

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. 23 / No 2 / 2024

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

Информатика

- Pande S. V., Patil D. P., Gade S.**
Nanoantenna Array for Terahertz Detection
Application, Design and Scope
(Панде С. В., Патиль Д. П., Гаде С.
Наноантенная решетка для обнаружения
терагерцового диапазона: применение,
конструкция и область применения). 91

Механика деформируемого твердого тела

- Дудяк А. И., Хвасько В. М.**
Нормальные напряжения при температурном
изгибе составного стержня 105

Приборостроение

- Козерук А. С., Диас Гонсалес Р. О.,
Филонова М. И., Кузнецик В. О., Юринок В. И.**
Кинематические особенности абразивной
обработки боковой поверхности
плоско-выпуклых конических линз
по методу свободного притирания 114

CONTENTS

Informatics

- Pande S. V., Patil D. P., Gade S.**
Nanoantenna Array for Terahertz Detection
Application, Design and Scope 91

Deformation in Solid Mechanics

- Dudjak A. I., Khvasko V. M.**
Normal Stresses with Temperature Bending
of Composite Rod 105

Instrumentation Engineering

- Kozeruk A. S., Diaz Gonzales R. O.,
Filonova M. I., Kuznechik V. O., Yurinok V. I.**
Kinematic Features of Abrasive
Processing of Lateral Surface
of Flat-Convex Conical Lenses
Using Free Rubbing Method 114

Строительство

- Черноиван Н. В.**
Возведение фасадов кирпичных зданий
из утепленных кирпичных панелей (простенков)
заводского изготовления 121
- Гуринович В. Ю.**
Исследование влияния номенклатуры изделий
на показатели производственной мощности
предприятий индустриального домостроения 128
- Яцевич П. П.**
Сравнительный анализ изменения свойств
модифицированных асфальтобетонов
в зависимости от способа модификации
и концентрации полимера в вяжущем 140

Транспорт

- Le Thanh Nhan, Dam Hoang Phuc,
Le Hue Tai Minh, Kharytonchyk S. V., Kussyak V. A.,
Nguyen Thanh Cong.**
The Influence of Road Adhesion Coefficient
on Energy Consumption and Dynamics
of Battery Electric Vehicles
(Ле Тхань Нань, Дам Хоанг Пхук,
Ле Хуэ Тай Минь, Харитончик С. В.,
Кусяк В. А., Нгуен Тхань Конг.
Влияние коэффициента сцепления шин
с дорогой на потребляемую энергию и динамику
аккумуляторных электромобилей) 151
- Kapski D. V., Bogdanovich S. V., Kot E. N.,
Khmelnitskaya L. V.**
Road Safety Concept in the Republic of Belarus
(Капский Д. В., Богданович С. В., Кот Е. Н.,
Хмельницкая Л. В.
Концепция безопасности дорожного движения
в Республике Беларусь) 163

Экономика

- Тымуль Е. И.**
Использование точек риска в системе управления
рисками теплоэлектростанций 172

Civil and Industrial Engineering

- Chernoivan N. V.**
Construction of Facades of Brick Buildings
from Prefabricated Insulated Brick Panels (Piers)
of Factory Manufacture 121
- Gurinovich V. Yu.**
Study of Influence of Product Range
on Production Capacity Indicators
of Precast Construction Plants 128
- Yatsevich P. P.**
Comparative Analysis of Property Changes
in Modified Asphalt Concretes Depending
on the Modification Method
and Polymer Concentration in the Binder 140

Transport

- Le Thanh Nhan, Dam Hoang Phuc,
Le Hue Tai Minh, Kharytonchyk S. V., Kussyak V. A.,
Nguyen Thanh Cong.**
The Influence of Road Adhesion Coefficient
on Energy Consumption and Dynamics
of Battery Electric Vehicles 151
- Kapski D. V., Bogdanovich S. V., Kot E. N.,
Khmelnitskaya L. V.**
Road Safety Concept in the Republic of Belarus 163

Economy in Industry

- Tymul Ya. I.**
Using Risk Points in Risk Management System
of Thermal Power Plants 172

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, Комотини, 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),
Чижи́к 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 научный 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 29.03.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 9,02. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024

Lead Science 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/10.21122/2227-1031-2024-23-2-91-104>

UDC 378

Nanoantenna Array for Terahertz Detection Application, Design and Scope

S. V. Pande^{1,3)}, D. P. Patil²⁾, S. Gade²⁾

¹⁾PhD scholar, Sandip Institute of Technology & Research Centre (Trambak road Nashik, India),

²⁾Sandip Institute of Engineering and Management (Trambak road Nashik, India),

³⁾SVKM's NMIMS Mukesh Patel School of Technology Management & Engineering (Shirpur India)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Abstract. The development and implementation of a nanoantenna array for terahertz detection hold immense potential in advancing scientific research and innovation, proven by its ability to enhance terahertz signal reception, overcome limitations of conventional detection methods, and unlock new possibilities for numerous industries. However, concerns related to scalability, cost-effectiveness, and potential health hazards highlight the need for extensive research and regulation to ensure the safe and responsible deployment of this technology. In view of its remarkable highlights, the terahertz (THz) space of the electromagnetic range is wealthy in developing prospects in various applications, for example, remote correspondences, imaging, non-disastrous testing, security filtering, and process control. Terahertz waves are unmistakable for their non-ionizing radiation, further developed objective than microwaves, unprecedented reach ingestion, and ability to go through dielectric materials. This paper gives a brief overview of recent advances in THz antenna design for various applications and investigated possible challenges of these THz systems. We have also focus on terahertz sources and detectors as well as their applications and scope in different fields, different terahertz detection techniques, limitations of conventional terahertz detectors, design consideration parameters in the designing of nanoantenna, materials used for nanoantenna array designing, different fabrication techniques, parameters for evaluating performance and potential characteristics for nanoantenna array in tetrahertz detection.

Keywords: conventional detection methods, electromagnetic range, non-ionizing radiation, terahertz signal reception

For citation: Pande S. V., Patil D. P., Gade S. (2024) Nanoantenna Array for Terahertz Detection Application, Design and Scope. *Science and Technique*. 23 (2), 91–104. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-91-104>

Наноантенная решетка для обнаружения терагерцового диапазона: применение, конструкция и область применения

С. В. Панде^{1,3)}, Д. П. Патиль²⁾, С. Гаде²⁾

¹⁾Технологический институт и исследовательский центр Сандипа (Нашик, Республика Индия),

²⁾Сандипский институт инженерии и менеджмента (Нашик, Республика Индия),

³⁾Школа технологического менеджмента и инженерии Мукеша Пателя при Институте исследований управления Нарси Монджи Благотворительного фонда Шри Виле Парле Келавани Мандал (Ширпур, Республика Индия)

Резюме. Наноантенная решетка для обнаружения терагерцового диапазона обладает огромным потенциалом в продвижении научных исследований и инноваций, что подтверждается ее способностью улучшать прием терагерцового

Адрес для переписки

Дипак Пандуранг Патиль
“Дип Амрит”, Плот № 46+47/3
Гаджанан Чоук,
Индранagri, Каматваде
Нашик, Индия
Пин код – 422008

Address for correspondence

Dipak Pandurang Patil
“DEEP AMRIT”, Plot No 46+47/3
Gajanan Chowk,
Indranagri, Kamatwade
Nashik (MS), India
Pin Code – 422008

сигнала, преодолевать ограничения традиционных методов обнаружения и открывать новые возможности для многих отраслей. Однако проблемы, связанные с масштабируемостью, экономической эффективностью и потенциальными опасностями для здоровья, подчеркивают необходимость обширных исследований и регулирования для обеспечения безопасного и адекватного внедрения этой технологии. Благодаря своим прекрасным характеристикам терагерцовое (ТГц) пространство электромагнитного диапазона имеет благоприятные перспективы для развития различных приложений, например удаленной переписки, визуализации, неразрушающего контроля, защитной фильтрации и управления процессами. Терагерцовые волны безошибочно узнаваемы благодаря своему неионизирующему излучению, более развитой цели, чем у микроволн, беспрецедентной дальности проникновения и способности проходить через диэлектрические материалы. В данной статье дается краткий обзор последних достижений в разработке ТГц антенн для различных приложений и исследуются возможные проблемы, связанные с этими ТГц системами. Особое внимание уделено терагерцовым источникам и детекторам, а также их применению в различных областях, различными методами терагерцового обнаружения, ограничениям обычных терагерцовых детекторов, параметрам при проектировании наноантенны, материалам, используемым для проектирования наноантенной решетки, различным методам изготовления, параметрам, позволяющим оценить работоспособность и потенциальные характеристики наноантенной решетки при обнаружении в терагерцовом диапазоне.

Ключевые слова: обычные методы обнаружения, электромагнитный диапазон, неионизирующее излучение, прием терагерцового сигнала

Для цитирования: Панде, С. В. Наноантенная решетка для обнаружения терагерцового диапазона: применение, конструкция и область применения / С. В. Панде, Д. П. Патиль, С. Гаде // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 2. С. 91–104. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-91-104>

Introduction

The topic of terahertz technology has emerged as a potential frontier with a wide variety of applications in today's fast evolving technological world. Between microwave and infrared wavelengths, terahertz waves, often called T-rays, generally have frequencies between 0.1 to 10 terahertz (THz) [1, 2]. This frequency range is ideal for many applications because to its special benefits, which include non-ionizing radiation, excellent spatial resolution, and material penetration.

Due to its capacity to improve terahertz system performance, Nanoantenna arrays have attracted a lot of interest in the field of terahertz detection. The exact control of electromagnetic waves at terahertz frequencies is made possible by these arrays [3], which are made up of subwavelength-sized antennas grouped in a regular manner. Nanoantenna arrays provide better sensitivity, selectivity, and spatial resolution by taking advantage of the collective behavior of nanoscale antennas, enabling groundbreaking developments in several fields.

Basics of Terahertz Technology

The term “terahertz technology” refers to the study and use of electromagnetic waves in the 0.1–10 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) frequency range [3]. This frequency band is in the middle of the microwave and infrared spectrum. Terahertz waves have special characteristics that make them suited for a variety of uses in several industries. Terahertz waves stand apart from other parts of the electromagnetic spectrum thanks to a number of features. First off, terahertz vibrations are non-ionizing [4], which means they lack the energy to ionize atoms or molecules. They are safe for a variety of uses, such as security screening and medical imaging, thanks to this quality.

Terahertz waves may also penetrate a wide range of materials, including biological tissues as well as fabrics, plastics, paper, and ceramics [5]. This characteristic makes it possible to image structures that are not easily accessible using other types of radiation and to analyze items without causing any damage to them. Below Fig. 1 shows the placement of the THz wave in the spectrum.

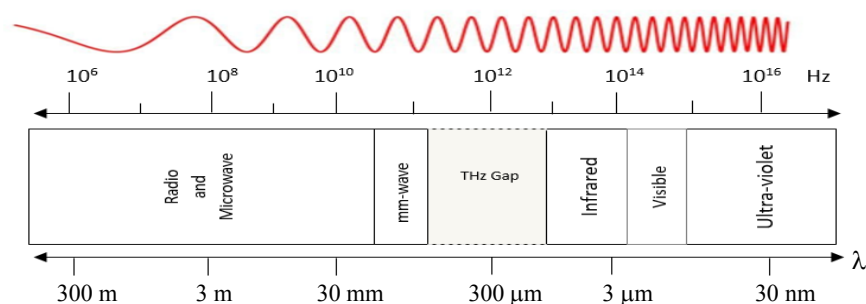


Fig. 1. Electromagnetic spectrum (correspond to frequency and wavelength)

Fig. 2 illustrates the terahertz region within the electromagnetic spectrum. THz radiation is classified into two types: broadband THz radiation and continuous wave THz radiation [7]. THz sources and detectors are listed below [8].

1) Terahertz Sources

A. Broadband sources:

- Quantum cascade lasers,
- Surface Surge currents,
- Plasmon, phonon and coupled mode oscillation,

- Schottky diode,
- Photoconductive Switching;

B. Continuous wave (CW) sources:

- Backward wave oscillator,
- Quantum cascade lasers,
- Schottky multiplier chains.

Photoconductive switching. The generation of THz radiation using a femtosecond laser pulse is shown in Fig. 3.

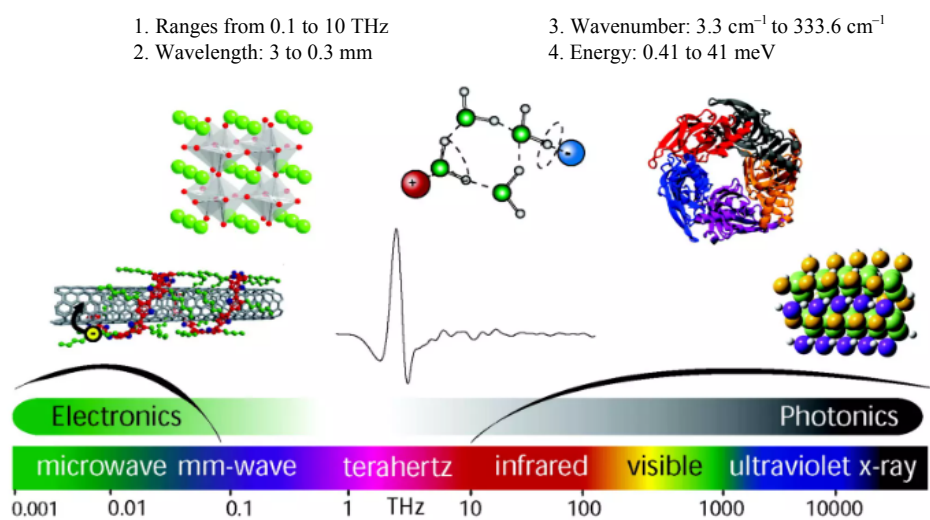


Fig. 2. Terahertz Radiation [6]

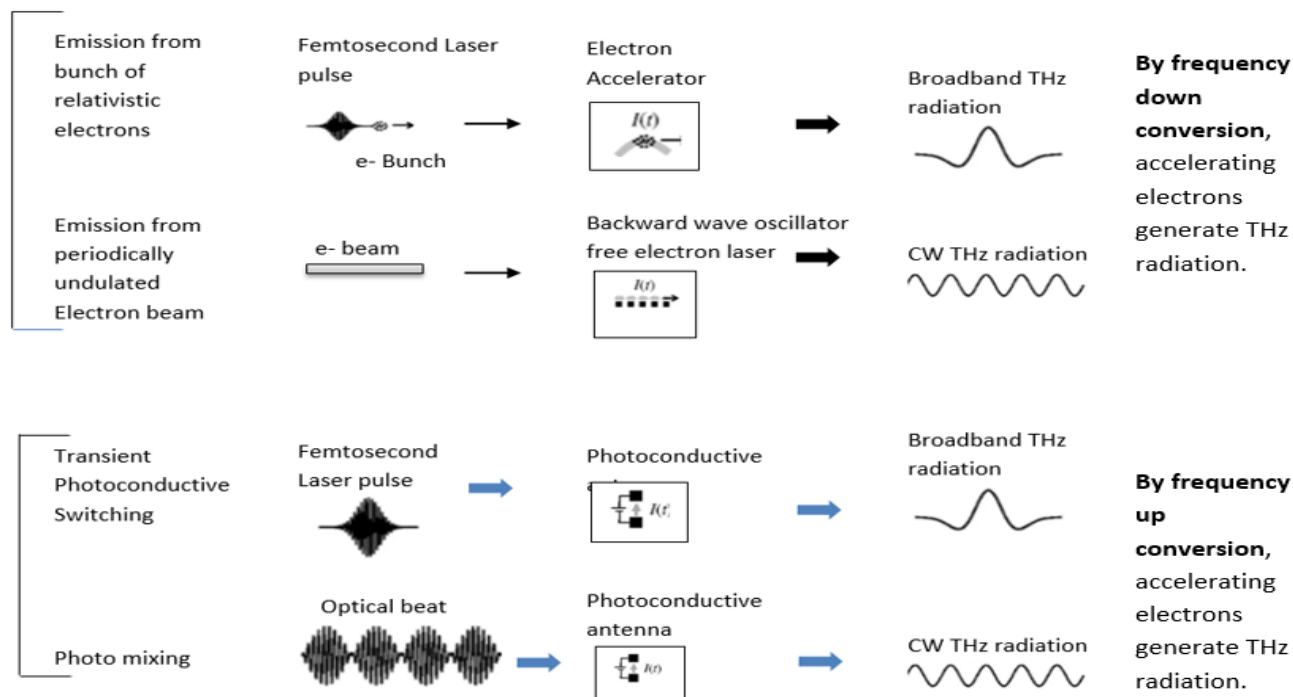


Fig. 3. Generation of THz radiation [5]

2) Terahertz detectors –

Coherent

- ❖ Homojunction devices,
- ❖ Quantum well infrared detectors;

Semiconductor

- ❖ Photoconductive switch,
- ❖ Electro-optic detector;

Thermal

- ❖ Pyroelectric,
- ❖ Hot electron bolometer,
- ❖ Photo-acoustic detector.

Terahertz technology has a wide range of uses and is constantly developing new ones. Several applications such as imaging and sensing, charac-

teristics of material. Security and surveillance, spectroscopy and Communication field are displayed in Fig. 4 and 5.

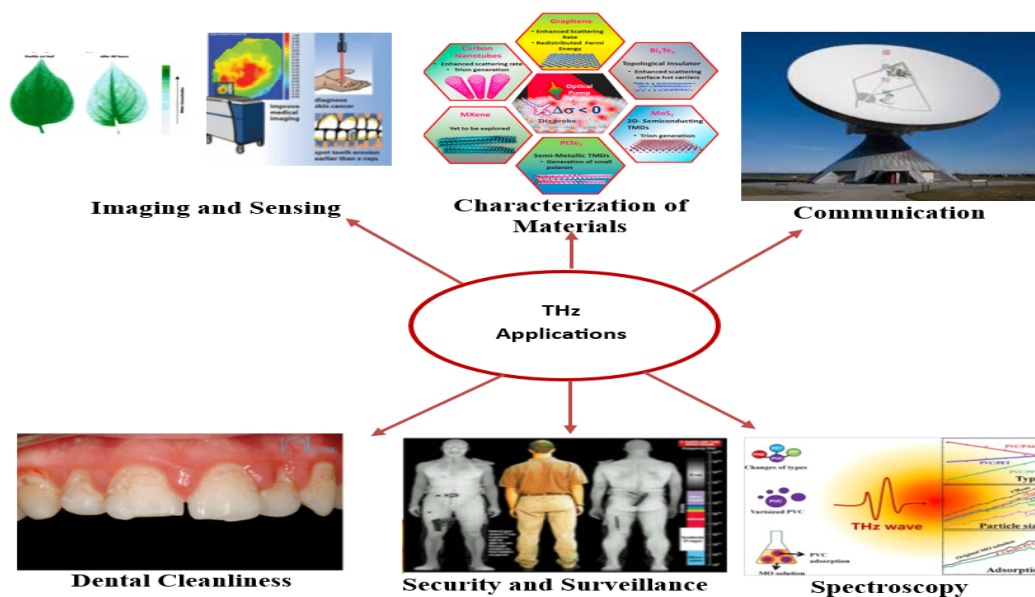


Fig. 4. Applications of THz waves in different fields

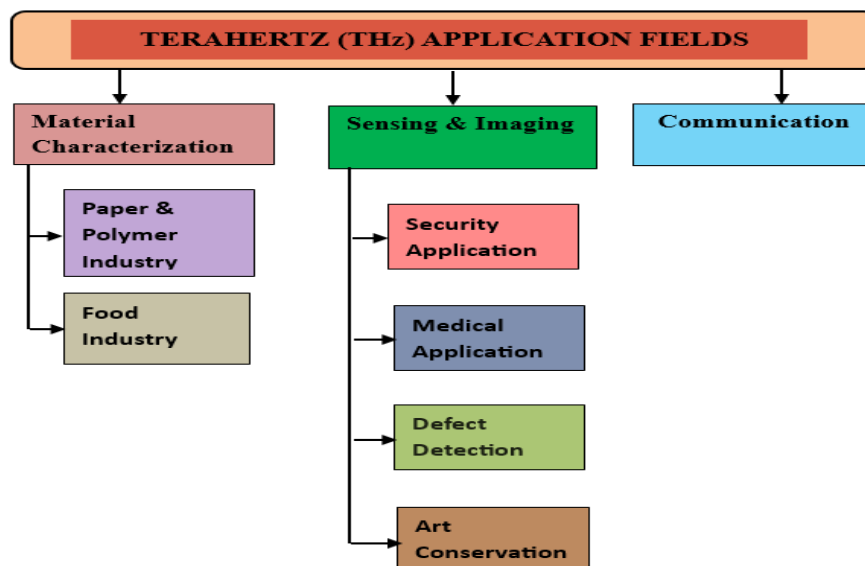


Fig. 5. THz Application Fields [6]

1. Imaging and Sensing. Terahertz waves have applications in imaging and sensing that provide important details about material characteristics

including composition, thickness, and density. Terahertz images are also useful in biology. In the frequency, range of 1–3 THz Water is good obser-

ver of THz radiations. In the THz radiation is therefore capable of detecting differences in tissue water content and density [9]. Terahertz imaging, for instance, can also be used in the pharmaceutical sector to characterize tablet material or in the restoration of fine art to analyze hidden layers in paintings [10].

