринимательства. Таким образом, для создания благоприятных условий деятельности организаций малого и среднего предпринимательства в Республике Беларусь требуются наличие единого подхода к определению статуса малого и среднего предпринимательства и введение дополнительного стоимостного критерия.

Анализ расчетных показателей выручки от реализации продукции, товаров, работ, услуг организаций малого и среднего предпринимательства в Беларуси в среднем на одну организацию за последние пять лет показывает положительную динамику (табл. 2). Средний темп прироста за анализируемый период по микроорганизациям составляет 11,3 %, по малым – 9,6 %, средним – 10,5 %. В 2020 г. по сравнению с 2016-м наблюдался положительный темп прироста 42,9 % для микроорганизаций, а для малых и средних – увеличение в 1,5 и 1,8 раза соответственно. По результатам расчетов в среднем выручка за анализируемый период на одну микроорганизацию составила 0,37 млн руб., на одно малое предприятие – 5,27 млн руб., среднее – 12,58 млн руб. Однако Налоговый кодекс

Республики Беларусь [13] предусматривает переход на упрощенную систему налогообложения организаций малого и среднего предпринимательства при размере валовой выручки не более 2,14 млн руб., что в большей степени является преференцией для микроорганизаций и индивидуальных предпринимателей.

Таблица 2

**Динамика средней выручки от реализации продукции, товаров, работ, услуг субъектов малого и среднего предпринимательства в расчете на одну организацию**

**Dynamics of average proceeds from product sales, goods, works, services of small and medium-sized businesses per organization**

| Организация                                                          | Средняя выручка, млн руб., по годам |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                      | 2016                                | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  |
| Микро-, малые и средние, в том числе                                 | 0,85                                | 1,04  | 1,24  | 1,29  | 1,31  |
| микро-                                                               | 0,28                                | 0,37  | 0,41  | 0,40  | 0,40  |
| малые                                                                | 3,84                                | 4,62  | 5,95  | 6,21  | 5,73  |
| средние                                                              | 8,90                                | 10,77 | 13,21 | 14,09 | 15,92 |
| <b>Примечание.</b> Источник – собственная разработка на основе [14]. |                                     |       |       |       |       |

На основании проведенного анализа с учетом международной практики отнесения организаций к субъектам малого и среднего предпринимательства с целью улучшения делового климата в Республике Беларусь и развития предпринимательской деятельности предлагается введение дополнительного количественного критерия – показателя валовой выручки в объеме и эквиваленте до 4 млн руб. для микроорганизаций, до 20 млн руб. – для малых и до 80 млн руб. – для средних организаций. Введение данного критерия позволит четко определить и предоставить налоговые льготы субъектам предпринимательской деятельности. Предлагаемая автором классификация субъектов предпринимательства представлена на рис. 1.

Качественные критерии, отличающие организации малого и среднего предпринимательства от крупных предприятий, определяются рядом функциональных признаков. Наиболее существенные качественные признаки отражены в исследованиях Й. Муглера, а именно – система менеджмента, контроля производитель-

ности, мотивации труда. Данная группа критериев учитывает широкий спектр показателей организаций различных видов деятельности. Однако сложность практического применения заключается в ограниченности доступа к внутренней информации предприятия [15]. На практике чаще всего используют количественные критерии, поскольку качественные неизмеримы, либо дополняют их качественными, таким образом фактически используют комбинированные.

|                                       |                                                                                                                                          |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Микроорганизации                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Численность работников: 1–5 чел.</li> <li>• Объем валовой выручки до 4 млн руб.</li> </ul>      |
| Малые организации                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Численность работников: 16–100 чел.</li> <li>• Объем валовой выручки до 20 млн руб.</li> </ul>  |
| Субъекты среднего предпринимательства | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Численность работников: 101–250 чел.</li> <li>• Объем валовой выручки до 80 млн руб.</li> </ul> |

Рис. 1. Классификация субъектов предпринимательства

Fig. 1. Classification of business entities

Современные особенности осуществления предпринимательской деятельности требуют дополнения определения предпринимательской деятельности некоторыми критериями. Предлагаемое автором определение позволяет учитывать ряд особенностей.

Во-первых, новые достижения в науке и технике дают возможность создавать небольшие по размерам, но эффективные производственные структуры, что обуславливает развитие малого и среднего предпринимательства. Чаще всего деятельность малых и средних организаций ориентирована на узкие рынки сбыта, высокий уровень специализации, постоянную смену номенклатуры продукции. Цифровизация экономики, венчурный капитал, научно-технологические парки оказывают благоприятное влияние на развитие малого инновационного бизнеса. Таким образом, современные техноло-

гии позволяют организациям иметь достаточно большие обороты при малом количестве занятых, что подтверждает необходимость ввода дополнительного критерия в определение предпринимательской деятельности.

Во-вторых, высокая мобильность и адаптивность субъектов малого и среднего предпринимательства к изменениям рыночной конъюнктуры, внедрению новых технологий. Крупные организации имеют возможность привлечения материальных, трудовых и финансовых ресурсов для осуществления больших инновационных проектов в ряде отраслей. Однако именно организации малого и среднего предпринимательства реализуют в 2,5 раза больше нововведений, чем крупные. Как отмечается в [16], малым организациям необходимо около 2,2 года для вывода нововведений на рынок, в то время как крупным – 3,5.

В-третьих, в условиях развивающейся транснационализации организации малого и среднего предпринимательства начинают активнее участвовать во внешнеэкономической торговле и связях, в том числе зарубежном инвестировании. Например, согласно [17], доля экспорта в США и Японии малых и средних предпринимательств составляет около 45 %, в Китае и Индии – 65 и 55 % соответственно.

В-четвертых, увеличение конкуренции на национальном и мировом рынках способствует развитию инновационной деятельности субъектов малого и среднего предпринимательства за счет установления внешнеторговых связей, участия в международном разделении труда, деятельности транснациональных компаний.

В-пятых, развитию малого и среднего предпринимательства способствует переход спроса от товаров массового характера к товарам с индивидуальными свойствами.

В-шестых, эффективное стимулирование и поддержка субъектов малого и среднего предпринимательства со стороны государства способствуют увеличению их числа и одновременному усилению их влияния на ключевые показатели национальной и мировой экономик.

Эволюционные процессы в сфере малого и среднего предпринимательства привели к теоретическому и практическому осознанию ее

возрастающей роли на национальных и зарубежных рынках. Понятие предпринимательства, являясь многогранным и интегральным социально-экономическим явлением рыночной экономики, требует корректировки и формирования единого унифицированного определения. Научная общественность все больше внимания уделяет тщательному анализу причин, особенностей и важнейших тенденций развития малого и среднего предпринимательства с целью его дальнейшего развития.

## ВЫВОДЫ

1. Уточнены теоретические основы предпринимательской деятельности и дано ее авторское определение как инициативной экономической деятельности субъектов хозяйствования различных форм собственности, направленной на получение добавленной стоимости от продажи товаров, оказания услуг или выполнения работ, носящей инновационный и социальный характер.

2. Предложен дополнительный количественный критерий отнесения организаций Республики Беларусь к субъектам малого и среднего предпринимательства – валовая выручка в объеме и эквиваленте до 4 млн руб. для микроорганизаций, до 20 млн руб. – для малых и до 80 млн руб. – для средних организаций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Блауг, М. Очерк Кантильона. Экономическая мысль в ретроспективе / М. Блауг. М.: Дело, 1994. 687 с.
2. Сэй, Ж.-Б. Трактат по политической экономии / Ж.-Б. Сэй. М.: Дело, 2000. 229 с.
3. Смит, А. Исследование о природе и причинах богатства народов / А. Смит. М.: Эксмо, 2007. 956 с.
4. Шумпетер, Й. А. Теория экономического развития: капитализм, социализм и демократия / Й. А. Шумпетер. М.: Эксмо, 2008. 861 с.
5. Хоскинг, А. Курс предпринимательства / А. Хоскинг. М.: Междунар. отнош., 1993. 349 с.
6. Гражданский кодекс Республики Беларусь от 7 декабря 1998 г. [Электронный ресурс]: принят Палатой представителей 28 октября 1998 г., № 218-З; одобрен Советом Респ. 19 ноября 1998 г.; текст по состоянию на 1 сентября 2021 г. // КонсультантПлюс / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2021.

7. О поддержке малого и среднего предпринимательства [Электронный ресурс]: Закон Республики Беларусь, 1 июля 2010 г., № 148-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=h11000148>. Дата доступа: 08.09.2021.
8. Предпринимательский Кодекс Республики Казахстан [Электронный ресурс]: 29 октября 2015 г. № 375-V ЗРК; текст по состоянию на 6 июля 2021 г. // Законодательство стран СНГ. Режим доступа: [http://base.spinform.ru/show\\_doc.fwx?rgn=80123](http://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=80123). Дата доступа: 08.09.2021.
9. О государственной поддержке малого предпринимательства [Электронный ресурс]: Закон Кыргызской Республики, 25 мая 2007 г., № 73 // Министерство юстиции Кыргызской Республики. Режим доступа: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/202106/30?cl=ru-ru>. Дата доступа: 08.09.2021.
10. О государственной поддержке малого и среднего предпринимательства [Электронный ресурс]: Закон Республики Армения, 28 декабря 2000 г., № ЗР-121 // Министерство экономики Республики Армения. Режим доступа: <https://www.mineconomy.am/ru/page/86>. Дата доступа: 08.09.2021.
11. О предельных значениях дохода, полученного от осуществления предпринимательской деятельности, для каждой категории субъектов малого и среднего предпринимательства [Электронный ресурс]: постановление Правительства России от 4 апреля 2016 г. № 265 // Официальный Интернет-портал правовой информации. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201604070017>. Дата доступа: 08.09.2021.
12. Definition of Micro, Small and Medium-Sized Enterprises [Electronic Resource] // European Union. Mode of access: <http://www.eur-lex.europa.eu>. Date of access: 08.09.2021.
13. Налоговый кодекс Республики Беларусь (особенная часть) [Электронный ресурс]: от 29 декабря 2009 г. № 71-З: принят Палатой представителей 11 декабря 2009 г.; одобрен Советом Респ. 18 декабря 2009 г.; текст по состоянию на 1 сентября 2021 г. // КонсультантПлюс / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2021.
14. Беларусь в цифрах. Официальная статистика [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Режим доступа: <http://www.belstat.gov.by>. Дата доступа: 15.11.2021.
15. Национальная экономика Беларуси / В. Н. Шимов [и др.]; под ред. В. Н. Шимова. Минск: БГЭУ, 2019. 649 с.
16. Мировая экономика и международный бизнес / В. В. Поляков [и др.]; под общ. ред. В. В. Полякова, Р. К. Щенина. М.: КноРус, 2019. 682 с.
17. Франовская, Г. Н. Тенденции развития малого и среднего бизнеса в мировой экономике / Г. Н. Франовская // Современная экономика: проблемы и решения. 2016. № 3. С. 53–63.