2. Communication. Because of its enormous bandwidth, terahertz waves have the potential to enable high-speed wireless communication systems [11]. The data rate of existing wireless system typically of 100 Mbps, is limited by the use of carrier wave below 5 GHz. High data rates are made possible by higher frequency carriers, and terahertz carrier waves enable data speeds of up to 1000 Gbps [12]. The benefit of terahertz communication is that it is immune to interference from other wireless technologies that use lower frequencies.

3. Spectroscopy. Terahertz spectroscopy enables the examination of atomic and molecular vibrations, revealing details about the structure and chemical make-up of materials. Environmental monitoring, security [13], and pharmaceutical research all benefit greatly from this.

4. Characterization of Materials. Semiconductors, superconductors, and other sophisticated materials may be characterized by using terahertz radiation to examine the electronic, vibrational, and magnetic characteristics of the materials [14].

5. Security and Surveillance. Terahertz waves may be applied to security screening tasks including finding narcotics, explosives, or concealed weapons. By detecting variations in terahertz wave transmission and reflection via various materials, terahertz imaging devices may locate items that are concealed [14]. Using terahertz systems, one can simultaneously perform imaging & spectroscopy. It has been shown that terahertz waves can penetrate materials such as paper, wood, plastic, ceramic etc. This allows them to reveal the presence of objects. There are several potential applications for this technology including identification of liquids in suspicious bottles, explosives in a mail envelope, detection of drugs.

6. Dental Cleanliness. Dental carries frequently known as tooth rot is perhaps of the most widely recognized human problem. Carry on by delivering a subsurface sore in the veneer. If there is no macroscopically visible disintegration or even the for-

mation of micro cavities at the tooth surface, the disease may spread to the dentine, the next tissue in the tooth layer. It is difficult to catch dental decay early because there are no obvious signs on the both surface. X ray one of the well-known methods for detecting decay, only reveal the issue when drilling and filling are the only options for preventing degradation.

Below Fig. 5 shows the applications of THz application fields.

Designing effective and dependable systems requires a thorough understanding of the principles of terahertz technology. We shall examine the nanoantenna arrays especially suited for terahertz detection in the further section of this paper. We are able to find answers to a variety of problems in industries ranging from telecommunications to healthcare by utilizing the special characteristics of terahertz waves.

Introduction to Nanoantennas

In the realm of terahertz technology, nanoantennas are crucial, especially for the detection and control of terahertz waves. The diameters of these nanoscale-engineered antennas are often smaller than the wavelengths of the electromagnetic waves with which they interact. A wide range of applications in terahertz devices and systems are made possible by nanoantennas' efficient ability to link, emit, and modify terahertz radiation [15]. Enhancing the interaction between electromagnetic waves and materials at terahertz frequencies is the main goal of nanoantennas. The optical and electrical characteristics of the Nano antennas may be precisely adjusted to accomplish desired functionality by modifying their size, shape, and material composition. Nanoantennas allow for the targeted sensing and manipulation of terahertz waves by concentrating them into subwavelength zones, increasing the field intensity [16]. Several types of nanoantennas are commonly used in terahertz applications:

1. Dipole Antennas. Dipole antennas are made up of two conducting components, which are often shaped like straight rods or arms [17, 18] shown in Fig. 6. They are frequently used in terahertz technology because of how easy they are to make. Depending on the intended use, dipole antennas can be built as resonant or non-resonant structures.

2. Loop Antennas. A conductive loop or coil, which may have a circular, rectangular, or other shape, makes up a loop antenna [19] in Fig. 7. In terahertz systems that need a reduced footprint, loop antennas are frequently employed because of their tiny size. They have a high radiation efficiency and are capable of resonant behavior.

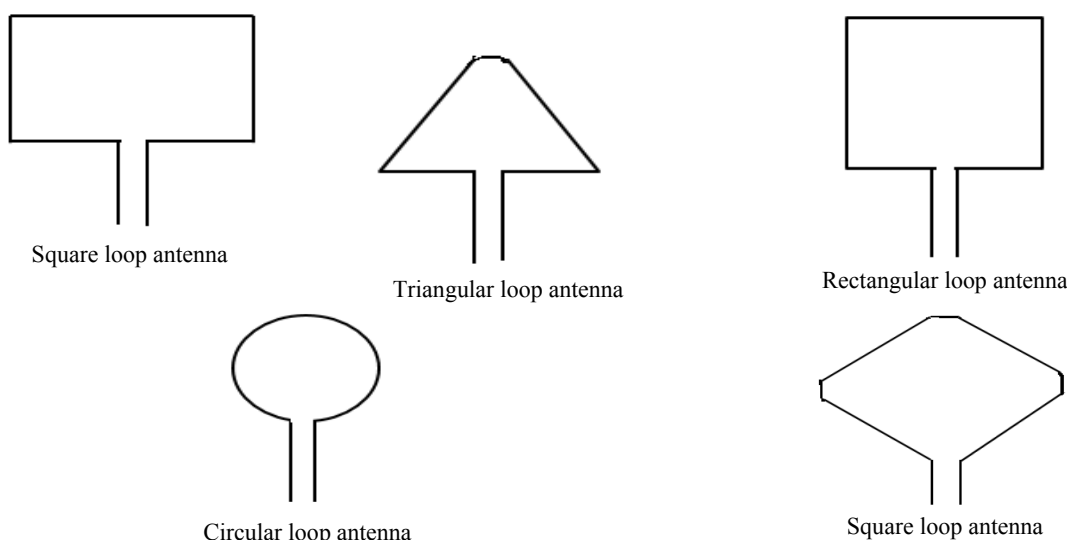


Fig. 7. Types of loop antenna

3. Patch Antennas. These planar devices, which are generally made of a metallic patch and a dielectric substrate, operate as antennas [20, 21] shown in Fig. 8. Due to their simplicity of integration, compatibility with microfabrication methods, and customizable resonant qualities, they are commonly utilized in terahertz systems. Patch antennas are capable of achieving great radiation efficiency and directivity.

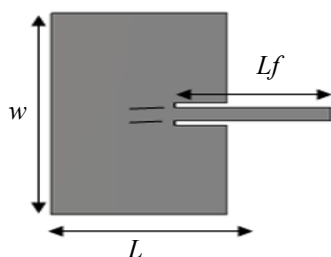


Fig. 8. Patch antenna

4. Spiral Antennas. Spiral antennas have conductive traces that are frequently etched or printed in the shape of spirals on a substrate [22] illustrated in Fig. 9. Spiral antennas are suited for terahertz applications that need broad frequency

coverage and constrained physical area because of their broadband performance and small size.

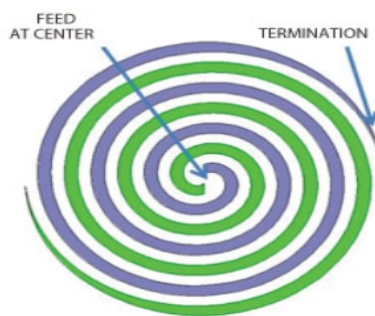


Fig. 9. Spiral antenna

Nanoimprinting, self-assembly processes, electron beam lithography, and other methods can all be used to create nanoantennas. Usually, they are constructed of metals like gold, silver, or copper, which have outstanding optical and conductivity qualities at terahertz frequencies. Nanoantennas can also benefit from the use of dielectric and semiconductor materials to improve performance or accomplish certain functionality [23].

In order to achieve the necessary electromagnetic response, size, shape, material qualities, and nano-

antenna design must be carefully balanced [24]. To optimize the design parameters and forecast the behavior of nanoantennas, a variety of simulation tools are used, such as the finite element method (FEM) or finite-difference time-domain (FDTD) approaches.

The design considerations, manufacturing processes, and performance assessment of nanoantenna arrays especially suited for terahertz detection will be covered in the following chapters. We can improve the sensitivity, resolution [24], and selectivity of terahertz systems by utilizing the special qualities of nanoantennas, opening the door to groundbreaking applications in fields including security, medical imaging, and non-destructive testing.

Terahertz Detection Techniques

For recording and analyzing terahertz waves in a variety of applications, terahertz detection methods are crucial. These methods make it possible to measure, image, and characterize terahertz radiation, giving vital information about the characteristics of materials and paving the way for the creation of terahertz-based gadgets and systems. There are several detecting methods used, and each has a special benefit and application.

Short terahertz wave pulses are sent and received via time-domain methods. These pulses interact with the target substance or item, which reveals details about its qualities. There are two popular time-domain methods:

In THz-TDS, a brief terahertz pulse is generated, and when it interacts with the sample, its time-domain waveform is measured. The terahertz absorption, refractive index, and other physical characteristics of the material may be ascertained by examining the amplitude and phase of the reflected or transmitted waveform. THz-TDS is frequently

used in material characterization, pharmaceutical analysis, and quality control since it enables broadband measurements [25].

Electronic excitations in semiconductors have previously tracked application in lasers, electronics parts and PCs. At the same time, they comprise an astonishing body framework whose quantum properties might be changed for instance by nanostructure plan. Thus, THz spectroscopy on semiconductors is not only use for uncovering new mechanical possibilities of nanostructures but also use as key properties to control framework. Many peculiarities have previously been inspected utilizing brief THz beats. The complicated permittivity or THz-retention coefficient and refractive list of unexcited, inborn semiconductors might be determined. Thz photons are consumed fundamentally by free transporters in doped or optically animated semiconductors.

TPI scans an object or sample using a terahertz pulse. A two-dimensional or three-dimensional picture of the target is produced using the measured reflected or transmitted pulses at various locations. TPI is used in applications for medical imaging [26], non-destructive testing, and security screening. The system is comprised of a laser-driven emitter, a beam-forming optics consisting of focused optics and mirrors, a sample holder, and an optical delay line, together with a laser-driven detector [27]. Terahertz pulse (THz) is measured with and without the sample using the difference absorption spectra approach. The sample's dispersion and absorption, as determined by the Fourier transformation. The phase and amplitude are both determined by Terahertz – Time domain spectra (THz-TDS). Fig. 10 depicts schematics diagram of Terahertz time domain Spectroscopy. Fig. 11 depicts schematic representation of terahertz time domain scanning and spectroscopic.

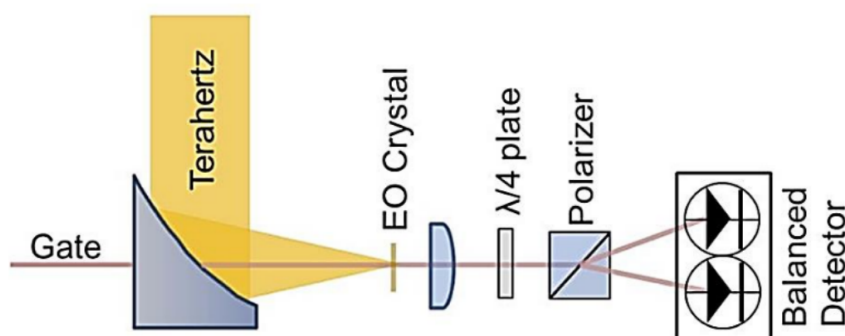


Fig. 10. Terahertz Time-Domain Spectroscopy (THz-TDS) [28]

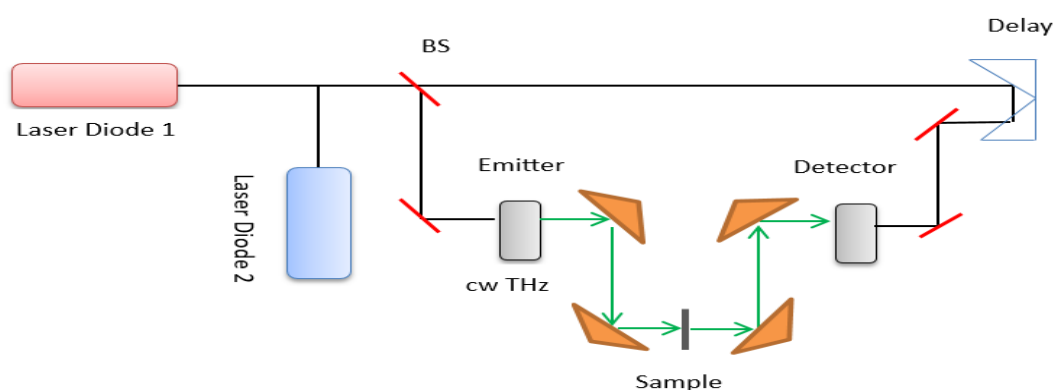


Fig. 11. Terahertz time domain scanning and spectroscopic [28]

Terahertz Pulsed Imaging is a pharmacological assessment device that uses very low power, extremely brief pulses of electrical energy at frequencies lower than ultraviolet ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$). It is completely risk free and harmless. It has already been demonstrated that terahertz spectroscopy is useful for distinguishing among the medications various polymorph structures. TIP is the subsequent stage in this cycle, where THz beats are utilized to picture an objective.

Lighting photoconductive semiconductors with beat close infrared laser energy creates and distinguishes THz beats in a cognizant way. Tablet coatings are cloudy to THz frequencies and do not disperse them altogether.

The behavior of materials or objects to terahertz radiation at certain frequencies is examined using frequency-domain methods. These methods frequently use continuous wave terahertz sources to determine the amplitude and phase of the terahertz signal. The two primary frequency-domain approaches are as follows:

1. Continuous Wave Terahertz Spectroscopy (CW-TDS);
2. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).

The limitations of conventional terahertz detectors and the particular benefits offered by nanoantenna-based systems led to the usage of nanoantenna arrays for terahertz detection. Nanoantenna arrays are perfect for terahertz applications because they provide high sensitivity, selectivity, and spatial resolution. The purpose of employing nanoantenna arrays in terahertz technology is examined in this paper. Conventional terahertz detectors including bolometers, photoconductive devices, and Schottky diodes have been extensively used for

terahertz sensing and imaging [29]. The sensitivity, bandwidth, and integration capabilities of these detectors, however, are typically constrained. Here are a few important limitations:

1. Low Sensitivity. Conventional terahertz detectors frequently have low sensitivity, requiring the utilization of high-power terahertz sources or sophisticated amplification systems to generate adequate signal levels. This reduces the entire system's detecting range and sensitivity.

2. Narrow Bandwidth. Because many traditional detectors have restricted bandwidth, it is difficult to catch a wide variety of terahertz frequencies at the same time [30]. This can stymie applications requiring broad frequency coverage or spectroscopic research.

3. Big and Elaborate Designs. Because certain traditional detectors require elaborate cooling systems or external optics, they are big, costly, and difficult to integrate into small devices. This restricts their use in portable or tiny terahertz devices. Nanoantenna arrays outperform traditional terahertz detectors in various ways, solving the constraints outlined above and enabling substantial advances in terahertz technology:

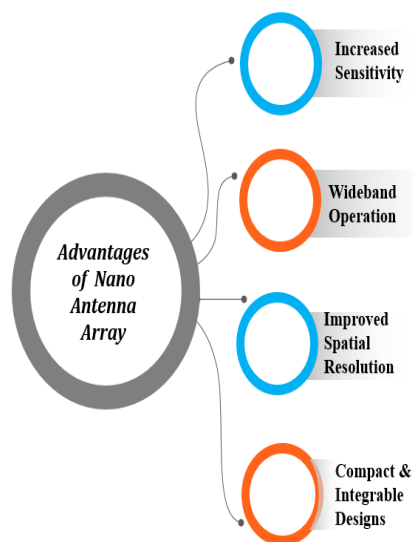
1. Increased Sensitivity. Nanoantenna arrays may focus terahertz waves into subwavelength areas, significantly increasing local field strength. This higher field strength enhances terahertz detection sensitivity, allowing for the identification of weak signals and increasing the signal-to-noise ratio [31].

2. Wideband Operation. Nanoantenna arrays may span a wide frequency range by creating nanoantennas with specific resonant qualities. This enables the detection and manipulation of numerous terahertz frequencies at the same time, ena-

bling broadband terahertz systems and spectroscopic investigation [32].

3. *Improved Spatial Resolution.* Nanoantenna arrays increase spatial resolution by confining terahertz waves into subwavelength areas [32]. This allows for high-resolution imaging and sensing, as well as the identification of small-scale features and the exact localization of terahertz sources.

4. *Compact and Integrable Designs.* Nanoantennas are small and easy to integrate with other components like microelectronic circuits or imaging systems. Because of their small size, nanoantennas may be easily integrated into portable or miniature terahertz devices, broadening the variety of conceivable applications [32].



The use of nanoantenna arrays in terahertz detection systems is a possible option for overcoming the limits of traditional detectors and unleashing new terahertz technological possibilities.

Design Considerations for Nanoantenna Arrays

Nanoantenna arrays for terahertz detection need careful consideration of numerous characteristics, materials, and production procedures. These design factors are critical in influencing the performance and usefulness of nanoantenna arrays. This section brings into light crucial elements to consider throughout the design process.

When building nanoantenna arrays for terahertz detection, several aspects must be considered:

1. **Resonant Frequency.** The nanoantennas resonant frequency should match the intended te-

rahertz frequency range of operation. The resonance frequency of nanoantennas may be controlled by adjusting their size, shape, and material qualities. By matching the resonance frequency, the incident terahertz waves may be efficiently coupled to the nanoantennas.

2. **Polarization.** Nanoantennas with specified polarization properties, such as linear, circular, or elliptical polarization, can be created. The polarization to be used is determined by the application requirements and the polarization state of the terahertz waves to be detected.

3. **Radiation Pattern.** The directionality and efficiency of the produced or received terahertz waves are determined by the radiation pattern of the nanoantenna arrays. Optimizing the radiation pattern ensures that terahertz signals are sent or received in the desired direction.

4. **Bandwidth.** The frequency range across which the nanoantenna arrays can efficiently couple with terahertz waves is defined by their bandwidth. Broadband nanoantenna designs are critical for applications requiring broad frequency coverage or spectroscopic analysis.

The materials used in nanoantennas are critical for obtaining high-performance terahertz detection:

1. **Metals.** Because of their outstanding conductivity and plasmonic features at terahertz frequencies, metals such as gold, silver, or copper are widely employed for nanoantennas. Plasmonic effects in metals can facilitate the interaction of terahertz waves with nanoantennas, resulting in higher sensitivity and field confinement [33].

2. **Semiconductors.** Certain semiconductor materials, such as gallium arsenide (GaAs) or indium phosphide (InP) [34], have advantageous terahertz detection capabilities. Semiconductors have the capacity to give tunability and integration, allowing for active control or modulation of terahertz signals.

3. **Dielectrics.** Dielectric materials, such as silicon dioxide (SiO₂) or polymers, are used as substrates for nanoantenna manufacturing because of their low-loss qualities. Dielectrics can help nanoantenna arrays with structural support, insulation, and thermal stability.

The materials used are determined by the required qualities, production procedures, and compatibility with other terahertz system components.

Fabrication processes are critical in achieving nanoantenna arrays with exact dimensions and high-quality structures:

1. Electron Beam Lithography (EBL). EBL is a high-resolution process that employs a concentrated electron beam to selectively expose a resist material, enabling accurate patterning of nano-antennas. EBL is suited for fabricating nanoantenna arrays with subwavelength characteristics [35].

2. Nanoimprint Lithography (NIL). NIL includes mechanically pressing and heating a pattern from a mold onto a substrate. NIL provides a low-cost, high-throughput method for producing nano-antenna arrays [36].