Поступила 01.04.2021

Подписана в печать 03.06.2021

Опубликована онлайн 30.09.2022



## REFERENCES

1. Blaug M. (1994) *Essay on Cantillon. Economic Thought in Retrospect*. Moscow, Delo Publ. 687 (in Russian).
2. Say J.-B. (2000) *Treatise on Political Economy*. Moscow, Delo Publ. 229 (in Russian).
3. Smith A. (2007) *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. Moscow, Eksmo Publ. 956 (in Russian).
4. Schumpeter J. A. (2008) *Theory of Economic Development: Capitalism, Socialism and Democracy*. Moscow, Eksmo Publ. 861 (in Russian).
5. Hosking A. (1993) *Course of Entrepreneurship*. Moscow, Mezhdunarodnye Otnosheniya Publ. 349 (in Russian).
6. Civil Code of the Republic of Belarus dated December 7, 1998 No 218-3: Adopted by the House of Representatives on October 28, 1998; Approved by the Council of the Republic on November 19, 1998; Text as of September 1, 2021. National Center of Legal Information of the Republic of Belarus. *ConsultantPlus*. Minsk, 2021 (in Russian).
7. On Support for Small and Medium-Sized Businesses: Law of the Republic of Belarus, July 1, 2010, No 148-3. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=h11000148> (Accessed 8 September 2021) (in Russian).
8. Code of the Republic of Kazakhstan dated October 29, 2015 No 375-V ЗРК [ЗРК]; Text as of July 6, 2021. *Legislation of the CIS Countries*. Available at: [http://base.spininform.ru/show\\_doc.fwx?rgn=80123](http://base.spininform.ru/show_doc.fwx?rgn=80123) (Accessed 8 September 2021) (in Russian).
9. On State Support of Small Business: Law of the Kyrgyz Republic, May 25, 2007, No 73. *Ministry of Justice of the Kyrgyz Republic*. Available at: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/202106/30?cl=ru-ru> (Accessed 8 September 2021) (in Russian).
10. On State Support for Small and Medium Enterprises: Law of the Republic of Armenia, December 28, 2000, No 3P-121. *Ministry of Economy of the Republic of Armenia*. Available at: <https://www.mineconomy.am/ru/page/86> (Accessed 8 September 2021) (in Russian).
11. On the marginal Values of Income Received from Entrepreneurial Activities for Each Category of Small and Medium-Sized Businesses: Decree of the Government of the Russian Federation of April 4, 2016 No 265. *Official Internet Portal of Legal Information*. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201604070017> (Accessed 8 September 2021) (in Russian).
12. Definition of Micro, Small and Medium-Sized Enterprises. *European Union*. Available at: <http://www.eur-lex.europa.eu> (Accessed 8 September 2021).
13. Tax Code of the Republic of Belarus (Special Part) Dated December 29, 2009 No 71-3: Adopted by the House of Representatives on December 11, 2009; Approved by Council of the Republic on December 18, 2009; Text as of September 1, 2021. National Center of Legal Information of the Republic of Belarus. *ConsultantPlus: Belarus*. Minsk, 2021 (in Russian).
14. Belarus in Numbers. Official Statistics. *National Statistical Committee of the Republic of Belarus*. Available at: <http://www.belstat.gov.by> (Accessed 15 November 2021) (in Russian).
15. Shimov V. N. (ed.) (2019) *National Economy of Belarus*. Minsk, Belarus State Economic University. 649 (in Russian).
16. Polyakov V. V., Shchenin R. K. (eds.) (2019) *World Economy and International Business*. Moscow, KnoRus Publ. 682 (in Russian).
17. Franovskaya G. N. (2016) Trends in the Development of Small and Medium-Sized Businesses in the Global Economy. *Sovremennaya Ekonomika: Problemy i Resheniya = Modern Economics: Problems and Solutions*, (3), 53–63 (in Russian).

Received: 01.04.2021

Accepted: 03.06.2021

Published online: 30.09.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-444-450>

УДК 338.45+330.34

## Направления совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации

Докт. экон. наук, проф. С. Ю. Солодовников<sup>1)</sup>, канд. экон. наук, доц. Т. В. Сергиевич<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Разработаны направления совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации. Проведены исследования теоретических основ трансформации бизнес-моделей в промышленности. Для достижения этой цели решены такие задачи, как выявление специфики цифровой трансформации промышленного предприятия, исследование предпосылок трансформации бизнес-моделей промышленных предприятий в Беларуси в условиях цифровизации, разработка и сущностная характеристика направлений совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в республике в условиях цифровизации. В качестве материалов использованы труды отечественных и зарубежных ученых-экономистов, отчеты НИР, выполняемые авторами, национальные статистические данные. Применены системный и институциональный подходы, анализ и синтез. Разработан методологический подход к трансформации бизнес-модели под влиянием цифровизации как к процессу необратимых качественных изменений механизма воспроизводства потребительной стоимости хозяйственной системы, обусловленному внедрением цифровых технологий и инструментов в производственные и бизнес-процессы, в системы взаимодействия с другими участниками цепочки создания стоимости и потребителями, а также в сами товары или услуги. Это позволило исследовать возможности трансформации бизнес-моделей под влиянием цифровизации взаимодействия предприятия с другими участниками цепочки создания стоимости (сети) и государством; взаимодействия предприятия с потребителем; совершенствования внутренних производственных и бизнес-процессов, в том числе при создании цифровых услуг. Техничко-технологические и организационно-экономические отношения на промышленном предприятии рассмотрены как факторы цифровизации его бизнес-модели. В качестве предпосылок трансформации бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации выявлены: увеличение доступа промышленных предприятий к вычислительным мощностям, высокоскоростной передаче данных, облачным технологиям; положительная динамика показателей цифровизации белорусской экономики и общества, активная цифровизация сферы государственного управления и интеракций «государство – бизнес» и «государство – население». Все это в результате исследования позволило выработать направления совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в республике в условиях цифровизации.

**Ключевые слова:** промышленность, бизнес-модель, цифровизация, промышленное предприятие, национальная экономика, модернизация экономики, роботизация, автоматизация, информационно-коммуникационные технологии, цифровые бизнес-модели, цифровая экономика

**Для цитирования:** Солодовников, С. Ю. Направления совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации / С. Ю. Солодовников, Т. В. Сергиевич // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 444–450. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-444-450>

## Directions for Improving Business Models of Industrial Enterprises in the Republic of Belarus in the Context of Digitalization

S. Y. Solodovnikov<sup>1)</sup>, T. V. Serhiyevich<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Directions for improving the business models of industrial enterprises in the Republic of Belarus in the context of digitalization have been developed. Studies of the theoretical foundations of business models transformation have been

### Адрес для переписки

Солодовников Сергей Юрьевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-93-54  
solodovnikov@bntu.by

### Address for correspondence

Solodovnikov Sergey Y.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-93-54  
solodovnikov@bntu.by

carried out in the industry. To achieve this goal, tasks such as identifying the specifics of the digital transformation of an industrial enterprise, studying the prerequisites for the transformation of business models of industrial enterprises in the Republic of Belarus in the context of digitalization, developing and essentially characterizing areas for improving the business models of industrial enterprises in the Republic of Belarus in the context of digitalization. The materials used are the works of domestic and foreign scientists-economists, data from research reports performed by the authors, and national statistical data. The systematic and institutional approaches, analysis and synthesis have been applied. A methodological approach has been developed to transform the business model under the influence of digitalization as to the process of irreversible qualitative changes in the mechanism of reproduction of the use value of the economic system, due to the introduction of digital technologies and tools in production and business processes, in systems of interaction with other participants in the value chain and consumers, as well as in the goods or services themselves. This made it possible to explore the possibilities of transforming business models under the influence of digitalization of the interaction of an enterprise with other participants in the value chain (network) and the state; interaction between the enterprise and the consumer; improvement of internal production and business processes, including creation of digital services. Technical-technological and organizational-economic relations at an industrial enterprise are considered as factors in the digitalization of its business model. As prerequisites for the transformation of business models of industrial enterprises in the Republic of Belarus in the context of digitalization, the following were identified: an increase in the access of industrial enterprises to computing power, high-speed data transfer, and cloud technologies; a positive dynamics of indicators of digitalization of the Belarusian economy and society, digitalization of the sphere of public administration and interactions “state-business” and “state-population”. All this, as a result of the study, made it possible to develop directions for improving the business models of industrial enterprises in the Republic of Belarus in the context of digitalization.

**Keywords:** industry, business model, digitalization, industrial enterprise, national economy, economic modernization, robotization, automation, information and communication technologies, digital business models, digital economy

**For citation:** Solodovnikov S. Y., Serhiyevich T. V. (2022) Directions for Improving Business Models of Industrial Enterprises in the Republic of Belarus in the Context of Digitalization. *Science and Technique*. 21 (5), 444–450. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-21-5-444-450> (in Russian)

## Введение

Ранее авторами статьи установлено, что трансформация бизнес-модели под влиянием цифровизации представляет собой «процесс необратимых качественных изменений механизма воспроизводства потребительной стоимости хозяйственной системы, обусловленный внедрением цифровых технологий и инструментов в производственные и бизнес-процессы, в системы взаимодействия с другими участниками цепочки создания стоимости и потребителями, а также в сами товары или услуги» [1, с. 100]. Основываясь на таком подходе и учитывая усиление зависимости производителей от поведения бизнес-партнеров и потребителей, при разработке направлений совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации следует рассмотреть возможности трансформации бизнес-моделей в результате цифровизации взаимодействия предприятия с другими участниками цепочки создания стоимости (сети) и государством, взаимодействия предприятия с потребителем при совершенствовании внутренних производственных и бизнес-процессов, в том числе при создании цифровых услуг.