3. Self-Assembly Techniques. Self-assembly methods use the intrinsic characteristics of materials to produce ordered nanostructures spontaneously. Depending on the individual requirements and available resources, other manufacturing processes such as focused ion beam (FIB) milling, photolithography, or nano-scale 3D printing may be employed.

Nanoantenna array design for terahertz detection necessitates a thorough grasp of the necessary parameters, material qualities, and manufacturing procedures. Engineers and researchers may improve the performance and usefulness of nano-antenna arrays in terahertz applications by carefully examining these design elements.

Performance Metrics and Evaluation

Evaluating the performance of nanoantenna arrays for terahertz detection is crucial to ensure their effectiveness and reliability. Several performance metrics and evaluation techniques are utilized to assess the functionality and efficiency of these arrays. This section discusses key performance metrics and evaluation methods commonly employed in the field. Key Performance Metrics for Nanoantenna Arrays:

1. Radiation Efficiency. The capacity of nano-antenna arrays to convert incident terahertz waves into radiated power is measured by radiation efficiency. It measures how well the arrays work at sending or receiving terahertz radiation. Better performance is indicated by a higher radiation efficiency. It can be expressed as:

$$\eta = Pr / Pi,$$

where η – is radiation efficiency; Pr is the radiated power by the antenna; Pi is the input power to the antenna.

2. Gain. Compared to an isotropic radiator, gain is the amplification that the nanoantenna arrays produce when transmitting or receiving terahertz signals. It is computed as the difference between the power emitted equally in all directions and the power radiated in the intended direction. Signal strength improves with higher gain. It can be calculated using the equation:

$$G = (4\pi\eta A) / \lambda^2,$$

where G is the antenna gain; η is the radiation efficiency of the antenna; A is the effective aperture area of the antenna; λ is the wavelength of the terahertz wave.

3. Bandwidth. The range of terahertz frequencies across which nanoantenna arrays demonstrate effective coupling or radiation is referred to as their bandwidth. Applications that need spectroscopic analysis or extensive frequency coverage can be made possible by a greater bandwidth, which makes it possible to capture a wider variety of terahertz frequencies. The fractional bandwidth (FBW) can be calculated using the equation:

$$FBW = (f_{\max} - f_{\min}) / f_0,$$

where FBW is the fractional bandwidth; $f_{\max}$ is the maximum frequency of operation; $f_{\min}$ is the minimum frequency of operation; f_0 is the resonant frequency of the nanoantenna array.

4. Directivity. The capacity of nanoantenna arrays to direct terahertz radiation in a particular direction is measured by directivity. The ratio between the highest radiation intensity in the chosen direction and the average radiation intensity in all directions is used to calculate it. Better concentration ability is indicated by higher directivity. The directivity (D) can be expressed as:

$$D = 4\pi(Prad - Ptotal),$$

where D is the directivity; $Prad$ is the power radiated in the desired direction; $Ptotal$ is the total radiated power.

5. Polarization Features. Nanoantenna arrays may display certain polarization features, such as linear, circular, or elliptical polarization. The arrays polarization properties need to coincide with the polarization state of the terahertz waves. Essential variables to take into account are the level of

polarization and the capacity to control polarization states.

Performance Evaluation through Simulation and Measurement Methods. Using simulation approaches, it is common practice to evaluate and enhance the performance of nanoantenna arrays.

Finite Element Method (FEM) is a numerical method for solving the partial differential equations governing the propagation of electromagnetic waves. It allows for the modeling and simulation of nanoantenna arrays, allowing for the examination of their electromagnetic characteristics and the optimization of design parameters.

Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method is a computer technique for solving Maxwell's equations that discretizes both space and time. It is often used to investigate and simulate the interactions between terahertz radiation and nanoantenna arrays. FDTD contributes to the usability of nanoantenna arrays by showing how they behave in diverse settings. Measurement techniques are essential for proving the viability of nanoantenna arrays.

Finite Element Method (FEM) is for figuring out the amplitude and phase of terahertz waves that interact with nanoantenna arrays is called terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) [37]. Inves-

tigations may evaluate the radiation efficacy, gain, and frequency responsiveness of the arrays using this technique.

Terahertz fields near nanoantenna arrays may be observed and mapped with high resolution using Near-Field Scanning Terahertz Microscopy (NSOM) techniques. This enables the observation and characterization of the field distribution, directivity, and polarization properties of the arrays. Engineers and scientists may thoroughly assess the performance of nanoantenna arrays and improve their designs to get the best functionality and efficiency by combining modeling and measurement methodologies. These assessment techniques aid in the verification of the theoretical models, direct the process of design optimization, and speed up the creation of high-performance terahertz detection systems.

Applications of Nanoantenna Arrays in Terahertz Technology

Terahertz technology has found a wide range of uses for nanoantenna arrays, transforming multiple sectors and allowing breakthroughs in fields including security, medical imaging, and non-destructive testing shown in Fig. 12.

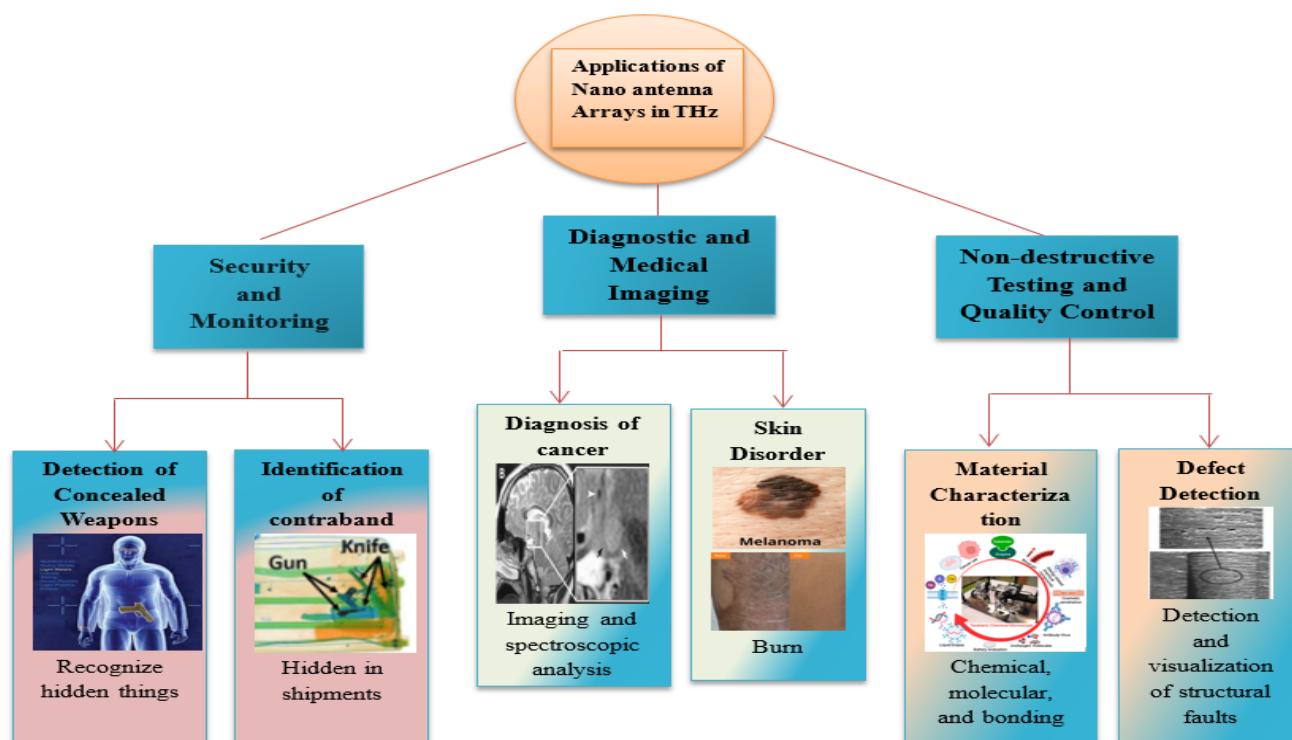


Fig. 12. Applications of Nanoantenna Arrays in THz

The primary application areas where nanoantenna arrays have had a substantial influence are explored in this section.

1. Security and Monitoring. Because they improve the capabilities for threat detection and identification, nanoantenna arrays have proven to be beneficial in security and surveillance applications. A few noteworthy uses are:

Terahertz radiation has the potential to penetrate clothing and other materials, making it feasible to discover unlawful or concealed goods. Nanoantenna arrays make it simpler to find and recognize hidden things because to their high sensitivity and spatial resolution.

Nanoantenna arrays may be used by terahertz imaging systems to detect illegal substances that are hidden in shipments or luggage. The enhanced sensitivity and imaging capabilities of nanoantenna arrays allow for more accurate detection and labeling of illicit products.

2. Diagnostic and Medical Imaging. The potential for medical imaging and diagnostics have been broadened by non-invasive, high-resolution nanoantenna arrays. Such uses in the healthcare industry include:

Because malignant tissues absorb terahertz energy differently than healthy cells, terahertz waves may be able to distinguish between the two. Nanoantenna arrays provide accurate imaging and spectroscopic analysis, which help with the early identification and characterization of malignancies.

Nanoantenna arrays in terahertz imaging devices can deliver accurate information on skin issues including melanoma, burns, or infections. High-resolution imaging capabilities of nanoantenna arrays enable accurate skin disease diagnosis and monitoring.

3. Nondestructive Testing and Quality Control. Nanoantenna arrays are crucial for non-destructive testing and quality control of materials because they may reveal details about a material's composition, structural integrity, and defects. Here are a few examples:

- **Material Characterization.** Terahertz spectroscopy and nanoantenna arrays make it possible to investigate the chemical, molecular, and bonding states of materials. This aids in the material's

characterization, quality assurance, and impurity or pollutant identification.

- **Defect Detection.** Nanoantenna arrays used in terahertz imaging systems may find flaws or concealed damage in a variety of materials, such as composites, ceramics, or electronic parts. They enable the detection and visualization of structural faults, such as fractures or delaminations, because to their improved sensitivity and spatial resolution.

These application fields just scratch the surface of the numerous opportunities that nanoantenna arrays in terahertz technology afford. Nanoantenna arrays are anticipated to find increasingly more varied uses as this field of study and development advances, fostering developments in industries including telecommunications, environmental monitoring, and semiconductor characterization.

We shall dig more into the design concepts, manufacturing methods, and particular application concerns for nanoantenna arrays in terahertz detection in the subsequent sections of this paper.

CONCLUSION

This paper presents design concepts, manufacturing methods, performance evaluation, particular application concerns for nanoantenna arrays in terahertz detection.

1. Terahertz Technology:

- Terahertz waves occupy the frequency range between microwaves and infrared radiation.

- Terahertz waves possess unique properties, such as non-ionizing nature and ability to penetrate various materials.

- Terahertz technology finds applications in imaging, communication, spectroscopy, material characterization, and security.

2. Nanoantennas:

- Nanoantennas are engineered at the nanoscale to efficiently couple, radiate, and manipulate terahertz waves.

- Different types of nanoantennas, such as dipole antennas, loop antennas, patch antennas, and spiral antennas, are commonly used in terahertz applications.

- Nanoantennas can be fabricated using techniques like electron beam lithography, nanoimprint lithography, or self-assembly processes.

- Materials like metals (gold, silver, copper), semiconductors (GaAs, InP), and dielectrics are used for nanoantenna fabrication.

3. Design Considerations:

- Design parameters, such as resonant frequency, polarization, radiation pattern, and bandwidth, need to be considered for efficient nanoantenna array design.

- Materials selection plays a crucial role in achieving desired performance characteristics.

- Fabrication techniques, including electron beam lithography, nanoimprint lithography, and self-assembly, are employed for nanoantenna array fabrication.

4. Performance Evaluation:

- Performance metrics like radiation efficiency, gain, bandwidth, directivity, and polarization characteristics are used to assess nanoantenna array performance.

- Simulation techniques, such as finite element method (FEM) and finite-difference time-domain (FDTD), aid in performance evaluation.

- Experimental techniques like terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) and near-field scanning terahertz microscopy (NSOM) are employed for measurement and validation.

5. Applications:

- Nanoantenna arrays find applications in security and surveillance, medical imaging and diagnostics, non-destructive testing, and quality control.

- They enable concealed weapons detection, contraband identification, cancer detection, skin disease diagnosis, material characterization, and defect detection, among others.

Compliance with Ethical Standards

1. Disclosure of potential conflicts of interest.

There is no conflict of interest.

2. Research involving human participants and/or

Animals.

For this type of study formal consent is not required.

3. Informed consent.

Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

Acknowledgement

I would like to thank, my guide Dr. Dipak P Patil Principal & Professor of Sandip Institute of Engineering and Management Nashik for his constant support, inspiration, and insightful advice throughout this entire project. It would have been challenging to complete this research without his support and guidance.

REFERENCES

1. Adak S., Tripathi L. N. (2019) Nanoantenna Enhanced Terahertz Interaction of Biomolecules. *Analyst*, 144 (21), 6172–6192. <https://doi.org/10.1039/c9an00798a>.
2. Al Hadi R., Grzyb J., Heinemann B. Pfeiffer U.R. (2013) A Terahertz Detector Array in a SiGe HBT Technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 48 (9), 2002–2010. <https://doi.org/10.1109/jssc.2013.2265493>.
3. Bareib M., Tiwari B. N., Hochmeister A., Jegert G., Zschieschang U., Klauk H., Fabel B., Scarpa G., Koblmüller G., Bernstein G. H., Porod W. (2011) Nanoantenna Array For Terahertz Detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 59 (10), 2751–2757. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2011.2160200>.
4. Boppel S., Lisauskas A., Mundt M., Seliuta D., Minkevicius L., Kasalynas I., Valusis G., Mittendorff M., Wimmerl S., Krozer V., Roskos, H. G. (2012) CMOS Integrated Antenna-Coupled Field-Effect Transistors for the Detection of Radiation From 0.2 to 4.3 THz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60 (12), 3834–3843. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2012.2221732>.
5. Cai Y., Brenner I., Lopata J., Wynn J., Pfeiffer L., Stark J. B., Wu Q., Zhang X. C., Federici J. F. (1998) Coherent Terahertz Radiation Detection: Direct Comparison Between Free-Space Electro-Optic Sampling and Antenna Detection. *Applied Physics Letters*, 73 (4), 444–446. <https://doi.org/10.1063/1.121894>.
6. Malhotra I., Jha K. R., Singh G. (2018) Terahertz Antenna Technology for Imaging Applications: a Technical Review. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 10 (3), 271–290.
7. Yun-Shik Lee (2009) *Principles of Terahertz Science and Technology*. New York, Springer. 66. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09540-0>.
8. Sizov F., Rogalski A. (2010) THz Detectors. *Progress in Quantum Electronics*, 34 (5), 278–347. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.06.002>.
9. Hu B. B., Nuss M. C. (1995) Imaging With Terahertz Waves. *Optics Letters*, 20 (16), 1716–1718. <https://doi.org/10.1364/ol.20.001716>.
10. Taday P. F., Pepper M., Arnone D. D. (2022) Selected Applications of Terahertz Pulses in Medicine and Industry. *Applied Science*, 12 (12), 1–18. <https://doi.org/10.3390/app12126169>.

11. Akyildiz I. F., Jornet J. M., Han C. (2014) Terahertz Band: Next Frontier for Wireless Communications. *Physical Communication*, 12, 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2014.01.006>.
12. Dhillon S. S., Vitiello M. S., Linfield E. H., Davies A. G., Hoffmann M. C., [et.al.] (2017) The 2017 Terahertz Science and Technology Roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50 (4), 043001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/50/4/043001>.
13. Huang S., Deng H., Wei X., Zhang J. (2023) Progress in the Application of Terahertz Time-Domain Spectroscopy for Pharmaceutical Analyses. *Front Bioeng Biotechnology*, 11, 1219042. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1219042>.
14. Hou H., Liu Z., Teng J., Palacios T., Chua S. J. (2016) A Sub-terahertz Broadband Detector Based on a GaN High-Electron-Mobility Transistor with Nanoantennas. *Applied Physics Express*, 10 (1), 014101. <https://doi.org/10.7567/apex.10.014101>.
15. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P. (2017) Enhancement of Terahertz Photoconductive Antenna Operation by Optical Nanoantennas. *Laser & Photonics Reviews*, 11 (1), 1600199. <https://doi.org/10.1002/lpor.201600199>.
16. Peter F., Winnerl S., Nitsche S., Dreyhaupt A., Schneider H., Helm M. (2007) Coherent Terahertz Detection with a Large-Area Photoconductive Antenna. *Applied Physics Letters*, 91 (8), 081109. <https://doi.org/10.1063/1.2772783>.
17. Jepsen P. U., Jacobsen R. H., Keiding S. R. (1996) Generation and Detection of Terahertz Pulses From Biased Semiconductor Antennas. *Journal of the Optical Society of America B*, 13 (11), 2424–2436. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5897-2_142.
18. Mitrofanov O., Brenner I., Luk T. S., Reno J. L. (2015) Photoconductive Terahertz Near-Field Detector with a Hybrid Nanoantenna Array Cavity. *ACS Photonics*, 2 (12), 1763–1768. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.5b00475>.
19. McKinley A., White T. P., Catchpole K. (2013) Theory of the Circular Closed Loop Antenna in the Terahertz, Infrared, and Optical Regions. *Journal of Applied Physics*, 114 (4), 044317. <https://doi.org/10.1063/1.4816619>.
20. Choudhury B., Sonde A. R., Jha R. M., Choudhury B., Sonde A. R., Jha R. M. (2016). Terahertz Antenna Technology for Space Applications. *Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering*. Springer, Singapore, 3–33. https://doi.org/10.1007/978-981-287-799-4_1.
21. Samanta D., Karthikeyan M. P., Banerjee A., Inokawa H. (2021) Tunable Graphene Nanopatch Antenna Design for On-chip Integrated Terahertz Detector Arrays with Potential Application in Cancer Imaging. *Nanomedicine*, 16 (12), 1035–1047. <https://doi.org/10.2217/nnm-2020-0386>.
22. Suzuki M., Tonouchi M. (2005) Fe-Implanted InGaAs Photoconductive Terahertz Detectors Triggered by 1.56 μm Femtosecond Optical Pulses. *Applied Physics Letters*, 86 (16), 163504. <https://doi.org/10.1063/1.1901817>.
23. Hasan M.R., Helles O. G. (2021) Dielectric Optical Nanoantennas. *Nanotechnology*, 32 (20), 202001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abdceb>.
24. Bragas A. V., Maier S. A., Boggiano H. D., Grinblat G., Berté R., de S. Menezes L., Cortés E. (2023) Nanomechanics with Plasmonic Nanoantennas: Ultrafast and Local Exchange Between Electromagnetic and Mechanical Energy. *Journal of the Optical Society of America B*, 40 (5), 1196–1211. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.482384>.
25. Neu J., Schmuttenmaer C. A. (2018) Tutorial: An Introduction to Terahertz Time-Domain Spectroscopy (THz-TDS). *Journal of Applied Physics*, 124, 231101. <https://doi.org/10.1063/1.5047659>.
26. D'Arco A., Fabrizio M. D., Dolci V., Petrarca M., Lupi S. (2020) THz Pulsed Imaging in Biomedical Applications. *Condensed Matter*, 5 (2), 25. <https://doi.org/10.3390/condmat5020025>.
27. Sun Y., Sy M. Y., Wang Y. X. J., Ahuja A. T., Zhang Y. T., Pickwell-MacPherson E. (2011) A Promising Diagnostic Method: Terahertz Pulsed Imaging and Spectroscopy. *World Journal of Radiology*, 3 (3), 55–65. <https://doi.org/10.4329/wjr.v3.i3.55>.
28. Fischer B. M., Hoffmann M., Helm H., Wilk R., Rutz F., Ostmann T. K., Koch M., Jepsen P. U. (2005) Terahertz Time-Domain Spectroscopy and Imaging of Artificial RNA. *Optics Express*, 13 (14), 5205–5215. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.005205>.
29. Liu Yu, Liu Hao, Tang Meiqiong, Huang Jiaoqi, Liu Wei, Dong Jinying, Chen Xueping, Fu Weiling, Zhang Yang (2019) The Medical Application of Terahertz Technology in Non-Invasive Detection of Cells and Tissues: Opportunities and Challenges. *RSC Advances*, 9, 9354–9363. <https://doi.org/10.1039/C8RA10605C>.
30. Li C., Zhang Y., Hirakawa K. (2023) Terahertz Detectors Using Microelectromechanical System Resonators. *Sensors*, 23 (13), 5938. <https://doi.org/10.3390/s23135938>.
31. Fu X., Liu Y., Chen Q., Fu Y., Cui T. J. (2022) Applications of Terahertz Spectroscopy in the Detection and Recognition of Substances *Frontiers in Physics*, 10, 869537. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.869537>.
32. Chen X., Lindley-Hatcher H., Stantchev R. I., Wang J., Li K., Hernandez Serrano A., Taylor Z. D., Castro-Camus E., Pickwell-MacPherson E. (2022) Terahertz (THz) Biophotonics Technology: Instrumentation, Techniques, and Biomedical Applications. *Chemical Physics Reviews*, 3, 011311. <https://doi.org/10.1063/5.0068979>.
33. Piccoli R., Rovere A., Toma A., Morandotti R., Razzari L. (2017) Terahertz Nanoantennas for Enhanced Spectroscopy. *Terahertz Spectroscopy - A Cutting Edge Technology*. <https://doi.org/10.5772/66349>.
34. Anwar R. S., Ning H., Mao L. (2018) Recent Advancements in Surface Plasmon Polaritons-Plasmonics in Sub-wavelength Structures at Microwave and Terahertz Regime *Digital Communications and Networks*, 4 (4), 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.dean.2017.08.004>.
35. Božanić M., Sinha S. (2019) Emerging Transistor Technologies Capable of Terahertz Amplification: A Way to Re-Engineer Terahertz Radar Sensors *Sensors*, 19 (11), 2454. <https://doi.org/10.3390/s19112454>.
36. Parinaz Emami (2015) *Electron Beam Lithography for nano-antenna Fabrication* [thesis]. Master of Science University of Missouri-Columbia. Available at: <https://mo-space.umsystem.edu/xmlui/handle/10355/50185>.
37. Koch M., Mittleman D. M., Ornik J., Camus E. C. (2023) Terahertz Time-Domain Spectroscopy. *Nature Reviews Methods Primers*, 3, 48. <https://doi.org/10.1038/s43586-023-00232-z>.

Received: 07.08.2023

Accepted: 10.10.2023

Published online: 29.03.2024

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА DEFORMATION IN SOLID MECHANICS

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-105-113>

УДК 539.413

Нормальные напряжения при температурном изгибе составного стержня

Докт. техн. наук, проф. А. И. Дудяк¹⁾, магистр техн. наук В. М. Хвасько¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Существующие методики расчета температурных напряжений в составных стержнях имеют определенные недостатки. Важность этих расчетов связана с безопасностью и эффективностью подобных инженерных конструкций в таких отраслях, как строительство, машиностроение, авиация. В статье представлено исследование поведения составных стержней при температурном воздействии с учетом деформации изгиба и условий возникновения максимальных нормальных напряжений. Проанализированы составные стержни, состоящие из двух различных металлов, сваренных между собой. Разработана методика расчета нормальных напряжений, учитывающая физико-механические характеристики материалов составных частей, такие как модуль упругости и коэффициент температурного линейного расширения. Выявлены собственные нейтральные слои каждого металлического стержня, что позволяет более точно определить распределение напряжений в составных стержнях. Приведен пример аналитического расчета нормальных напряжений, возникающих в стержне, состоящем из стальной и алюминиевой частей. Построены эпюры нормальных напряжений по высоте составных стержней. Дополнительно был проведен МКЭ-анализ составного стержня при температурном воздействии, реализованный с помощью ПК Ansys 2023 R2. Результаты численного исследования с высокой точностью подтвердили данные, полученные теоретическим путем. Результаты проведенного исследования имеют важное значение для практического использования при проектировании и конструировании подобных составных конструкций, обеспечивая инженерам более точные данные для анализа влияния температурных напряжений.

Ключевые слова: составной стержень, температурный изгиб, нормальное напряжение, изгибающий момент, модуль упругости, нейтральный слой, эпюра напряжений, метод конечных элементов (МКЭ)

Для цитирования: Дудяк, А. И. Нормальные напряжения при температурном изгибе составного стержня / А. И. Дудяк, В. М. Хвасько // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 2. С. 105–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-105-113>

Normal Stresses with Temperature Bending of Composite Rod

A. I. Dudjak¹⁾, V. M. Khvasko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Existing methods for calculating temperature stresses in composite rods have certain disadvantages. The importance of such calculations is related to the safety and efficiency of similar engineering structures in various industries such as

Адрес для переписки

Хвасько Виктория Михайловна
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65/1,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +37517 293-92-36
hvasko.victoriya@gmail.com

Address for correspondence

Khvasko Victoriya M.
Belarusian National Technical University
65/1, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +37517 293-92-36
hvasko.victoriya@gmail.com

construction, mechanical engineering and aviation. The paper presents a study of the behavior of composite rods under thermal loading, taking into account bending deformation and the conditions leading to maximum normal stresses. Composite rods consisting of two different metals welded together have been analyzed. A methodology for calculating normal stresses has been developed that takes into account the physical and mechanical characteristics of the materials of the component parts, such as the modulus of elasticity and coefficient of linear thermal expansion. The intrinsic neutral layers of each metal rod have been identified, which makes it possible to more accurately determine the stress distribution in the composite rods. An example of the analytical calculation of normal stresses occurring in a rod composed of steel and aluminum parts is provided. Diagrams of normal stresses along the height of the composite rods were constructed. Additionally, a FEM analysis of the composite rod under temperature influence was carried out while using Ansys 2023 R2 software. The results of the numerical study confirmed with high accuracy the data obtained theoretically. The outcomes of this study are crucial for practical applications in the design and construction of such composite structures, providing engineers with more accurate data for analyzing the influence of thermal stresses.

Keywords: composite rod, temperature bending, normal stress, bending moment, modulus of elasticity, neutral layer, stress diagram, finite element method (FEM)

For citation: Dudjak A. I., Khvasko V. M. (2024) Normal Stresses with Temperature Bending of Composite Rod. *Science and Technique*. 23 (2), 105–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-105-113> (in Russian)

Введение

Изучение поведения составных стержней при нагреве представляет собой важную задачу, имеющую применение в инженерной практике. Одним из ключевых аспектов является анализ максимальных нормальных напряжений, возникающих в составном стержне в результате воздействия температурного нагрева и одновременного возникновения деформации изгиба.

В работах [1, 2] представлены базовые сведения о прочности и устойчивости составных конструкций, однако эти методики имеют определенные ограничения. Рассмотрена узкая полоса при равномерном нагреве от температуры t_0 до t , составленная из двух различных металлов (модули продольной упругости E_1 и E_2 соответственно), сваренных между собой (рис. 1). Если коэффициенты линейного расширения этих металлов различны ($\alpha_2 > \alpha_1$), то нагрев будет сопровождаться изгибом полосы.

В расчетах принималась ширина полосы, равная единице.

Для простейшего случая, когда $E_1 = E_2 = E$ и $h_1 = h_2 = \frac{h}{2}$, представлена следующая формула для определения нормальных напряжений, возникающих в биметаллической полосе:

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2} E (\alpha_2 - \alpha_1) (t - t_0). \quad (1)$$

Распределение нормальных напряжений по поперечному сечению биметаллической полосы для такого случая показано на рис. 2.

Как видно из рис. 2, распределение напряжений по высоте сечения носит линейный характер, и они достигают максимальных значений в зоне контакта поверхностей полос. При таком способе соединения металлов не учтены условия возникновения касательных напряжений вблизи зоны контакта металлов [3], что является существенным недостатком изложенной методики.

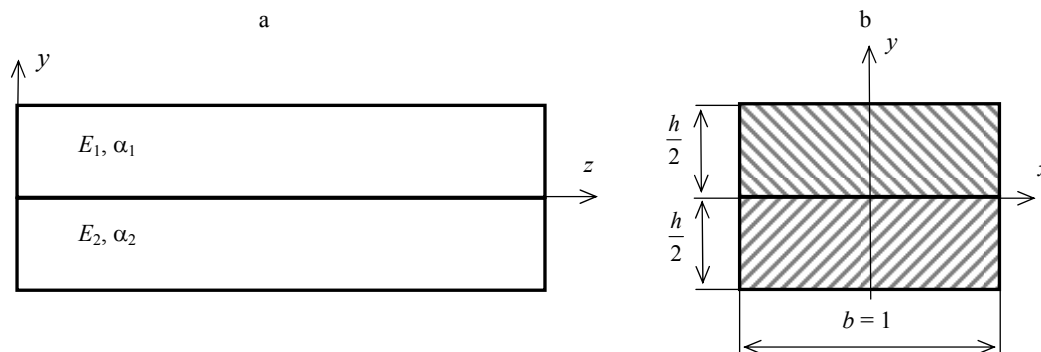


Рис. 1. Биметаллическая полоса:

а – схема полосы из двух различных металлов; б – поперечное сечение полосы

Fig. 1. Bimetal strip: а – diagram of strip of two different metals; б – cross section of strip

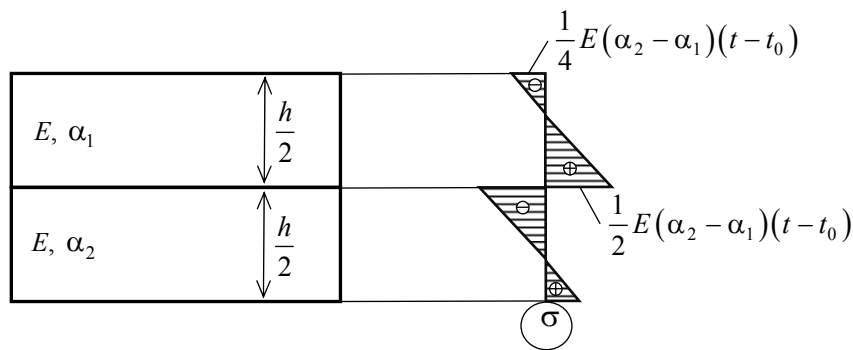


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений по сечению биметаллической полосы

Fig. 2. Distribution of normal stresses over cross section of bimetal strip

Кроме того, в расчетах полосу из двух металлов рассматривают как единое целое, имеющую радиус кривизны ρ , то есть сварка составных частей должна производиться по всей длине боковых поверхностей. Однако распределение нормальных напряжений (рис. 2) показывает, что каждый металлический слой полосы имеет собственный нейтральный слой [4].

Таким образом, несмотря на существующие исследования, остается необходимость в дальнейшем анализе и уточнении формул для более точного описания распределения напряжений в составных стержнях. В данной работе мы предложим более точную методику расчета нормальных напряжений в составных стержнях при их температурном нагреве. Уделим особое внимание вопросу закрепления составных частей стержней между собой и их соответствию теоретическим моделям. Кроме того, проведем МКЭ-анализ для подтверждения полученных результатов и оценки их точности.

Теоретические исследования нормальных напряжений

Рассмотрим составной стержень, лежащий свободно на двух шарнирных опорах (рис. 3). Обозначим модули продольной упругости верхней и нижней частей стержня E_1 и E_2 соответственно, ширину сечения стержня b , высоту верхней и нижней частей стержня c , d соответственно. При температурной деформации данного стержня воспользуемся гипотезой, согласно которой плоские сечения до деформации остаются плоскими и после нее [5].

Если принять, что коэффициент температурного линейного расширения $\alpha_2 > \alpha_1$, то при нагреве такого составного стержня от начальной температуры t_0 до конечной t изгиб верхнего и нижнего стержней будет происходить выпуклостью вниз, а на их торцах возникнут одинаковые изгибающие моменты M_u . Полный изгибающий момент M_u можно представить как сумму изгибающих моментов, действующих на верхний (M_1) и нижний (M_2) стержни:

$$M_u = M_1 + M_2. \quad (2)$$

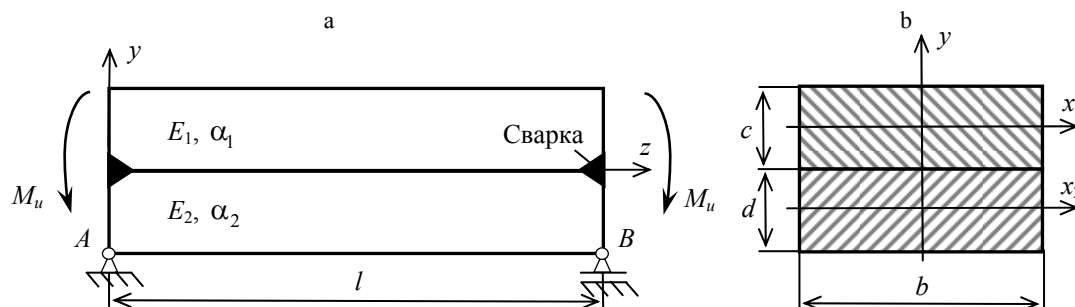


Рис. 3. Составной стержень на двух опорах:

а – схема соединения составных частей стержня; б – поперечное сечение стержня

Fig. 3. Composite rod on two supports: a – connection diagram of rod parts; b – cross section of rod

В связи с тем, что углы поворота отдельных частей будут равны между собой, формулы для определения составляющих изгибающих моментов можно представить в виде:

$$M_1 = M_u \frac{E_1 I_{x1}}{(EI_x)_c}; \quad M_2 = M_u \frac{E_2 I_{x2}}{(EI_x)_c}, \quad (3)$$

где I_{x1} , I_{x2} – моменты инерции составных частей стержня; $(EI_x)_c$ – суммарная жесткость сечения составного стержня [6].

При нагреве биметаллического стержня верхняя его часть будет удлиняться за счет воздействия на нее нижней его части с большим коэффициентом температурного расширения α_2 , а нижняя часть будет укорачиваться. Вследствие того что к стержню не приложены внешние силы, возникающие внутренние силы N_1 и N_2 должны уравниваться друг друга, то есть $N_1 = N_2 = N$.

Ранее в работе [7] получено соотношение, связывающее полный изгибающий момент с продольной силой:

$$M_u = \frac{1}{2} N (c + d). \quad (4)$$

С учетом совместности деформаций от температурного нагрева, изгиба и осевого воздействия на верхнюю и нижнюю части стержня в зоне контакта металлов значение силы N будет равно [7]

$$N = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)(t - t_0)}{\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{(c + d)^2}{4(EI_x)_c}}. \quad (5)$$

Нормальные напряжения в составных частях стержня определяют из формул:

$$\sigma_1 = \frac{N}{A_1} \pm \frac{M_1}{I_{x1}} y_1; \quad (6)$$

$$\sigma_2 = -\frac{N}{A_2} \pm \frac{M_2}{I_{x2}} y_2, \quad (7)$$

где y_1 , y_2 – ординаты точек, в которых определяются нормальные напряжения.

Пример аналитического расчета

Требуется исследовать распределение нормальных напряжений по высоте сечения стержня, составленного из стальной и алюминиевой частей, показанного на рис. 3. Стержень нагревается от начальной температуры $t_0 = 20^\circ\text{C}$ до конечной $t = 70^\circ\text{C}$. Принимаем коэффициенты линейного расширения: для стали $\alpha_1 = 1,2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{град}}$, а для алюминия $\alpha_2 = 2,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{град}}$. Модули продольной упругости:

для стали $E_1 = 2 \cdot 10^5$ МПа, для алюминия $E_2 = 0,71 \cdot 10^5$ МПа. Ширина стальной и алюминиевой частей $b = 50$ мм, высоты обеих частей равны $c = d = h = 30$ мм.

Определим внутренние силы от нагрева в стальной и алюминиевой частях в соответствии с формулой (5)

$$N = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)(t - t_0)}{\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{h^2}{(EI_x)_c}}.$$

В нашем случае:

$$A_1 = A_2 = bh = 50 \cdot 30 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ (мм}^2\text{)};$$

$$I_{x1} = I_{x2} = \frac{bh^3}{12} = \frac{50 \cdot 30^3}{12} = 112500 \text{ (мм}^4\text{)}.$$

Подставив величины A_1 , A_2 , I_{x1} и I_{x2} , вычислим внутренние силы:

$$\begin{aligned} N &= \frac{(2,3 \cdot 10^{-5} - 1,2 \cdot 10^{-5})(70 - 20)}{\frac{1}{2 \cdot 10^5 \cdot 1,5 \cdot 10^3} + \frac{1}{0,71 \cdot 10^5 \cdot 1,5 \cdot 10^3} + \frac{30^2}{(2 \cdot 10^5 + 0,71 \cdot 10^5) \cdot 112500}} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{(2,3 \cdot 10^{-5} - 1,2 \cdot 10^{-5})(70 - 20)}{30^2 + \frac{1}{(2 \cdot 10^5 + 0,71 \cdot 10^5) \cdot 112500}} = \\ &= 13019,82 \text{ (Н)}. \end{aligned}$$

Полный изгибающий момент, согласно выражению (4), будет равен

$$M_u = Nh = 13019,82 \cdot 30 = 390594,6 \text{ (Н} \cdot \text{мм)}.$$

В соответствии с формулами (3) вычислим величины изгибающих моментов, действующих на стальную (M_1) и алюминиевую (M_2) части стержня:

$$\begin{aligned} M_1 &= M_u \frac{E_1 I_{x1}}{(EI_x)_c} = \\ &= 390594,6 \cdot \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 112500}{(2 \cdot 10^5 + 0,71 \cdot 10^5) \cdot 112500} = \\ &= 288261,7 \text{ (Н} \cdot \text{мм)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= M_u \frac{E_2 I_{x2}}{(EI_x)_c} = \\ &= 390594,6 \cdot \frac{0,71 \cdot 10^5 \cdot 112500}{(2 \cdot 10^5 + 0,71 \cdot 10^5) \cdot 112500} = \\ &= 102332,9 \text{ (Н} \cdot \text{мм)}. \end{aligned}$$

На рис. 4 приведено поперечное сечение составного стержня и точки, в которых будут определены величины нормальных напряжений.

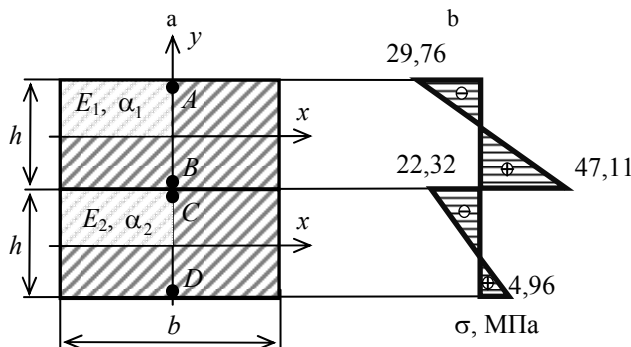


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений по высоте составного сечения:
а – схема поперечного сечения;
б – эпюра нормальных напряжений

Fig. 4. Distribution of normal stresses along height of composite section:
а – cross section scheme;
б – normal stresses diagram

Нормальные напряжения, согласно формулам (6), в точках A и B будут равны:

$$\begin{aligned} \sigma_A &= \frac{N}{A_1} - \frac{M_1}{I_{x1}} \cdot \frac{h}{2} = \frac{13019,82}{1500} - \frac{288261,7}{112500} \cdot 15 = \\ &= -29,76 \text{ (МПа)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_B &= \frac{N}{A_1} + \frac{M_1}{I_{x1}} \cdot \frac{h}{2} = \frac{13019,82}{1500} + \frac{288261,7}{112500} \cdot 15 = \\ &= 47,11 \text{ (МПа)}. \end{aligned}$$

Вычислим нормальные напряжения в точках C и D , согласно выражениям (7):

$$\begin{aligned} \sigma_C &= -\frac{N}{A_2} - \frac{M_2}{I_{x2}} \cdot \frac{h}{2} = \\ &= -\frac{13019,82}{1500} - \frac{102332,9}{112500} \cdot 15 = -22,32 \text{ (МПа)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_D &= -\frac{N}{A_2} + \frac{M_2}{I_{x2}} \cdot \frac{h}{2} = \\ &= -\frac{13019,82}{1500} + \frac{102332,9}{112500} \cdot 15 = 4,96 \text{ (МПа)}. \end{aligned}$$

По полученным данным построена эпюра распределения нормальных напряжений по высоте сечения составного стержня (рис. 4б).