Важным представляется анализ изменений бизнес-моделей конкурентов в условиях цифровизации как источник новых угроз и возможностей.

Как отмечает В. Л. Гурский [2, с. 23], «в настоящее время в Республике Беларусь сформировалась модель промышленной политики индустриализационно-модернизационного типа, с акцентом на развитие обрабатывающей промышленности с высокой добавленной стоимостью, экспортно ориентированной, с элементами импортозамещения». Вместе с тем процессы автоматизации и цифровизации в экономике в целом и в промышленности в частности характеризуются неполнотой охвата и неравномерностью, а также продолжающимся процессом первоначального накопления информационно-цифрового капитала. Обладание «исключительным правом на использование уникального и ценного информационно-цифрового капитала» [3, с. 224] позволяет субъектам получать новую «разновидность монопольной информационной ренты» [3, с. 224] – цифровую ренту. О. Сухарев справедливо говорит о «высоком разнообразии и неоднородном охвате автоматизацией процессов современного производства. Причем степень охвата новой техно-

логией зависит от технологической структуры капитала, т. е. от исходной технологической базы и ее состояния» [4, с. 64]. Помимо технологической структуры предприятия, возможности и скорость автоматизации зависят от специфики технологического процесса, а также от обрабатываемых сырья и материалов. На охват автоматизацией и цифровизацией влияют и организационно-экономические отношения в отрасли и на предприятии в силу ряда причин. Назовем их.

Во-первых, автоматизация и цифровизация не всегда сопровождаются полноценным обучением персонала, что снижает положительные эффекты от их реализации (ранее авторами уже исследовалась проблематика «повышения адаптивности развития человеческого потенциала к потребностям инновационного развития» [5, с. 12]). Во-вторых, усилия руководства предприятий, направленные на технологические изменения, постоянно сталкиваются с инертностью и низкой адаптивностью персонала. Ведущие белорусские ученые-экономисты не обходят стороной тематику трансформации человеческого капитала в условиях цифровизации экономики и организационно-экономические проблемы, неизбежно возникающие при этом. «Под влиянием цифровизации трансформируются не только экономические отношения по поводу реализации труда и реализации предпринимательской способности, но и требования к современному работнику и предпринимателю», – подчеркивает В. В. Богатырева [6, с. 8]. В-третьих, эффективность выбора той или иной новой технологии всегда носит вероятностный характер.

Выработка направлений совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации и в дальнейшем практических рекомендаций по их реализации предполагает также определение того, каким образом могут быть снижены риски и транзакционные издержки, неизбежно возникающие в процессе необратимых качественных изменений механизма воспроизводства потребительной стоимости хозяйственной системы, обусловленных внедрением цифровых технологий и инструментов в производственные и бизнес-процессы, в системы взаимодействия с другими участниками цепочек создания стоимости

и потребителями, а также в сами товары или услуги.

Предпосылками трансформации бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации являются: увеличение доступа промышленных предприятий к вычислительным мощностям, высокоскоростной передаче данных, облачным технологиям ввиду развития техники и технологий и снижения их стоимости, цифровизация общества, цифровизация в сфере государственного управления. Республика Беларусь характеризуется довольно высокими темпами цифровизации экономики и общества. Стоит сказать, что только за последние годы (2014–2020 гг.) удельный вес домашних хозяйств, имеющих доступ в сеть Интернет, вырос на 20 п.п. – с 62 до 82 %; удельный вес населения, использующего Интернет, за этот же период увеличился с 63,6 до 85,1 %, а удельный вес в общей численности населения тех, кто использует Интернет ежедневно, – с 41,3 до 71,3 %. При этом, если в 2014 г. только 11,2 % населения в возрасте от 6 до 72 лет пользовались Интернетом для осуществления финансовых операций (для оплаты товаров, услуг, перевода денег и т. д.), то в 2020-м – уже 42,2 % [7, с. 22]. Такой рост нашел свое отражение и в увеличении удельного веса розничного товарооборота интернет-магазинов в розничном товарообороте организаций торговли, который в 2020 г. достиг 5,4 % [7, с. 26]. Помимо эволюционных процессов цифровизации общества, в 2020–2021 гг. пандемия COVID-19 во всем мире стала своего рода драйвером роста электронной торговли и развития технологий в логистике, появления новых бизнес-моделей в сфере торговли и доставки товаров.