МКЭ-анализ нормальных напряжений

Для подтверждения теоретических исследований проведен расчет нормальных напряжений при нагреве составного стержня (рис. 3) методом конечных элементов (МКЭ), реализованного с помощью ПК Ansys 2023 R2 [8–10].

Смоделирован стержень длиной 1000 мм, состоящий из одинаковых стальной (Structural Steel) и алюминиевой (Aluminum Alloy) частей прямоугольного поперечного сечения с заданными размерами: $b = 50$ мм, $h = 30$ мм (рис. 5) и необходимыми механическими характеристиками (рис. 6). Затем заданы условия закрепления стержня (A – Fixed Support, B – Displacement) (рис. 7) и условия температурного нагрева от 20 до 70 °С (Thermal Condition) (рис. 8).

Для опасного сечения, проходящего через центр масс составного стержня, были определены величины нормальных напряжений (рис. 9).

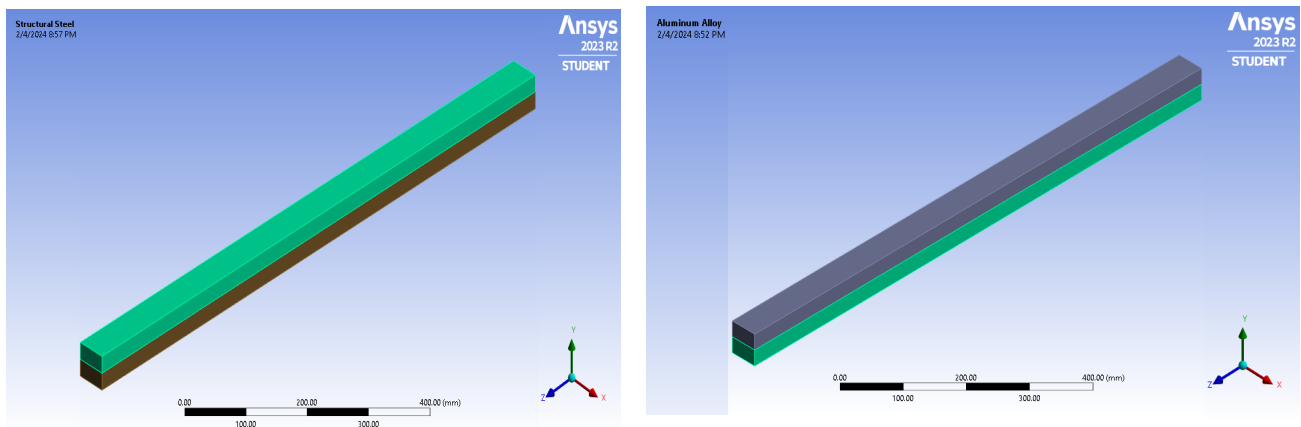


Рис. 5. Моделирование частей составного стержня

Fig. 5. Modeling parts of composite rod

Structural Steel	
Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1	
Density	7.85e-09 tonne/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0.3
Bulk Modulus	1.6667e+05 MPa
Shear Modulus	76923 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	250 MPa

Aluminum Alloy	
General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.	
Density	2.77e-09 tonne/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	71000 MPa
Poisson's Ratio	0.33
Bulk Modulus	69608 MPa
Shear Modulus	26692 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	2.3e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	280 MPa

Рис. 6. Механические характеристики материалов составных частей стержня

Fig. 6. Mechanical material characteristics of rod parts

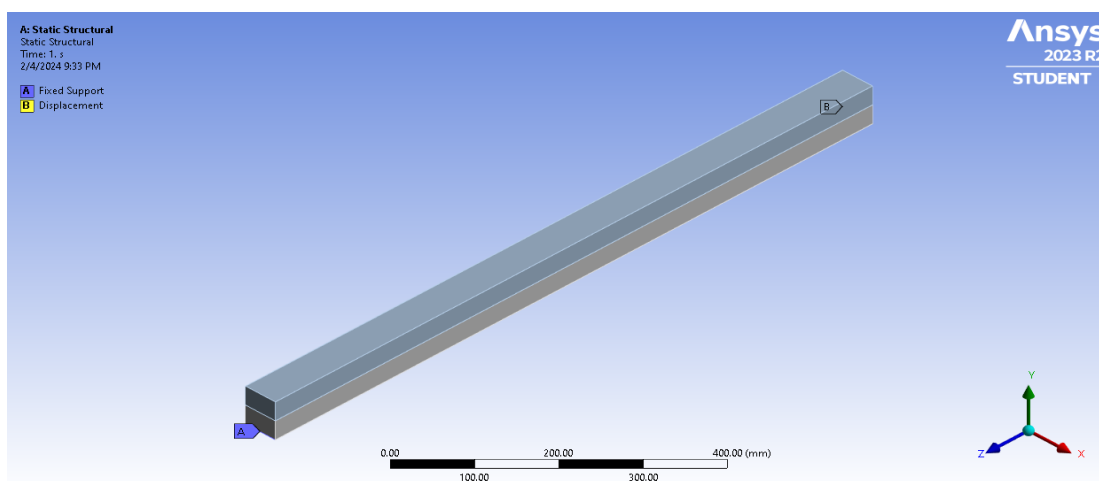


Рис. 7. Условия закрепления составного стержня
Fig. 7. Conditions for fastening a composite rod

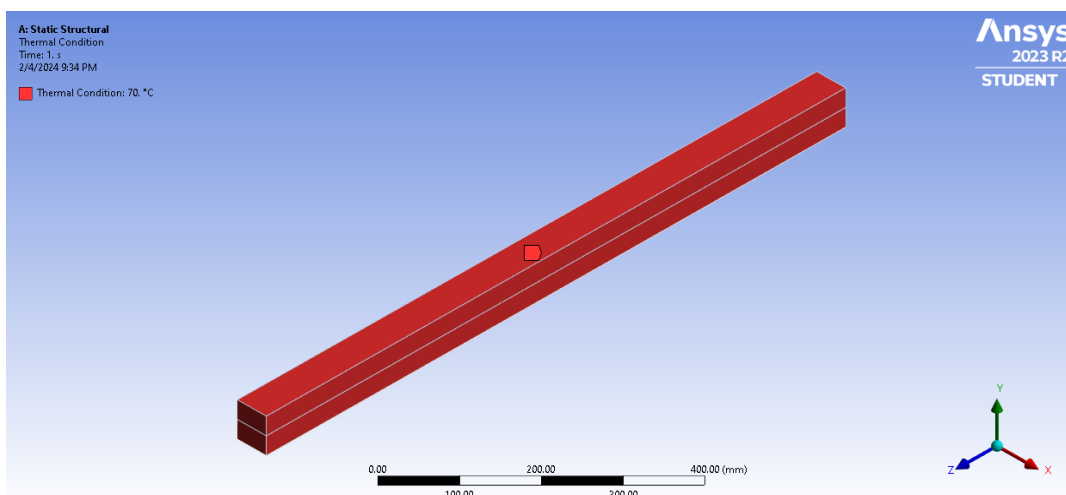


Рис. 8. Условия температурного нагрева составного стержня
Fig. 8. Temperature heating conditions for a composite rod

Сравнительный анализ результатов

Сопоставим результаты теоретического расчета с данными, полученными в результате МКЭ-анализа (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Составной стержень	Сечение	Нормальные напряжения		Погрешность, %
		Теоретическое значение, МПа	МКЭ-расчет, МПа	
Сталь (Structural Steel)	A	-29,76	-30,177	1,40
	B	47,11	47,532	0,90
Алюминий (Aluminum Alloy)	C	-22,32	-22,461	0,63
	D	4,96	5,114	3,11

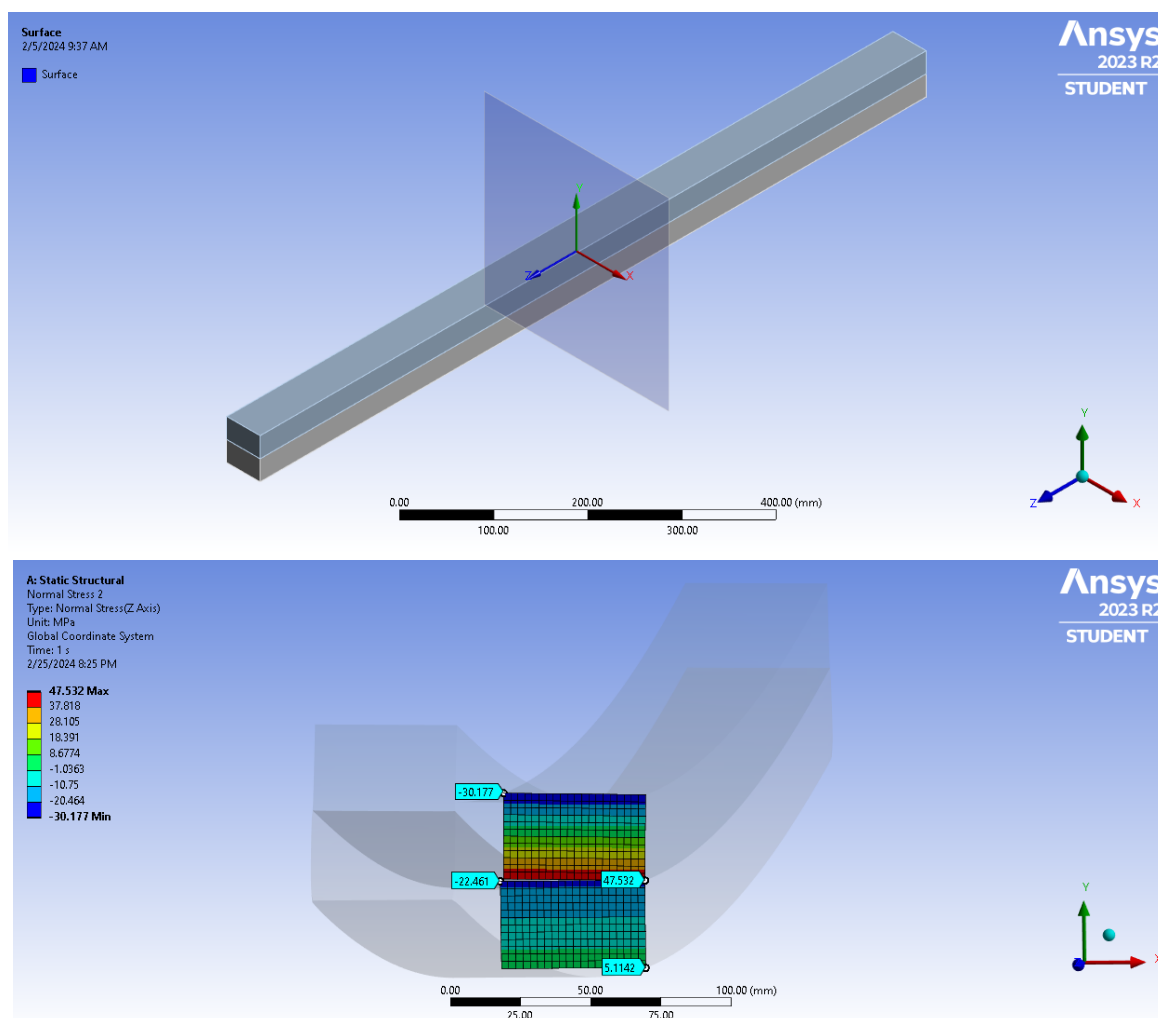


Рис. 9. Распределение нормальных напряжений в опасном сечении составного стержня

Fig. 9. Distribution of normal stresses in a dangerous section of a composite rod

ВЫВОДЫ

1. Предложены соотношения для определения величины изгибающего момента, действующего на составной стержень, и формулы для определения составляющих изгибающих моментов, действующих на отдельные части составного стержня.

2. Получены выражения для определения нормальных напряжений в отдельных частях стержня с учетом механических характеристик его материалов. Установлено, что в каждом составном стержне нормальные напряжения изменяются по линейному закону, при этом стержни имеют нейтральные слои.

3. Проведен МКЭ-анализ составного стержня с использованием ПК Ansys 2023 R2. Полу-

ченные результаты с высокой точностью подтверждают достоверность теоретических исследований температурных напряжений, возникающих при изгибе стержня, составленного из стальной и алюминиевой частей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко, С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек / С. П. Тимошенко. М.: Наука, 1971. 730 с.
2. Тимошенко, С. П. Прочность и колебание элементов конструкций / С. П. Тимошенко. М.: Наука, 1975. 704 с.
3. Harris, B. Engineering Composite Materials / Bryan Harris. London: The Institute of Materials, 1999. 193 p.
4. Подскребко, М. Д. Сопротивление материалов / М. Д. Подскребко. Минск: Выш. шк., 2007. 797 с.
5. Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов / Э. И. Старовойтов. Гомель: БелГУТ, 1999. 219 с.

6. Дудяк, А. И. Изгиб составных балок / А. И. Дудяк, В. М. Хвасько // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. / БНТУ; редкол.: Ю. В. Василевич (пред. редкол., гл. ред.). Минск: БНТУ, 2022. Вып. 36. С. 118–120.
7. Дудяк, А. И. Температурные напряжения в биметаллическом стержне / А. И. Дудяк, В. М. Хвасько // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. / БНТУ; редкол.: Ю. В. Василевич (пред. редкол., гл. ред.). Минск: БНТУ, 2022. Вып. 36. С. 139–142.
8. Khvasko, V. M. Study of Bending Deformations of a Two-Supported Beam Using Ansys 22.2 / V. M. Khvasko, H. M. S. H. Bandara // Информационные технологии в образовании, науке и производстве [Электронный ресурс]: материалы науч.-техн. интернет-конференции, Минск, 21–22 ноября 2022 г. / сост. М. Г. Карасёва. Минск: БНТУ, 2023. С. 191–195. <https://rep.bntu.by/handle/data/127990>.
9. Barbero, E.J. Finite Element Analysis of Composite Materials Using Ansys / Ever J. Barbero. 2nd edition. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. 82 p.
10. Jayalin, D. Analysis of Composite Beam Using Ansys / D. Jayalin, Prince G. Arulraj, V. Karthika // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2015. Volume 04, Special Issue 09. P. 11–15. <https://ijret.org/volumes/2015v04/i21/IJRET20150421003.pdf>.
4. Podskrebko M. D. (2007) *Strength of Materials*. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ. 797 (in Russian).
5. Starovoitov E. I. (1999) *Strength of Materials*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 219 (in Russian).
6. Dudjak A. I., Khvasko V. M. (2022) Bending of Composite Beams. *Theoreticheskaya I Prikladnaya Mekhanika: Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Sb.* [Theoretic and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection]. Minsk, Belarusian National Technical University, (36), 118–120 (in Russian).
7. Dudjak A. I., Khvasko V. M. (2022) Temperature Stresses in a Bimetallic Rod. *Theoreticheskaya I Prikladnaya Mekhanika: Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Sb.* [Theoretic and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection]. Minsk, Belarusian National Technical University, (36), 139–142 (in Russian).
8. Khvasko V. M., Bandara H. M. S. H. (2023) Study of Bending Deformations of a Two-Supported Beam Using Ansys 22.2. *Informacionnye Tekhnologii v Obrazovanii, Nauke i Proizvodstve: Materialy Nauch.-Tekhn. Internet-Konf., Minsk, 21–22 Noyabrya* [Information Technologies in Education, Science and Production: Proceedings of Scientific and Technical Internet-Conference, Minsk, November 21–22, 2022]. Minsk, Belarusian National Technical University, 191–195. <https://rep.bntu.by/handle/data/127990>.
9. Barbero E. J. (2014) *Finite Element Analysis of Composite Materials Using Ansys*. 2nd Edition. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group. 82.
10. Jayalin D., Arulraj Prince G., Karthika V. (2015) Analysis of composite beam using Ansys. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Volume 04, Special Issue 09, 11–15. <https://ijret.org/volumes/2015v04/i21/IJRET20150421003.pdf>.

Поступила 21.11.2023

Подписана в печать 23.01.2024

Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

Received: 21.11.2023

Accepted: 23.01.2024

Published online: 29.03.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-114-120>

УДК 681.7.023.72

Кинематические особенности абразивной обработки боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз по методу свободного притирания

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук¹⁾, асп. Р. О. Диас Гонсалес^{1, 2)},
кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова¹⁾, В. О. Кузнецик¹⁾, В. И. Юринок¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо
(Мерида, Боливарианская Республика Венесуэла)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Предложена технология трехопорной абразивной обработки плоско-выпуклых конических линз инструментом со стабилизированной плоскостностью рабочей поверхности, и рассмотрена схема устройства для реализации этой технологии. Устройство содержит инструмент-диск с плоской рабочей поверхностью, правильник в виде стеклянной пластины с отверстиями для деталей, привод вращательного движения последних и вал привода возвратно-вращательного их перемещения. При использовании устройства крепление плоско-выпуклых конических линз для их последующей групповой обработки происходит посредством оптического контакта, основанного на силах молекулярного сцепления. Такой метод блокировки повышает точность обработанных деталей и исключает применение наклеечной смолы, при нагреве которой происходит загрязнение окружающей среды канцерогенными веществами фенольной группы. Кроме того, в конструкцию устройства введены специальные компенсаторы, позволяющие свести к минимуму влияние вибраций в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь», что способствует повышению параметров точности плоско-выпуклых конических линз. Изложены результаты исследования влияния характера обработки боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз на точность и производительность процесса формообразования. Рассмотрены следующие случаи: с различной ориентацией вершины плоско-выпуклых конических линз относительно оси симметрии инструмента, без принудительного и с принудительным их вращением, с выходом и без выхода за край инструмента при возвратно-вращательном перемещении заготовок по рабочей поверхности последнего. Установлено, что точность формообразования и его производительность в случае обработки без выхода деталей за край инструмента в среднем на 30 % выше по сравнению с противоположной ситуацией, а обработка с принудительным относительным вращением блока деталей повышает их точность в среднем в полтора раза по сравнению с отсутствием такового, при этом внутренняя ориентация плоско-выпуклых конических линз (вершина конуса направлена в сторону оси вращения инструмента) способствует повышению интенсивности съема припуска более чем в два раза по сравнению с наружной их ориентацией.

Ключевые слова: коническая линза, плоский инструмент, правильник, трехопорная обработка, наладочные параметры, режимы обработки, свободное притирание

Для цитирования: Кинематические особенности абразивной обработки боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз по методу свободного притирания / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 2. С. 114–120. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-114-120>

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

Kinematic Features of Abrasive Processing of Lateral Surface of Flat-Convex Conical Lenses Using Free Rubbing Method

A. S. Kozeluk¹⁾, R. O. Diaz Gonzales^{1, 2)}, M. I. Filonova¹⁾, V. O. Kuznechik¹⁾, V. I. Yurinok¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Polytechnic University Institute of Santiago Mariño (Merida, Venezuela)

Abstract. A technology for three-support abrasive processing of flat-convex conical lenses using a tool with a stabilized flatness of the working surface is proposed, and a device diagram for implementing this technology is considered. The device contains a disk tool with a flat working surface, a straightener in the form of a glass plate with holes for parts, a drive for the rotational movement of the latter and a drive shaft for their reciprocating rotational movement. When using the device, the attachment of flat-convex conical lenses for their subsequent group processing occurs through optical contact based on molecular adhesion forces. This blocking method increases the accuracy of processed parts and eliminates the use of adhesive resin, which, when heated, pollutes the environment with carcinogenic substances of the phenolic group. In addition, special compensators have been introduced into the design of the device to minimize the influence of vibrations in the “machine – fixture – tool – part” system, which helps to improve the accuracy parameters of plano-convex conical lenses. The paper presents results of a study of the influence of the nature of processing of the lateral surface of flat-convex conical lenses on the accuracy and productivity of the shaping process. The following cases are considered: with different orientations of the top of flat-convex conical lenses relative to the axis of symmetry of the tool, without forced and with forced rotation, with and without going beyond the edge of the tool during reciprocating rotational movement of workpieces along the working surface of the latter. It has been established that the accuracy of shaping and its productivity in the case of processing without parts leaving the edge of the tool are on average 30 % higher compared to the opposite situation, and processing with forced relative rotation of a block of parts increases their accuracy on average by one and a half times compared with absence of such, while the internal orientation of flat-convex conical lenses (the top of the cone is directed towards the axis of rotation of the tool) helps to increase the intensity of stock removal by more than two times compared to their external orientation.

Keywords: conical lens, flat tool, straightener, three-support processing, adjustment parameters, processing modes, free grinding

For citation: Kozeluk A. S., Diaz Gonzales R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Yurinok V. I. (2024) Kinematic Features of Abrasive Processing of Lateral Surface of Flat-Convex Conical Lenses Using Free Rubbing Method. *Science and Technique*. 23 (2), 114–120. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-114-120> (in Russian)

Введение

Достоинством плоско-выпуклых конических линз является то, что они в отличие от сферических линз, которые создают широкий пучок Гаусса, формируют узкий пучок Бесселя с полушириной несколько микрометров [1, 2]. Это свойство плоско-выпуклых конических линз позволяет эффективно применять их в оптической системе различных устройств, работа которых основана на использовании высокоэнергетического светового пучка (инструменты для механической обработки различных материалов, лазерные скальпели в медицине и др.) [3–6].

При изготовлении плоско-выпуклых конических линз по существующей технологии на отечественных предприятиях оптической промышленности заготовки закрепляют на шпиндель рычажного шлифовально-полировального станка, а инструменту в виде диска сообщают возвратно-поступательное перемещение по об-

разующей конуса. При этом происходит как съём припуска с поверхности заготовки детали, так и неравномерный износ инструмента, что нарушает его первоначальную плоскостность. Следовательно, это поштучная низкопроизводительная обработка, в которой скорость вращения инструмента (она зависит от длины линии контакта инструмента с образующей конуса) и плоскостность его рабочей поверхности непостоянны, что вызывает общее и локальное отклонение образующей конуса от прямолинейности в пределах $\pm 0,25$ и $\pm 0,025$ мкм соответственно. Эти погрешности превышают аналогичные характеристики для плоско-выпуклых конических линз мирового уровня.

Сущность технологии

Технология обработки плоско-выпуклых конических линз, которая в настоящее время используется иностранными фирмами, включает следующие этапы: 1) шлифование металли-

ческим и грубое полирование полиуретановым инструментами в виде диска без перемещения детали по рабочей поверхности последнего; 2) тонкое плазменное полирование; 3) доводку формы и чистоты конической поверхности гибким зональным инструментом [7]. Технология поштучная и непроизводительная, при ее использовании получается общее и локальное отклонение образующей конуса от прямолинейности на уровне $\pm 0,18$ и $\pm 0,018$ мкм соответственно, что не всегда удовлетворяет современным требованиям.

При обработке плоско-выпуклых конических линз размером 4 мм и более по предлагаемой технологии используются одновременно три заготовки, которые вращаются принудительно с постоянной скоростью и совершают колебательное перемещение по плоской рабочей поверхности инструмента без выхода за его край (рис. 1) [8]. Это технология групповой трехпорной абразивной обработки плоско-выпуклых конических линз. Она позволяет поддерживать необходимую плоскостность рабочей поверхности инструмента в виде диска 2 с помощью специального правильника 3, который представляет собой стеклянный диск с ровной рабочей поверхностью и тремя отверстиями для обрабатываемых деталей (суммарная площадь отверстий в сепараторе не должна превышать 30 % от общей площади самого сепаратора, и они (отверстия) расположены на разных угловых расстояниях друг от друга и различных расстояниях от центра [9]). И поскольку вес правильника значительно превышает вес обрабатываемых плоско-выпуклых конических линз, то он непрерывно нивелирует неравномерное срабатывание инструмента деталями и при определенных режимах обработки постоянно поддерживает необходимую плоскостность его рабочей поверхности. Кроме того, при использовании данной технологии представляется возможность управлять процессом формообразования исполнительных поверхностей плоско-выпуклых конических линз посредством изменения параметров режимов обработки. Вместе с тем в данном случае наклонами заготовки по лимбу предлагаемого устройства можно обеспечить точное значение угла при вершине конуса. Эти возможности отсутствуют в существующей технологии.

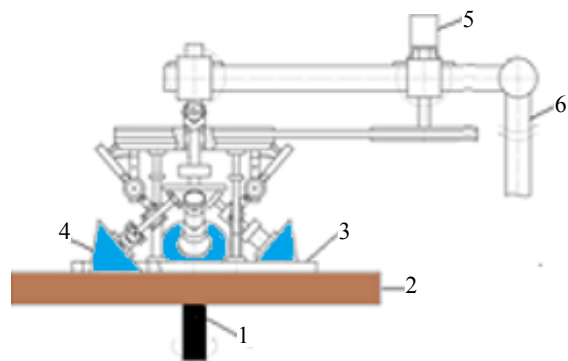


Рис. 1. Схема устройства: 1 – шпиндель базового станка, 2 – инструмент-планшайба, 3 – правильник в виде стеклянной пластины с отверстиями для деталей, 4 – деталь (плоско-выпуклая коническая линза), 5 – привод вращательного движения деталей, 6 – вал привода возвратно-вращательного движения деталей

Fig. 1. Device diagram: 1 – spindle of the base machine, 2 – faceplate tool, 3 – straightener in the form of a glass plate with holes for parts, 4 – part (plano-convex conical lens), 5 – drive for rotational movement of parts, 6 – drive shaft for reciprocating rotation of parts

Использование предлагаемого устройства позволяет повысить производительность обработки плоско-выпуклых конических линз и уменьшить отклонение их образующей от прямолинейности и локальной погрешности на исполнительных поверхностях до уровней соответственно $\pm 0,12$ и $\pm 0,012$ мкм.

Результаты исследования и их анализ

Проведены исследования влияния характера обработки боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз на точность и производительность процесса формообразования. Рассматривались следующие случаи: с различной ориентацией вершины линзы относительно оси симметрии инструмента, без принудительного и с принудительным их вращением, с выходом и без выхода за край инструмента при возвратно-вращательном перемещении заготовок по рабочей поверхности последнего.

Анализ полученных экспериментальных результатов, приведенных на рис. 2, показывает, что в случае внутренней ориентации плоско-выпуклой конической линзы (вершина конуса направлена в сторону оси вращения инструмента) величина отклонения ее боковой поверхности от прямолинейности h (стрелки прогиба) с исходного значения 15 мкм уменьши-

лась до 5 мкм за 14 мин обработки (кривая 1), а при наружной ориентации – за 36 мин (кривая 2). Следовательно, интенсивность съема припуска в первом случае более чем в два раза выше по сравнению со вторым.

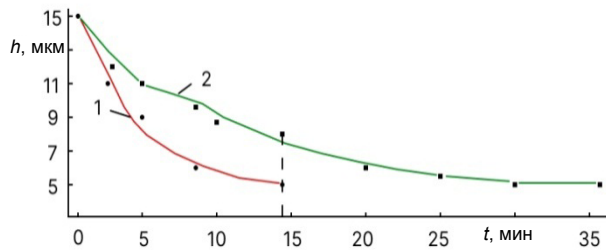


Рис. 2. Закономерность изменения стрелки прогиба h образующей конуса от времени обработки t при ее внутренней (1) и наружной (2) ориентациях

Fig. 2. Pattern of changes in the deflection arrow h of the cone generatrix depending on the processing time t for its internal (1) and external (2) orientations

Результаты экспериментальных исследований геометрической точности и скорости съема припуска при обработке боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз без выхода и с выходом их за край инструмента приведены на рис. 3. Они свидетельствуют о том, что при обработке без выхода за край инструмента зависимость $h(t)$, уменьшаясь, асимптотически приближается к горизонтальной прямой на уровне $h = 2$ мкм после 25 мин обработки, в то время как при обработке с выходом за край инструмента $h(t)$ асимптотически приближается к горизонтальной прямой на уровне $h = 3$ мкм после 35 мин обработки. И поскольку значение стрелки прогиба h (2 и 3 мкм) после отмеченных схем обработки отображает ее точность, а время обработки (25 и 35 мин) – производительность процесса, то это значит, что точность формообразования и его производительность в первом случае (без выхода за край инструмента) в среднем на 30 % выше по сравнению со вторым случаем.

Выполнена также обработка боковой поверхности плоско-выпуклой конической линзы без принудительного и с принудительным ее вращением. Получены следующие результаты: при обработке без принудительного вращения $h = (0,05–0,06)$ мкм, а с принудительным вращением $h = (0,03–0,04)$ мкм, т. е. в среднем в полтора раза точнее.

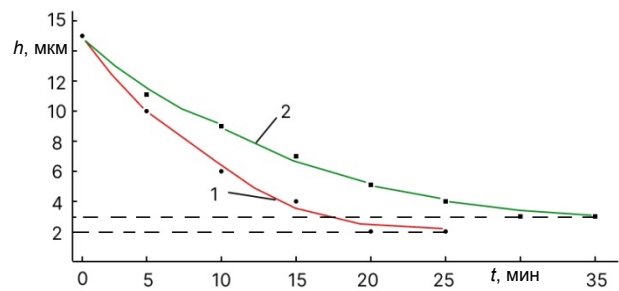


Рис. 3. Зависимость стрелки прогиба h от времени обработки t образующей конуса без выхода (1) и с выходом (2) детали за край обрабатываемой поверхности

Fig. 3. Dependence of the deflection arrow h on the processing time t of the cone generatrix without exit (1) and with exit (2) of the part beyond the edge of the processing surface

Если в процессе обработки исполнительных поверхностей плоско-выпуклых конических линз точность их геометрических параметров (отклонение основания конуса от плоскостности и его образующей от прямолинейности) выходила за пределы допуска, корректировали параметры режимов формообразования (величину частоты вращения инструмента $v_{и}$, заготовок плоско-выпуклых конических линз $v_{л}$ и кривошипа шарнирного четырехзвенника станка v_2 , отношение $v_6/v_{и}$, где v_6 – частота вращения блока заготовок рассматриваемых деталей, а также длину штриха L колебательного движения выходного звена базового станка). Величину корректировки этих параметров определяли по разработанной методике, а их исходные значения устанавливали с учетом рекомендуемых технологических режимов, приведенных в табл. 1 для случаев равномерного съема припуска с рабочей поверхности правильного и исполнительных поверхностей плоско-выпуклой конической линзы, и когда необходимо обеспечить более интенсивную обработку как в краевой, так и в центральной зонах правильного и основания конуса.

В частности, оптимальные режимы обработки в зависимости от макропогрешности (характера распределения припуска) на исходной поверхности правильного диаметром $d_{и} = 0,9d_{и}$ ($d_{и}$ – диаметр инструмента) и на основании заготовки конической линзы в блоке диаметром $d_6 = 0,8d_{и}$ следующие:

- общая «яма» на правильнике – частота вращения инструмента $v_{и} = \alpha_1 d_{и} (\alpha_1 = 0,074 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, частота вращения входного звена исполнитель-

ного механизма технологического оборудования $v_2 = \alpha_2 d_n (\alpha_2 = 0,004 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, амплитуда колебательного движений выходного звена исполнительного механизма технологического оборудования $L = 0,88 d_n$;

- общий «бугор» на правильнике: $v_n = \alpha_3 d_n (\alpha_3 = 0,012 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $v_2 = \alpha_4 d_n (\alpha_4 = 0,027 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $L = 0,64 d_n$;

- общая «яма» на основании конуса: $v_n = \alpha_5 d_n (\alpha_5 = 0,03 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $v_2 = \alpha_3 d_n$, $L = 0,67 d_n$;

- общий «бугор» на основании конуса: $v_n = \alpha_6 d_n (\alpha_6 = 0,025 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $v_2 = \alpha_7 d_n (\alpha_7 = 0,021 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $L = 0,595 d_n$.

Для равномерного срабатывания рабочей поверхности правильника и равномерного съема припуска с основания конуса следует назначать: $v_n = \alpha_8 d_n (\alpha_8 = 0,023 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $v_2 = \alpha_9 d_n (\alpha_9 = 0,013 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $L = 0,79 d_n$ и $v_n = \alpha_4 d_n$, $v_2 = \alpha_{10} d_n (\alpha_{10} = 0,017 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$, $L = 0,64 d_n$ соот-

ветственно, а для равномерного съема припуска с конической поверхности линзы: $v_6/v_n = \alpha_{11} d_6 (\alpha_{11} = 0,003 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$; $v_n = \alpha_{12} d_6 (\alpha_{12} = 0,399 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$; $v_2 = \alpha_{13} d_6 (\alpha_{13} = 0,022 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$; $v_n = \alpha_{14} d_6 (\alpha_{14} = 0,32 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$; $L = 0,205 d_6$.

Численные значения коэффициентов α_1 – α_{10} получены делением расчетных относительных путей трения в краевой зоне обрабатываемых поверхностей правильника и основания плоско-выпуклой конической линзы, приведенных соответственно в [10] и [11] для различных параметров режимов обработки, на диаметр инструмента, который использовался при проведении расчетов (в нашем случае 250 мм), а величина коэффициентов α_{11} – α_{14} – делением соответствующих расчетных относительных путей трения, изложенных в [8], на диаметр блока заготовок плоско-выпуклых конических линз (в нашем случае 200 мм).

Таблица 1

Рекомендуемые технологические режимы обработки рабочей поверхности правильника и исполнительных поверхностей плоско-выпуклой конической линзы
Recommended technological modes for processing the working surface of the straightener and the working surfaces of a flat-convex conical lens

Параметр режима обработки	Усиленный съем припуска		
	в краевой зоне	в центральной зоне	равномерный съем материала
	Правильник		
v_n	$\alpha_1 d_n (\alpha_1 = 0,074 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_3 d_n (\alpha_3 = 0,012 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_8 d_n (\alpha_8 = 0,023 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
v_2	$\alpha_2 d_n (\alpha_2 = 0,04 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_4 d_n (\alpha_4 = 0,027 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_9 d_n (\alpha_9 = 0,013 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
L	$0,88 d_n$	$0,64 d_n$	$0,79 d_n$
Основание конической линзы			
v_n	$\alpha_5 d_n (\alpha_5 = 0,03 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_6 d_n (\alpha_6 = 0,025 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_4 d_n$
v_2	$\alpha_3 d_n$	$\alpha_7 d_n (\alpha_7 = 0,021 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$	$\alpha_{10} d_n (\alpha_{10} = 0,017 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
L	$0,67 d_n$	$0,595 d_n$	$0,64 d_n$
Боковая поверхность конической линзы			
v_6/v_n			$\alpha_{11} d_6 (\alpha_{11} = 0,003 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
v_n			$\alpha_{12} d_6 (\alpha_{12} = 0,399 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
v_2			$\alpha_{13} d_6 (\alpha_{13} = 0,022 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
v_n			$\alpha_{14} d_6 (\alpha_{14} = 0,32 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1})$
L			$0,205 d_6$

Значения технологических режимов, изложенных в табл. 1, зависят от диаметра инструмента в виде диска (через коэффициенты $\alpha_1\text{--}\alpha_{14}$), величина которого, в свою очередь, определяется с учетом геометрических параметров обрабатываемой плоско-выпуклой конической линзы.

Аналитическая связь диаметра инструмента $d_{\text{и}}$ с геометрическими параметрами плоско-выпуклой конической линзы (с диаметром основания конуса $d_{\text{к}}$, его высотой h и углом при вершине конуса α) получена из анализа рис. 4, где коническая линза 1 расположена в отверстии 2 правильного 3.

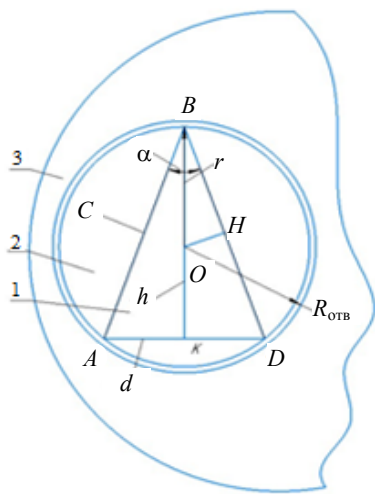


Рис. 4. Схема расположения плоско-выпуклой конической линзы в отверстии плавильника

Fig. 4. Layout of a flat-convex conical lens in the hole of the melter

Из рис. 4 следует, что радиус r окружности, описанной около треугольника ABD , отображающего геометрические параметры конической линзы, выражается соотношением

$$r = \frac{a}{\cos 0,5\alpha}, \quad (1)$$

где $a = \frac{c}{2}$, $c = \sqrt{\frac{d_{\text{к}}^2}{4} + h^2}$ – длина образующей конуса плоско-выпуклой конической линзы.

Для свободного расположения плоско-выпуклой конической линзы в отверстии 2 правильного 3 радиус этого отверстия должен быть больше радиуса r по меньшей мере на 3 мм, т. е. $R_{\text{отв}} = r + 3$. Следовательно, суммарная площадь трех отверстий правильного (общепринятая конструкция правильного) будет:

$$S_{\Sigma\text{отв}} = 3S_{\text{отв}} = 3\pi(r + 3)^2, \quad (2)$$

где

$$S_{\text{отв}} = \pi R_{\text{отв}}^2 = \pi(r + 3)^2.$$

И поскольку эта площадь не должна превышать 30 % от общей рабочей поверхности правильного, т. е.

$$S_{\text{пр}} = \frac{S_{\Sigma\text{отв}}}{0,3} = \pi R_{\text{пр}}^2, \quad (3)$$

радиус правильного равен

$$R_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{S_{\Sigma\text{отв}}}{0,3\pi}} = \sqrt{10(r + 3)^2}, \quad (4)$$

а его диаметр

$$d_{\text{пр}} = 2\sqrt{10(r + 3)^2}. \quad (5)$$

Одной из особенностей обработки в условиях свободного притирания является то, что нижнее звено (в нашем случае инструмент) должно быть больше верхнего (в нашем случае правильного) в $e = 1,1\text{--}1,2$ раза, т. е.

$$d_{\text{и}} = ed_{\text{пр}} = 2e\sqrt{10(r + 3)^2}. \quad (6)$$

Следовательно, окончательное выражение для определения диаметра инструмента запишется в виде:

$$d_{\text{и}} = 2e\sqrt{10\left(\frac{\sqrt{d_{\text{к}}^2 + 4h^2}}{4\cos 0,5\alpha} + 3\right)^2}. \quad (7)$$

ВЫВОДЫ

1. Использование разработанного устройства для обработки плоско-выпуклых конических линз позволяет стабилизировать плоскостность рабочей поверхности инструмента, что способствует повышению производительности процесса формообразования и уменьшению отклонения образующей конической поверхности деталей от прямолинейности, а также локальных погрешностей на их исполнительных поверхностях до уровней соответственно $\pm 0,12$ и $\pm 0,012$ мкм.

2. Предложенная методика определения размеров инструмента для обработки плоско-выпуклых конических линз позволяет установить

связь технологических режимов формообразования рассматриваемых деталей с их геометрическими параметрами (высотой конуса, диаметром его основания и углом при вершине).

3. Выполненные исследования влияния характера обработки боковой поверхности плоско-выпуклых конических линз на точность и производительность процесса показали, что точность формообразования и его производительность в случае обработки без выхода деталей за край инструмента в среднем на 30 % выше по сравнению с противоположной ситуацией, а обработка с принудительным относительным вращением блока деталей повышает их точность в среднем в полтора раза по сравнению с отсутствием такового, при этом внутренняя ориентация линз (вершина конуса направлена в сторону оси вращения инструмента) способствует повышению интенсивности съема припуска более чем в два раза по сравнению с наружной их ориентацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bessel-Like Beam Array Formation by Periodical Arrangement of the Polymeric Round-Tip Microstructures / E. Stankevicius [et al.] // *Opt. Express*. 2015. Vol. 23, No 22. P. 28557–28561. <https://doi.org/10.1364/oe.23.028557>.
2. Dudutis, J. / Non-Ideal Axicon-Generated Bessel Beam Application for Intra-Volume Glass Modification / J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis // *Opt. Express*. 2016. Vol. 24, No 25. C. 28433–28443. <https://doi.org/10.1364/oe.24.028433>.
3. Matsuoka, Y. The Characteristics of laser Micro Drilling using a Bessel Beam / Y. Matsuoka, Y. Kizuka, T. Inoue // *Appl. Phys., A Mater. Sci.* 2006. Vol. 84, No 4. P. 423–426. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3629-6>.
4. Millijoule Femtosecond Micro-Bessel Beams for Ultra-High Aspect Ratio Machining / S. Mitra [et al.] // *Appl. Optics*. 2015. Vol. 54, No 24. P. 7358–7363. <https://doi.org/10.1364/ao.54.007358>.
5. High 90% efficiency Bragg Gratings Formed in Fused Silica by Femtosecond Gauss-Bessel Laser Beams / M. Mikutis [et al.] // *Opt. Mater. Express*. 2013. Vol. 3, No 11. P. 1865–1867. <https://doi.org/10.1364/ome.3.001862>.
6. High Aspect Ratio Taper-Free Microchannel Fabrication Using Femtosecond Bessel Beams / M. K. Bhuyan [et al.] // *Opt. Express*. 2010. Vol. 18, No 2. P. 566–571. <https://doi.org/10.1364/oe.18.000566>.
7. Марченко, И. А. Способ обработки конической поверхности детали: пат. 2071395 РФ, МПК В 23С 3/04 / И. А. Марченко, Ю. Н. Зорин, В. В. Щенев. Опубл. 10.01.1997.
8. Моделирование закономерностей формообразования конических поверхностей / А. С. Козерук [и др.] // *Вестці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук*. 2021. Т. 66, № 4. С. 430–439. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-430-439>.
9. Козерук, А. С. Технология оптического приборостроения / А. С. Козерук. Минск: БНТУ, 2016. С. 88–94.
10. Технологические особенности формообразования плоского инструмента для обработки аксиконов / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 297–304. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-297-304>.
11. Технологические особенности процесса обработки конических линз. / М. И. Филонова [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 6. С. 521–527. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-521-527>.