Показатели применения информационно-коммуникационных технологий отечественными организациями также отражают положительную динамику. Из числа обследованных Национальным статистическим комитетом Республики Беларусь (Белстат) организаций в 2020 г. 94,6 % использовали стационарный широкополосный доступ в Интернет (в то время как в 2014-м – 86,6 %). В период 2014–2020 гг. вырос удельный вес организаций, использующих Интернет для взаимодействия с поставщиками (с 80,5 до 88,3 %) и потребителя-

ми (с 71 до 78,6 %) [7, с. 22]. Из обследованных Белстатом в 2020 г. организаций 30,5 % работали в облачных сервисах, 27,9 % осуществляли электронные продажи товаров (работ, услуг) по заказам, переданным посредством специальных форм, размещенных на веб-сайте (или в Экстранете, или с использованием системы автоматизированного обмена сообщениями между организациями (EDI)), а 38,8 % – аналогичные электронные закупки [7, с. 23]. 70,4 % организаций имели в 2020-м веб-сайты [7, с. 67], причем в обрабатывающей промышленности этот показатель был на уровне 89,6 %. Почти все из обследованных организаций обрабатывающей промышленности (99,9 %) использовали электронную почту [7, с. 68]. Перечисленные выше показатели демонстрируют положительную динамику. Вместе с тем сама по себе обеспеченность цифровой инфраструктурой не означает автоматическую цифровизацию бизнес-моделей, а является лишь условием для нее. Как верно подчеркивает Ю. В. Мелешко, «высокая обеспеченность доступом к Интернету и информационно-коммуникационным услугам предприятий промышленности в малой степени используется белорусскими предприятиями промышленности для формирования цифровых бизнес-моделей» [8, с. 62]. Несмотря на это, стоит заметить, что положительная динамика показателей цифровизации белорусской экономики и общества, высокие темпы роста многих из них, а также активная цифровизация государственного управления и интеракций «государство – бизнес» и «государство – население» – предпосылки для цифровизации промышленных предприятий и трансформации их бизнес-моделей в этих условиях.

### Основная часть

Первым направлением совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации является разработка механизмов выбора и адаптации конкретных технологий, наиболее приемлемых исходя из специфики бизнес-модели предприятия, задач его цифровой трансформации и изменения точек капитализации в воспроизводственном цикле предприятия. Под воспроизводственным циклом предприя-

тия понимается «единый устойчивый процесс привлечения, формирования (комбинации) и использования факторов производства с целью обеспечения финансового, экономического и социального развития предприятия на основе сохранения и укрепления его конкурентных преимуществ» [9, с. 93]. В условиях, когда рынок предлагает множество цифровых решений для оптимизации производственных и бизнес-процессов, требуется создание механизма, позволяющего на основании определенных принципов, критериев и ограничений снижать издержки выбора конкретных технологий цифровизации и принимать решения относительно того, на каких этапах воспроизводственного цикла предприятия данные технологии будут внедрены, какой эффект будет получен в результате их внедрения и эксплуатации, какие новые риски возникнут в связи с этим и дальнейшей цифровизации каких подсистем предприятия это потребует.

Следует учитывать, что хотя цифровые инструменты могут быть внедрены на любой стадии воспроизводственного цикла предприятия, их эффективность будет во многом зависеть от системности подхода к цифровизации, поскольку потенциал эффективности цифровизации отдельных элементов или компонентов системы ограничивается отстающим уровнем цифровизации других ее элементов или компонентов и их отношений. Как отмечалось ранее, системный подход как теоретико-методологический принцип исследования и моделирования сетевых механизмов инновационного развития – это «последовательное и комплексное рассмотрение объекта не как изолированной от внешнего воздействия, а как полузакрытой, но с приближением к открытой системы, в которой постоянно усиливаются синергетические процессы, порождаемые эволюцией сетевых технологий, развитием экономики рисков, возникновением новых вызовов для промышленных производств (в том числе традиционных)» [10, с. 117–118]. Необходимость применения такого подхода, прежде всего, касается системообразующих подсистем и процессов, не обеспечивающих напрямую рост экономической эффективности предприятия и его капитализацию, но отвечающих за функционирование и устойчивость системы в целом. Данные под-

системы связаны главным образом с управлением, обеспечением экономической, кадровой, информационной, кибер- и других видов безопасности, информационным обеспечением (в том числе документооборотом), социальной эффективностью предприятия и др. Цифровизация предприятия позволяет снизить временные издержки «за счет повышения гибкости управленческих систем, поскольку быстрое и более качественное (по критерию объемов ее потерь) прохождение информации способствует повышению скорости и качества принимаемых управленческих решений, а также возможности быстрого получения обратной связи как важнейшего принципа управления, обеспечивающей многостороннюю направленность информационных потоков» [11, с. 144]. Это те подсистемы предприятия, которые не являются основными с точки зрения функционального предназначения бизнес-модели или, иными словами, не отвечают за реализацию ее функций, но обеспечивают воспроизводство системы в целом. Таким образом, вторым направлением совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации является цифровая трансформация системообразующих подсистем и процессов предприятия, не отвечающих напрямую за экономическую эффективность и капитализацию, и их адаптация к новым рискам, возникающим вследствие цифровизации бизнес-моделей. Новые тенденции в сфере промышленного производства обуславливают необходимость трансформации бизнес-моделей, направленной на рост скорости принятия и реализации управленческих решений.