Поступила 16.11.2023

Подписана к печати 23.01.2024

Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. Stankevicius E., Garliauskas M., Gedvilas M., Račiukaitis G. (2015) Bessel-Like Beam Array Formation by Periodical Arrangement of the Polymeric Round-Tip Microstructures. *Optics Express*, 23 (22), 28557–28561. <https://doi.org/10.1364/oe.23.028557>.
2. Dudutis J., Gečys P., Račiukaitis G. (2016) Non-Ideal Axicon-Generated Bessel Beam Application for Intra-Volume Glass Modification. *Optics Express*, 24 (25), 28433–28443. <https://doi.org/10.1364/oe.24.028433>.
3. Matsuoka Y., Kizuka Y., Inoue T. (2006) The Characteristics of Laser Micro Drilling using a Bessel Beam. *Applied Physics A*, 84 (4), 423–426. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3629-6>.
4. Mitra S., Chanal M., Clady R., Mouskeftaras A., Grojo D. (2015) Millijoule Femtosecond Micro-Bessel Beams for Ultra-High Aspect Ratio Machining. *Applied Optics*, 54 (24), 7358–7363. <https://doi.org/10.1364/ao.54.007358>.
5. Mikutis M., Kudrius T., Šlekys G., Paipulas D., Juodkazis S. (2013) High 90% Efficiency Bragg Gratings Formed in Fused Silica by Femtosecond Gauss-Bessel Laser Beams. *Optical Materials Express*, 3 (11), 1865–1867. <https://doi.org/10.1364/ome.3.001862>.
6. Bhuyan M. K., Courvoisier F., Lacourt P.-A., Jacquot M., Furfaro L., Withford M. J., Dudley J. M. (2010) High Aspect Ratio Taper-Free Microchannel Fabrication Using Femtosecond Bessel Beams. *Optics Express*, 18 (2), 566–571. <https://doi.org/10.1364/oe.18.000566>.
7. Marchenko I. A., Zorin Yu. N., Shchenev V. V. (1997) *Method for Processing the Conical Surface of a Part*. Patent 2071395 Russian Federation (in Russian).
8. Kozeruk A. S., Sukhotsky A. A., Diaz González R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Ali-zade E. R. (2021) Modeling of Formation Regularities of Conical Surfaces. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 66 (4), 430–439. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-430-439> (in Russian).
9. Kozeruk A. S. (2016) *Optical Instrumentation Technology*. Minsk, Belarusian National Technical University, 88–94 (in Russian).
10. Kozeruk A. S., Dias Gonzalez R. O., Sukhotzkiy A. A., Filonova M. I., Kuznechik V. O. (2020) Technological Features of Forming Flat Tool for Processing Axicons. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 19 (4), 297–304. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-297-304> (in Russian).
11. Filonova M. I., Dias Gonzalez R. O., Sukhotzkiy A. A., Kozeruk A. S., Semchuonok A. V. (2020) Technological Features in Processing of Conical Lenses. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 19 (6), 521–527. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-521-527> (in Russian).

Received: 16.11.2023

Accepted: 23.01.2024

Published online: 29.03.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-121-127>

УДК 693.98

Возведение фасадов кирпичных зданий из утепленных кирпичных панелей (простенков) заводского изготовления

Канд. техн. наук, доц. Н. В. Черноиван¹⁾

¹⁾Брестский государственный технический университет (Брест, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Высокая трудоемкость возведения утепленных кирпичных стен привела к существенному сокращению потребления кирпича в Республике Беларусь. Учитывая, что в каждой области работает как минимум по одному кирпичному заводу, оснастному современным технологическим оборудованием, а запасы минерального сырья (песок, глина) для изготовления кирпича практически неисчерпаемы, разработка эффективного конструктивно-технологического решения утепленной кирпичной кладки является актуальной задачей. Как показывает практика, сегодня в основном возводимые кирпичные здания малоэтажные (3–5 этажей) – это общеобразовательные школы, детские садики, поликлиники, здания бытового назначения (прачечные, химчистки и др.), а также административные здания. Поэтажная планировка помещений этих зданий, как правило, кабинетная (количество оконных проемов – существенное). В связи с этим предлагается для снижения трудоемкости возведения фасадов таких зданий применять утепленные кирпичные панели (простенки) заводского изготовления. Отличительной особенностью предлагаемого решения утепленной кирпичной кладки от массово применяемых является то, что для повышения эксплуатационной эффективности она выполняется из двух отдельных конструктивных элементов: несущего и теплоизоляционно-декоративного. В статье подробно изложены организация и технология производства работ по изготовлению основных конструктивных элементов кирпичных утепленных фасадных панелей (простенков) в заводских условиях. Предлагаемое конструктивное решение фасада кирпичных зданий с кабинетной планировкой позволяет ручной технологический процесс возведения таких зданий перевести в механизированный – монтаж кирпичных утепленных панелей (простенков) заводского изготовления, что обеспечит существенное снижение трудоемкости возведения утепленных кирпичных стен. Разбивка возводимых зданий на ярусы, высота которых увязана с номенклатурой технологических операций и применяемыми строительными материалами, позволяет исключить из производства работ использование средств подмащивания (подмости), а также доставку на рабочее место каменщика поддонов с кирпичом и растворных ящиков.

Ключевые слова: утепленные кирпичные панели заводского изготовления, легкая штукатурная система, штифтовое соединение

Для цитирования: Черноиван, Н. В. Возведение фасадов кирпичных зданий из утепленных кирпичных панелей (простенков) заводского изготовления / Н. В. Черноиван // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 2. С. 121–127. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-121-127>

Construction of Facades of Brick Buildings from Prefabricated Insulated Brick Panels (Piers) of Factory Manufacture

N. V. Chernoiivan¹⁾

¹⁾Brest State Technical University (Brest, Republic of Belarus)

Abstract. The high labor intensity of constructing insulated brick walls has led to a significant reduction in brick consumption in the Republic of Belarus. Considering that in each region there is at least one brick factory equipped with modern

Адрес для переписки

Черноиван Николай Вячеславович
Брестский государственный технический университет
ул. Московская, д. 267,
224017, г. Брест, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 726-74-56
chernoiivan@inbox.ru

Address for correspondence

Chernoiivan Nikolai V.
Brest State Technical University
267 Moskovskaya str.,
224017, Brest, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 726-74-56
chernoiivan@inbox.ru

technological equipment, and the reserves of mineral raw materials (sand, clay) for making bricks are practically inexhaustible, the development of an effective structural and technological solution for insulated brickwork is an urgent task. As practice shows, today the majority of brick buildings being erected are low-rise (3-5 floors) – these are secondary schools, kindergartens, clinics, buildings for household purposes (laundries, dry cleaners, etc.), as well as administrative buildings. The floor layout of the premises of these buildings is, as a rule, cabinet (the number of window openings is significant). In this regard, it is proposed to use factory-made insulated brick panels (piers) to reduce the labor intensity of constructing the facades of such buildings. A distinctive feature of the proposed solution for insulated brickwork from those commonly used is that, to increase operational efficiency, it is made of two separate structural elements: load-bearing and heat-insulating and decorative. The paper describes in detail the organization and technology of work on the production of the main structural elements of brick insulated facade panels (piers) in factory conditions. The proposed design solution for the facade of brick buildings with a cabinet layout allows the manual technological process of constructing such buildings to be converted into a mechanized one – installation of factory-made insulated brick panels (piers), which will significantly reduce the labor intensity of constructing insulated brick walls. The division of buildings under construction into tiers, the height of which is linked to the range of technological operations and the building materials used, makes it possible to exclude from the work the use of lifting equipment (scaffolding), as well as the delivery of pallets with bricks and mortar boxes to the bricklayer's workplace.

Keywords: factory-made insulated brick panels, light plaster system, pin connection

For citation: Chernoiivan N. V. (2024) Construction of Facades of Brick Buildings from Prefabricated Insulated Brick Panels (Piers) of Factory Manufacture. *Science and Technique*. 23 (2), 121–127. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-121-127> (in Russian)

Введение

Применяемая сегодня технология возведения кирпичных зданий является трудоемким, практически полностью немеханизированным технологическим процессом. Выполнение внутренних отделочных работ (оштукатуривание кирпичных стен) также достаточно трудоемкий технологический процесс, качественное выполнение которого возможно только при поддержании положительных температур в помещениях (в зимний период необходимо отопление помещений), что требует дополнительных финансовых расходов на отопление. Несмотря на практически неисчерпаемую сырьевую базу для выпуска кирпича, наличие в каждой области Республики Беларусь кирпичных заводов, оснащенных современным технологическим оборудованием, все вышеизложенные причины привели к существенному снижению объемов строительства кирпичных жилых зданий.

Анализ типовых проектов, по которым в Республике Беларусь продолжается массовое строительство кирпичных зданий, показал, что это общеобразовательные школы, детские садики, поликлиники, здания бытового назначения (прачечные, химчистки и др.), а также административные здания. Учитывая, что эти здания малоэтажные (3–5 этажей) и, как правило, строятся в стесненных условиях (жилая застройка микрорайона практически завершена) возведение их из монолитных или сборных железобетонных конструкций требует дополни-

тельных финансовых затрат на организацию поддержания комфортных условий проживания жителей домов, расположенных в зоне строительства объекта.

Позэтажная планировка помещений школ, детских садиков, поликлиник, как правило, кабинетная (количество оконных проемов – существенное), в связи с этим предлагается для снижения трудоемкости возведения фасадов таких кирпичных зданий перейти к применению утепленных кирпичных панелей (простенков) заводского изготовления. Такое конструктивное решение позволяет технологический процесс возведения фасадов кирпичных зданий перевести в механизированный – монтаж кирпичных утепленных панелей (простенков) заводского изготовления.

Применение предлагаемого конструктивно-технологического решения позволит за счет организации на территории кирпичных заводов цехов по производству утепленных кирпичных панелей (простенков) создать новые рабочие места (в том числе и для женщин).

Разработка конструктивно-технологического решения утепленных фасадных кирпичных панелей (простенков)

Основным недостатком массово применяемой технологии возведения утепленных кирпичных стен является высокая трудоемкость производства работ. Анализ структуры техно-

логического процесса кирпичной кладки позволяет сделать следующие выводы [1].

Большая номенклатура и объем полумеханизированных подготовительных процессов (установка и перестановка подмостей; подача и складирование кирпича на рабочем месте, подготовка кладочного раствора и пр.) оказывают существенное влияние на увеличение трудоемкости выполнения кладки. На производительность труда каменщиков и качество выполнения работ при возведении утепленной кирпичной кладки также существенное влияние оказывают климатические условия и квалификация каменщиков.

Для минимизации всех вышеприведенных основных недостатков существующей технологии возведения утепленных кирпичных стен предлагается фасады зданий с кабинетной поэтажной планировкой (общеобразовательные школы, детские садики, поликлиники и др.) возводить из утепленных фасадных кирпичных блоков (прстенков) заводского изготовления.

Следует отметить, что в конце 80-х гг. прошлого века по разработкам ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко в г. Москве было построено большое количество пятиэтажных общежитий из неутепленных кирпичных блоков заводского изготовления, которые эксплуатируются и в настоящее время.

Учитывая, что сегодня в Республике Беларусь уделяется большое внимание энергосбережению при эксплуатации зданий, предлагается следующая конструкция утепленной фасадной кирпичной панели заводского изготовления. Для повышения эксплуатационной эффективности утепленная фасадная кирпичная панель (прстенок) выполняется из двух конструктивных элементов: несущего и теплоизоляционно-декоративного (рис. 1).

Несущий элемент это – кирпичная кладка из полнотелого керамического кирпича на цементном растворе. Его термическое сопротивление теплопередаче в теплотехнических расчетах не учитывается. Расчеты, выполненные с учетом [2], показали, что для кирпичных зданий высотой пять этажей и менее толщина несущих стен 250 мм является достаточной при условии, что кладка выполнена из полнотелого керамического кирпича марки не менее М100 на цементном растворе марки не ниже М50. Предлагаемая конструкция несущего элемента позволяет за счет уменьшения толщины кладки

несущих стен зданий высотой пять этажей и менее, принятой в типовых проектах, почти в два раза уменьшить расход материалов (кирпич, кладочный раствор) на 1 м³ кладки, а также существенно снизить нагрузку на фундаменты. Для закрепления (навески) на несущий элемент теплоизоляционно-декоративного слоя (облицовочной стеновой панели) одновременно с выполнением кладки в горизонтальные швы устанавливаются стеклопластиковые анкеры-кронштейны диаметром 8 мм (рис. 1). Количество (шаг расстановки) стеклопластиковых анкеров-кронштейнов определяется расчетом.

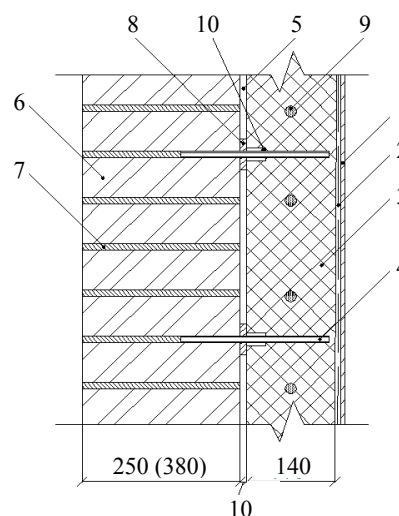


Рис. 1. Конструктивное решение утепленной кирпичной панели: 1 – декоративно-защитный слой; 2 – армирующий слой (ССШ-160); 3 – плитный утеплитель; 4 – стеклопластиковый анкер-кронштейн; 5 – воздушная прослойка; 6 – кирпичная кладка (несущая конструкция); 7 – шов кладки (цементно-песчаный раствор); 8 – фиксатор; 9 – соединительные штифты; 10 – втулка

Fig. 1. Constructive solution for insulated brick panel: 1 – decorative and protective layer; 2 – reinforcing layer (SSSh-160); 3 – plate insulation; 4 – fiberglass anchor bracket; 5 – air layer; 6 – brickwork (load-bearing structure); 7 – masonry seam (cement-sand mortar); 8 – fixator; 9 – connecting pins; 10 – bushing

Теплоизоляционная облицовочная стеновая панель предназначена для обеспечения требуемого сопротивления теплопередаче кладки, а также защиты кирпичной кладки несущего элемента от атмосферных воздействий [3]. Теплоизоляционная облицовочная панель представляет собой конструктивный элемент заводского изготовления. В качестве утеплителя в ней рекомендуется применять теплоизоляционные материалы заводского изготовления – плиты пенополистирольные или минераловатные.

Для снижения транспортных расходов рекомендуется утепленные кирпичные панели изготавливать в специализированных цехах, расположенных на территории действующих кирпичных заводов.

Геометрические размеры (длина и ширина) утепленных фасадных кирпичных панелей (простенков) рекомендуется принимать, руководствуясь следующим:

- архитектурным решением фасадов и поэтажной планировкой здания (геометрические размеры и размещение оконных и дверных проемов, высота этажа);

- техническими характеристиками грузозахватных приспособлений (захватов, строп и т.д.), имеющимися в строительной организации.

Для снижения трудоемкости возведения кирпичных зданий с использованием утепленных кирпичных простенков оштукатуривание внутренних поверхностей несущего элемента выполняется в цеху.

Отделкой наружной поверхности кирпичной кладки блоков служит теплоизоляционная облицовочная стеновая плита (рис. 2), которая изготавливается в специализированном цеху.

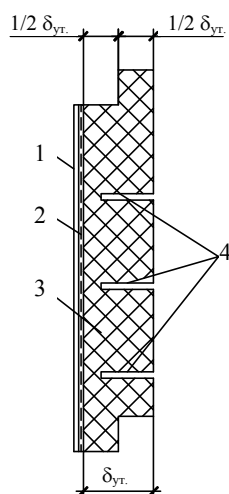


Рис. 2. Теплоизоляционная облицовочная стеновая панель: 1 – декоративно-защитный слой (включает штукатурку и окраску); 2 – армирующий слой (ССШ-160); 3 – теплоизоляция из плитного утеплителя; 4 – пазы для установки стеклопластиковых анкеров-кронштейнов

Fig. 2. Thermal insulation facing wall panel: 1 – decorative and protective layer (includes plaster and paint); 2 – reinforcing layer (SSSh-160); 3 – thermal insulation from plate insulation; 4 – grooves for installing fiberglass anchors-brackets

Крепление ее к кирпичной кладке осуществляется приклеиванием клеевыми полимерными составами ilmax thermofix, ilmax КС-1зима [4].

Для обеспечения надежного крепления теплоизоляционной облицовочной стеновой панели с кирпичной кладкой простенка предусмотрены стеклопластиковые анкеры-кронштейны (поз. 4, рис. 1), которые устанавливаются в кирпичной кладке в процессе ее возведения.

Технология производства работ по изготовлению кирпичных утепленных фасадных панелей (простенков)

Исходя из конструктивного решения кирпичных утепленных фасадных панелей (простенков) заводского изготовления, предлагается следующая последовательность производства работ.

Учитывая, что фасадная панель состоит из двух различных конструктивных элементов – несущего (кирпичная кладка) и теплоизоляционно-декоративного (теплоизоляционная облицовочная стеновая панель), – рекомендуется для обеспечения требуемого качества выпускаемой продукции организационно производство работ разделить на три отдельных технологических потока. Анализ комплекса технологических операций, которые необходимо выполнить для изготовления кирпичных утепленных фасадных панелей и конструктивных элементов, из которых они состоят, позволяет рекомендовать следующую структуру организации специализированных технологических потоков. Необходимо отметить, что строительные работы во всех специализированных технологических потоках выполняются параллельно (независимо друг от друга) каждый в своем цеху (участке).

Первый технологический поток включает: изготовление несущего конструктивного элемента (кирпичная кладка) и оштукатуривание внутренних поверхностей кирпичной кладки. Работы по изготовлению несущего элемента выполняются в специализированном цеху, который состоит из двух технологических участков.

На первом участке выполняется кирпичная кладка простенков с одновременной установ-

кой в горизонтальные швы кладки стеклопластиковых анкеров-кронштейнов диаметром 8 мм. Количество и шаг расстановки анкеров по вертикали и горизонтали для каждого типа (геометрических размеров) блоков принимается по проекту. Для снижения трудоемкости подготовительных операций каждое рабочее место каменщика оборудовано стационарными средствами подмащивания (подмостями), которые позволяют регулировать высоту яруса.

По завершении работ по кирпичной кладке готовый несущий элемент с помощью траверсы и грузовой тали перемещают на участок в цеху, где выполняется оштукатуривание внутренних поверхностей кирпичного простенка.

Второй технологический поток включает изготовление теплоизоляционной облицовочной стеновой панели и устройство декоративно-защитного и окрасочного слоев на наружной поверхности панели. Эти технологические операции выполняются в специализированном цеху, который состоит из двух технологических участков.

На первом участке непосредственно изготавливают теплоизоляционную облицовочную стеновую панель.