В качестве третьего направления совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Беларуси в условиях цифровизации выступают переход к ускоренному накоплению информационно-цифрового капитала и разработка механизмов его дальнейшей капитализации. Использование цифровых технологий позволяет предприятию аккумулировать большой объем данных, касающихся запасов материалов и готовой продукции, объемов, динамики и интенсивности продаж, технического состояния оборудования, работы персонала и др. Получение значительной части информации не является целью цифровизации, а выступает как по-

бочный (дополнительный) продукт, возникающий в результате внедрения новых технологий, и может быть никоим образом не задействован или же использован в качестве ресурса для совершенствования управления предприятием. Как отмечает М. П. Сташевская, «применение больших данных предопределяется их ресурсной ролью в цифровой экономике <...>, большие данные становятся неотъемлемой частью создания механизмов интеллектуального принятия решения, определяющего конкурентоспособность современного производства в условиях цифровой экономики» [12, с. 106]. Анализ аккумулируемой в режиме реального времени информации может принести коммерческую выгоду для промышленного предприятия за счет выявления узких мест в производстве продукции, повышения качества управленческих решений в кадровой, сбытовой, производственной, финансовой и иной политике.

Четвертым направлением совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации является внедрение новых источников создания ценности для потребителя, основанных на применении цифровых технологий. Данное направление предполагает реализацию двух взаимосвязанных аспектов: во-первых, трансформацию самого товара в результате использования цифровых возможностей, и во-вторых, появление принципиально новых для промышленного предприятия источников создания ценности – оказания цифровых услуг. Производство новых типов товаров в результате использования цифровых возможностей предполагает трансформацию модели дохода предприятия за счет оказания дополнительных услуг (главным образом, цифровых). Помимо коммерциализации новых видов услуг, переход к бизнес-модели, основанной на использовании новых источников создания ценности для клиента – цифровых услуг, будет способствовать решению проблемы снижения лояльности и приверженности к брендам, что характерно для современной экономики. При этом происходят изменения цепочки создания стоимости в части появления одних и вытеснения других поставщиков товаров и услуг, меняется распределение власти и точек капитализации на протяжении всей цепочки.

## ВЫВОД

Предложены направления совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации:

1) разработка механизмов выбора и адаптации конкретных технологий, наиболее приемлемых исходя из специфики бизнес-модели предприятия, задач его цифровой трансформации и изменения точек капитализации в производственном цикле предприятия;

2) цифровая трансформация системообразующих подсистем и процессов предприятия, не обеспечивающих напрямую рост его экономической эффективности и капитализации, а отвечающих за функционирование и устойчивость системы в целом, и их адаптация к новым рискам, возникающим вследствие цифровизации бизнес-моделей;

3) переход к ускоренному накоплению информационно-цифрового капитала и разработка механизмов его дальнейшей капитализации;

4) внедрение новых источников создания ценности для потребителя, основанных на применении цифровых технологий, предполагающее реализацию двух взаимосвязанных аспектов – трансформацию самого товара в результате использования цифровых технологий и появление принципиально новых для промышленного предприятия источников создания ценности – оказания цифровых услуг.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сергиевич, Т. В. Влияние цифровизации экономики и общества на трансформацию бизнес-моделей промышленных предприятий / Т. В. Сергиевич // Техно-технологические проблемы сервиса. 2021. Т. 56, № 2. С. 95–101.
2. Гурский, В. Л. Промышленная политика Республики Беларусь: основные аспекты и современные тенденции развития / В. Л. Гурский // Вестник Института экономики НАН Беларуси. 2021. Вып. 2. С. 17–36. <https://doi.org/10.47612/978-985-08-2743-2-2021-2-17-36>.
3. Юдина, Т. Н. «Экономика данных»: big data, цифровые платформы и цифровая рента / Т. Н. Юдина, И. З. Гелисханов // Инновационные кластеры цифровой экономики: драйверы развития: тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Санкт-Петербург, 17–21 мая 2018 г. / под ред. А. В. Бабкина; ФГАО УВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». СПб., 2018. С. 218–226. <https://doi.org/10.18720/IEP/2018.3/25>.

4. Сухарев, О. Промышленность России: методы исследования и задачи развития / О. Сухарев // Общество и экономика. 2021. № 2. С. 60–81. <https://doi.org/10.31857/S020736760013641-4>.
5. Солодовников, С. Ю. Теоретико-методологические основы исследования взаимосвязи теории трудовой мотивации и динамики трудовых отношений / С. Ю. Солодовников, Т. В. Сергиевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D: Экономические и юридические науки. 2016. № 5. С. 12–16.
6. Богатырева, В. В. Роль социального и человеческого капиталов в формировании и функционировании социально-экономической системы государства / В. В. Богатырева // Экономическая наука сегодня: сб. науч. ст. Минск: БНТУ, 2020. Вып. 11. С. 5–11. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2020-11-5-11>.
7. Информационное общество в Республике Беларусь: статистический сборник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь; И. В. Медведева (предс. ред. кол.). Минск, 2021. 97 с.
8. Мелешко, Ю. В. Цифровизация бизнес-моделей предприятий белорусского промышленного комплекса: направления, риски и инструменты / Ю. В. Мелешко // Экономическая наука сегодня: сб. науч. ст. Минск: БНТУ, 2021. Вып. 13. С. 61–74. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2021-13-61-74>.
9. Сергиевич, Т. В. Методическое обеспечение повышения экономической эффективности воспроизводственного цикла предприятия по производству товаров интенсивного обновления / Т. В. Сергиевич // Экономическая наука сегодня: сб. науч. ст. Минск: БНТУ, 2017. Вып. 6. С. 91–107. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2017-6-91-107>.
10. Солодовников, С. Ю. Теоретико-методологические основы исследования сетевых механизмов инновационного развития в Республике Беларусь / С. Ю. Солодовников // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 2. С. 113–118. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-113-118>.
11. Сергиевич, Т. В. Стимулирование производства товаров интенсивного обновления / Т. В. Сергиевич // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 2. С. 139–147. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-139-147>.
12. Сташевская, М. П. Влияние применения больших данных на формирование особенностей цифровой экономики / М. П. Сташевская // Современные тенденции развития торговли и таможенного дела: тезисы докл. и выступл. VI Междунар. науч. конф. молод. ученых, г. Донецк, 17 марта 2021 г.; общ. ред. О. Н. Головинова. Донецк: Донецкий национальный университет, 2021. С. 104–106.

Поступила 20.05.2022

Подписана в печать 21.07.2022

Опубликована онлайн 30.09.2022

## REFERENCES

1. Serhiyevich T. V. (2021) Impact of the Digitalization of the Economy and Society on Transformation of Business Models of Industrial Enterprises. *Tekhniko-Tekh-*

- nologicheskoye Problemy Servisa* [Technical and Technological Problems of Service], 56 (2), 95–101 (in Russian).
2. Gursky V. L. (2021) Industrial Policy of the Republic of Belarus: Main Aspects and Current Development Trends. *Vestnik Instituta Ekonomiki NAN Belarusi* [Bulletin of Institute of Economics of National Academy of Sciences of Belarus], (2), 17–36. <https://doi.org/10.47612/978-985-08-2743-2-2021-2-17-36> (in Russian).
3. Yudina T. N., Geliskhanov I. Z. (2018) “Data Economy”: Big Data, Digital Platforms and Digital Rent. *Innovatsionnye Klasteri Tsifrovoy Ekonomiki: Draiverny Razvitiya. Tr. Nauch.-Prakt. Konf. s Mezhdunar. Uchastiem, g. Sankt-Peterburg, 17–21 Maya 2018 g.* [Innovative Clusters of Digital Economy: Development Drivers: Proceedings of Scientific-Practical Conference with International Participation, Saint-Petersburg, May 17–21, 2018]. Saint-Petersburg, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University”, 218–226. <https://doi.org/10.18720/IEP/2018.3/25> (in Russian).
4. Sukharev O. (2021) Industry of Russia: Research Methods and Development Tasks. *Obshchestvo i Ekonomika = Society and Economics*, (2), 60–81. <https://doi.org/10.31857/S020736760013641-4> (in Russian).
5. Solodovnikov S. Yu., Serhiyevich T. V. (2016) Theoretical and Methodological Foundations for Studying Relationship between Theory of Labor Motivation and Dynamics of Labor Relations. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya D: Ekonomicheskie i Yuridicheskie Nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part D. Economic and Legal Sciences*, (5), 12–16 (in Russian).
6. Bogatyreva V. V. (2020) Role of Social and Human Capital in the Formation and Functioning of Socio-Economic System of the State. *Ekonomicheskaya Nauka Segodnya: Sb. Nauch. St.* [Economics Today: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, (11), 5–11. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2020-11-5-11> (in Russian).
7. National Statistical Committee of the Republic of Belarus (2021) *Information Society in the Republic of Belarus: Statistical Compendium*. Minsk. 97 (in Russian).
8. Meleshko Yu. V. (2021) Digitalization of Business Models of Enterprises of the Belarusian Industrial Complex: Directions, Risks and Tools. *Ekonomicheskaya Nauka Segodnya: Sb. Nauch. St.* [Economics Today: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, (13), 61–74. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2021-13-61-74> (in Russian).
9. Serhiyevich T. V. (2017) Methodological Support for Increasing the Economic Efficiency of Reproduction Cycle of an Enterprise for Production of Goods of Intensive Renewal. *Ekonomicheskaya Nauka Segodnya: Sb. Nauch. St.* [Economics Today: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, (6), 91–107. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2017-6-91-107> (in Russian).
10. Solodovnikov S. Yu. (2020) Theoretical and Methodological Foundations for Studying Network Mechanisms of Innovative Development in the Republic of Belarus. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 19 (2), 113–118. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-113-118> (in Russian).
11. Serhiyevich T. V. (2020) Stimulating the Production of Intensive Renewal Goods. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 19 (2), 139–147. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-139-147> (in Russian).
12. Stashevskaya M. P. (2021) Impact of Big Data Application on the Formation of Features in Digital Economy. *Sovremennye Tendentsii Razvitiya Torgovli i Tamozhennogo Dela: Tezisy Dokl. i Vystupl. VI Mezhdunar. Nauch. Konf. Molod. Uchenykh, g. Donetsk, 17 Marta 2021 g.* [Modern Trends in Development of Trade and Customs: Abstracts of Reports and Speeches at VI International Scientific Conference of Young Scientists, Donetsk, March 17, 2021]. Donetsk, Donetsk National University, 104–106 (in Russian).

Received: 20.05.2022

Accepted: 21.07.2022

Published online: 30.09.2022