Сегодня для тепловой изоляции наружных стен массово выпускаются плиты размерами 500×1000 или 600×1200 мм. В связи с этим для производства теплоизоляционных облицовочных панелей требуемой номенклатуры (геометрических размеров) необходимо осуществить соединение (стык) заготовок из плит заводского изготовления. Выполненные исследования и лабораторные испытания позволяют рекомендовать для соединения плитных теплоизоляционных материалов стык на деревянных штифтах диаметром 10 мм, рекомендуемый шаг установки штифтов – 75 мм [5–7].

Рекомендуется следующая технологическая последовательность изготовления теплоизоляционных облицовочных панелей.

На первом этапе согласно проектной документации из теплоизоляционных плит заводского изготовления нарезаются заготовки. Затем на торцевых поверхностях заготовок с помощью ручной электродрели сверлом диаметром 6 мм просверливают отверстия глуби-

ной 20 + 5 мм. Установка штифтов в отверстия выполняется с помощью киянка без использования клея. После установки штифтов в проектное положение производится герметизация стыка с использованием нейтрального силиконового герметика Soudal. Жесткость (в плоскости и из плоскости) изготовленной теплоизоляционной плиты обеспечивается за счет наклеивания на стыки с помощью клеевого полимерного состава КС-1 двусторонних полосок из армирующего материала (стеклосетка марки ССШ-160) шириной 200 мм.

После завершения работ по изготовлению теплоизоляционной облицовочной стеновой панели ее перемещают на специализированный участок, где выполняют декоративно-защитное покрытие и наносят окрасочные слои на наружную поверхность. Технологическая последовательность этой операции аналогична устройству легкой штукатурной системы [4].

Третий технологический поток заключительный, он включает закрепление теплоизоляционной облицовочной панели к кирпичной кладке несущего элемента и подготовку готовой конструкции к транспортированию на объект.

Для повышения адгезии между поверхностью основания (кирпичная кладка) и теплоизоляционной облицовочной панелью, снижения водопоглощения материала основания (кирпича) наружную поверхность кирпичного простенка перед приклеиванием обрабатывают грунтовкой. Для грунтования поверхности кирпичной кладки рекомендуется применять грунт укрепляющий ilmax 4120. Грунтовку наносят валиком или кистью сплошным слоем по всей поверхности без пропусков и разрывов. Грунтование необходимо производить в два слоя. Время высыхания грунтовки 100–120 мин в зависимости от микроклимата в цеху и структуры основания.

Запыление и загрязнение огрунтованной поверхности не допускается.

Крепление теплоизоляционных облицовочных стеновых панелей к кирпичной кладке осуществляется на клею. Для приклеивания теплоизоляционной облицовочной панели при температуре воздуха в цеху от –5 до +15 °С

применяются составы клеевые полимерные ilmax thermofix, ilmax KC-1зима.

Приготовление клеящих составов следует начинать приблизительно за 30 мин до начала выполнения работ.

Учитывая, что кирпичные панели (простенки) изготавливаются в цеху, поверхности кирпичной кладки не будут иметь существенных неровностей. В связи с этим рекомендуется наклеить теплоизоляционных облицовочных стеновых панелей методом зубчатого основания (сплошного приклеивания). В этом случае клеящий состав наносится полосами по всей внутренней поверхности облицовочной панели слоем толщиной 3 мм и разравнивается при помощи зубчатого шпателя.

При приклеивании теплоизоляционных облицовочных стеновых панелей рекомендуется придерживаться такой последовательности.

Подготовленную к приклеиванию панель (нанесен клеящий состав, просверлены отверстия под стеклопластиковые анкеры-кронштейны) располагают в нескольких сантиметрах от поверхности кирпичной кладки простенка, совмещают отверстия в панели с выпусками стеклопластиковых анкеров-кронштейнов кладки. Затем, используя полутерок (правило), панель плотно прижимают к кладке.

Если клеящий состав выдавился из-под панели и попал на торцевую грань кирпичного простенка, его следует удалить. Площадь клеевого соединения должна быть не менее 40 % от площади приклеиваемой панели.

Все работы выполняются в специально оборудованном помещении (цеху).

Рекомендуемая технология возведения зданий из кирпичных утепленных фасадных панелей (простенков)

Изготовленные в цеху на территории кирпичного завода кирпичные утепленные фасадные панели (простенки) автотранспортом доставляются на строительную площадку. Целесообразно, чтобы исключить дополнительные погрузочно-разгрузочные операции и складирование простенков на открытом приобъектном складе, монтаж простенков вести «с колес» следующим образом.

На первом этапе бригада каменщиков отдельным технологическим потоком выполняет кирпичную кладку стен первого этажа строящегося здания. Кладка ведется от обреза фундамента до отметки низа оконных проемов. По завершении работ по кирпичной кладке с помощью геодезических инструментов выполняют выносу проемов на фасаде и закрепляют их местоположение краской.

Затем с помощью автомобильного строительного крана, используя вакуумный захват типа ARLIFTER-F/R-1500, производят монтаж кирпичных утепленных фасадных панелей (простенков). Учитывая небольшие объемы работ, горизонтальные швы между монтируемыми простенками и ранее возведенной кирпичной кладкой, а также по высоте фасадных панелей рекомендуется выполнять на полиуретановой клеевой композиции.

ВЫВОДЫ

1. По результатам выполненных исследований предложено эффективное конструктивно-технологическое решение возведения фасадов кирпичных зданий из утепленных кирпичных панелей (простенков) заводского изготовления.

2. Внедрение предлагаемой разработки в практику строительства позволит:

- существенно снизить трудоемкость и повысить качество работ при возведении зданий школ, дошкольных учреждений, поликлиник и других объектов, возводимых из кирпича;
- перевести технологический процесс возведения утепленной кирпичной кладки из ручного в полумеханизированный.

ЛИТЕРАТУРА

1. К оценке эксплуатационной эффективности многослойной кирпичной кладки несущих стен с плитным утеплителем / В. Н. Черноиван [и др.] // Строительная наука и техника. 2013. № 2. С. 27–31.
2. Каменные и армокаменные конструкции: СП 5.02.01–2021. Введ. 10.06.21. Минск: Минстройархитектуры, 2021. 123 с.
3. Теплоизоляционная облицовочная стеновая панель: пат. № 8892 Респ. Беларусь, МПК (2012) Е 04В 1/76 / В. Н. Черноиван, В. Г. Новосельцев, Н. В. Черноиван. Опубл. 30.12.2012.

4. Технологическая карта на устройство легкой штукатурной системы «Илмакс»: ТК 100289293.1211–2020. Введ. 03.08.2020. Минск: ОАО «Стройкомплекс». 2020. 174 с.
5. Черноиван, В. Н. Тепловая реабилитация фасадов эксплуатируемых панельных зданий / В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 6. С. 511–516. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-511-516>.
6. Деревягин, В. С. Безметалльные составные балки и метало-деревянные сборные фермы / В. С. Деревягин. М.: Стройиздат, 1947. 80 с.
7. Разработка научно обоснованных принципов осуществления тепловой реабилитации ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий на основе термического экрана: отчет о НИР, № ГР 20063374 (пром.) / БрГТУ; рук. В. Н. Черноиван. Брест, 2007. 32 с.
8. Композиционные материалы: в 8 т. / редкол.: Л. Браутман [и др.]. М.: Машиностроение, 1978. Т. 8: Анализ и проектирование конструкций / Л. Браутман, Р. Крок, К. Чамис. 1978. 264 с.
9. Бартенев, Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Бартенев. М.: Наука, 1984. 279 с.
10. Леонович, С. Н. Технология реконструкции зданий и сооружений / С. Н. Леонович, В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван. М.: Инфра-М, 2023. 521 с.
11. Оценка влияния материала теплоизоляционного слоя на эксплуатационные характеристики утепленной кирпичной кладки / В. Н. Черноиван [и др.] // Вестник Полотского государственного университета. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. 2021. № 16. С. 112–116.
2. SP [Building Regulations] 5.02.01–2021. *Stone and Reinforced Stone Structures*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2021. 123 (in Russian).
3. Chernoiivan V. N., Novoseltsev V. G., Chernoiivan N. V. (2012) *Thermal Insulation Cladding Wall Panel*: Patent No 8892 Republic of Belarus (in Russian).
4. TK [Flowchart] 100289293.1211–2020. Technological Map for the Installation of the Light Plaster System “Ilmax”. Minsk, Stroikompleks, 2020. 174 (in Russian).
5. Chernoiivan V. N., Chernoiivan N. V. (2022) Thermal Rehabilitation of Facades of Operated Panel Buildings. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (6), 511–516. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-511-516> (in Russian).
6. Derevyagin V. S. (1947) *Metal-Free Composite Beams and Metal-Wood Prefabricated Trusses*. Moscow, Stroizdat Publ. 80 (in Russian).
7. Chernoiivan V. N. (Supervisor) (2007) *Development of Scientifically-Based Principles for the Implementation of Thermal Rehabilitation of Enclosing Structures of Buildings in Use Based on Thermal Screen*. Research Report, No. State Registration 20063374 (Industry). Brest, Brest State Technical University. 32 (in Russian).
8. Brautman L., Krok R., Chamis K. (1978) *Composite Materials. Vol. 8: Analysis and Structural Design*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 264 (in Russian).
9. Bartenev G. M. (1984) *Strength and Mechanism of Polymer Destruction*. Moscow, Nauka Publ. 279 (in Russian).
10. Leonovich S. N., Chernoiivan V. N., Chernoiivan N. V. (2023) *Building Reconstruction Technology and Structures*. Moscow, Infra-M Publ. 521 (in Russian).
11. Chernoiivan V. N., Novoseltsev V. G., Chernoiivan N. V., Torkhova A. V. (2021) Assessment of the Influence of the Heat- Insulating Layer Material on the Performance Characteristics of Insulated Brickwork. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye Nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, 16, 112–116 (in Russian).

Поступила 06.10.2023

Подписана к печати 14.12.2023

Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. Chernoiivan V. N., Novoseltsev V. G., Chernoiivan N. V., Kovenko Yu. G., Matvienko E. V. (2013) To Assessment of Operational Efficiency of Multilayer Brick Masonry of Bearing Walls with Slab Insulation. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (2), 27–31 (in Russian).

Received: 06.10.2023

Accepted: 14.12.2023

Published online: 29.03.2024

Исследование влияния номенклатуры изделий на показатели производственной мощности предприятий индустриального домостроения

Магистр техн. наук В. Ю. Гуринович¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В статье представлены результаты исследований влияния параметров номенклатуры изделий на показатели освоения проектных мощностей предприятий индустриального домостроения. В качестве анализируемых параметров номенклатуры изделий приняты их количество и бетоноемкость в пересчете на 1 м² общей площади, а также тиражность изделий. Отмечается, что расчеты производственной мощности и основных технико-экономических показателей производства на стадии технологического проектирования базируются на номенклатуре изделий типовой блок-секции серии дома. При этом архитектурная индивидуальность, гибкость планировочных и конструктивных решений жилых зданий в индустриальном исполнении требуют разнообразия модификаций блок-секций, что неразрывно связано с ростом номенклатуры выпускаемых изделий. Расширение номенклатуры изделий для модификаций блок-секций в производственной программе предприятий является объективной закономерностью, которую необходимо учитывать при технологическом проектировании новых или реконструкции действующих предприятий, планировании производственных программ строительства жилья. Зафиксированы значительные колебания параметров номенклатуры изделий в производственных программах предприятий индустриального домостроения. Выполнен регрессионный анализ параметров номенклатуры изделий производственных программ предприятий индустриального домостроения. Установлена зависимость номенклатуры изделий от доли точечных домов в программах строительства жилья. Выделены основные параметры домов, определяющие колебания номенклатуры изделий, к которым относят этажность и количество секций в комплектации дома. Принимая во внимание факт существенного влияния номенклатуры изделий на производственную мощность предприятий, установлена зависимость показателя соответствия бетоноемкости изделий 1 м² общей площади на показатели производственной мощности. Достоверность полученных математических моделей подтверждена результатами статистической обработки результатов исследований и верификацией моделей в расчетах действующей производственной мощности предприятий.

Ключевые слова: индустриальное строительство, производство сборных железобетонных конструкций, производственная мощность, предприятия индустриального домостроения, номенклатура изделий

Для цитирования: Гуринович, В. Ю. Исследование влияния номенклатуры изделий на показатели производственной мощности предприятий индустриального домостроения / В. Ю. Гуринович // *Наука и техника*. 2023. Т. 23, № 2. С. 128–139. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-128-139>

Study of Influence of Product Range on Production Capacity Indicators of Precast Construction Plants

V. Yu. Gurinovich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the results of research of the influence of product range parameters on the indicators of development of the design capacities of precast construction plants. The quantity and concrete consumption of products in terms

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

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

of 1 m² of total area, as well as the circulation of products, have been taken as the analyzed parameters of product range. It is noted that calculations of production capacity and basic technical and economic indicators of production at the stage of technological design are based on the product range of a typical block section of a house series. At the same time, architectural individuality, flexibility of planning and design solutions of prefabricated houses buildings in industrial design require a variety of modifications of block sections, which is inextricably linked with the growth of the range of manufactured products. Expansion of the range of products for modifications of block sections in the production program of plants is an objective regularity that should be taken into account in the technological design of new or reconstruction of existing precast constructions plants and planning production programs for housing construction. Significant fluctuations in the parameters of the product range in the production programs of plants have been recorded. A regression analysis of the parameters of the range products of production programs of precast construction plants has been carried out. The dependence of product range on the share of dotted houses in housing construction programs has been established. The main parameters of houses determining fluctuations in the range of products have been identified, which include the number of storeys and the number of sections in the house configuration. Taking into account the fact of the significant influence of the product range on the production capacity of plants, the dependence of the indicator of compliance of the concrete capacity of products with 1 m² of total area on the production capacity indicators has been established. The reliability of the obtained mathematical models is confirmed by the results of statistical processing of research results and verification of models in calculations of the current production capacity of plants.

Keywords: prefabricated construction, precast reinforced concrete structures, production capacity, precast construction plants, product range

For citation: Gurinovich V. Yu. (2024) Study of Influence of Product Range on Production Capacity Indicators of Precast Construction Plants. *Science and Technique*. 23 (2), 128–139. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-128-139> (in Russian)

Введение

Индустриальное домостроение – одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений исследований в области строительства и строительных технологий. Это утверждение в полной мере подтверждается ростом публикационной активности и основных показателей, характеризующих научный уровень, актуальность, авторитетность и вовлеченность в исследования в данной предметной области [1]. В [2, 3] установлено, что основным направлением повышения эффективности индустриального домостроения является разработка организационно-технологических решений управления производством с учетом индивидуальных особенностей предприятий, а одним из сдерживающих факторов интенсивного развития – полная зависимость темпов строительства от производительности и эффективности организации производства. На основании анализа работ [4–7] можно утверждать, что недостаточный уровень организации производства и учет факторов, оказывающих влияние на технико-экономические показатели производства, являются основными узкими местами индустриального домостроения, риском срыва графиков производства строительно-монтажных работ, увеличения нормативных сроков и стоимости строительства по причине нарушения поставок сборных железобетонных изделий. Практика показывает, что все сказанное не способствует реализации основных преимуществ индустри-

ального домостроения перед другими методами строительства в части сокращения стоимости и сроков строительства.

С учетом актуальности приведенных фактов для отечественной практики индустриального домостроения требуется активизация исследований в данных направлениях. Теоретический анализ литературы позволил выделить основные факторы, влияющие на эффективность производства. Так, в [8–11] определено влияние на производительность технологических линий раскладки изделий и загрузки форм. В [4] установлена зависимость эффективности производства от способа управления производством. Влияние сложности изделий на общую продолжительность работ установлено в работе [5]. В [12] приведены исследования влияния на эффективность производства выпуска разнотипной продукции на технологической линии и приведены рекомендации ориентации производственных линий на выпуск однотипных изделий. Однако исследования в анализируемых публикациях направлены, прежде всего, на решение последствий, а не на установление причин недоосвоения производственных мощностей предприятий.

В [13] установлены факты снижения проектных производственных мощностей предприятий. В качестве одной из основных причин определено расширение номенклатуры изделий в объеме комплектации домов типовых серий. Известно, что номенклатура изделий находится в прямой зависимости от архитектурной инди-

видуальности и гибкости конструктивно-планировочных решений зданий, в том числе доли индивидуальных жилых домов коттеджного типа в производственной программе строительства жилья, и как важный экономический показатель оказывает существенное влияние на производственную мощность предприятий [14–18].

По данным [18–19], при содержании индивидуальных жилых домов коттеджного типа в производственной программе предприятия более 15 % зафиксировано снижение мощности по панелям наружных стен на уровне 15–17 %, по панелям перекрытия – 18–27 %. В [17] приводятся данные снижения мощности на 15–18 % при содержании в производственной программе предприятия более 30 % точечных домов. Приведенные факты свидетельствуют о зависимости показателей производственной мощности от модификаций типов домов в производственной программе строительства жилья. Однако приведенные факты требуют установления причин и закономерностей изменения параметров номенклатуры изделий и влияния этих параметров на показатели освоения производственных мощностей предприятий.

Расчеты проектной производственной мощности и основных технико-экономических показателей производства на стадии технологического проектирования базируются на номенклатуре изделий типовой блок-секции серии дома, что, по данным [14], не является достоверной информацией.

Как подтверждает практика индустриального домостроения, расширение номенклатуры изделий для модификаций блок-секций в производственной программе предприятий является объективной закономерностью, которую необходимо учитывать при технологическом проектировании новых или реконструкции действующих предприятий, планировании производственных программ строительства жилья. Это важный и принципиально новый подход к планированию и организации производства с учетом низкой тиражности и высокой доли точечных домов в производственной программе предприятий на современном этапе развития индустриального домостроения.

В качестве анализируемых параметров номенклатуры изделий в исследованиях приняты их количество и бетоноемкость в пересчете на 1 м² общей площади, а также тиражность изделий.

Установленные отклонения параметров номенклатуры изделий в производственных программах предприятий позволят определять фактические показатели освоения производственных мощностей, назначать необходимые резервы при расчете проектных производственных мощностей новых или действующих предприятий. Выявленные закономерности влияния номенклатуры изделий на производственную мощность могут служить базой для разработки решений снижения этой зависимости, проектирования организационно-технологических решений производства широкой и изменяющейся номенклатуры изделий, выбора эффективного способа производства.

Анализ номенклатуры изделий производственной программы предприятий

При формировании номенклатуры изделия разделяют на типоразмеры, марки и типы [15, 18]. Типоразмеры определяют длину, ширину и толщину. Марки означают индивидуальные номера взаимозаменяемых изделий, а типы характеризуют функциональное значение изделия в системе здания (панели наружных или внутренних стен, перекрытий и т. д.).

Соотношение типов изделий в номенклатуре производственной программы предприятий имеет важное значение при определении параметров технологических линий для синхронного выпуска изделий и обеспечения тем самым полной комплектации домов.

Установлено, что для проектирования организационно-технологических решений выпуска изделий важны два параметра: количество и объем изделий каждого типа в номенклатуре серий. Первый параметр – общее количество изделий – используется в качестве исходных данных при раскладке изделий и расчете потребности в формах и бортовом оснастке. Второй параметр является исходным показателем при расчете производительности и подборе ведущего технологического оборудования, определении параметров складского хозяйства сырьевых материалов и комплектующих. Но следует отметить, что в качестве расчетной единицы измерения показателя производственной мощности принимаются оба параметра.

Таким образом, для характеристики распределения типов изделий в номенклатуре совре-

менных серий домов проведен анализ количества и бетоноемкости изделий в номенклатуре девяти типовых блок-секций. Данные распределения типов изделий в номенклатуре изделий типовых блок-секций представлены на рис. 1.

Данные анализа номенклатуры типовых блок-секций представлены в табл. 1.

Известно, что изменение параметров номенклатуры изделий влияет на трудозатраты производства и показатели производственной мощности [14, 17, 18]. Современные тенденции к индивидуальности и архитектурной выразительности, гибкости конструктивно-планировочных решений домов в индустриальном исполнении, строительство индивидуальных домов коттеджного типа из сборных железобетонных изделий являются следствием роста общего количества изделий и марок в номенклатуре производственной программы предприятий. Это, прежде всего, приводит к росту

переналадок форм и основного технологического оборудования. В свою очередь, снижение тиражности изделий вызывает увеличение номенклатуры бортоснастки при снижении ее загрузки, что приводит к росту оперативного склада бортоснастки и материалоемкости производства [18].

Для анализа изменения номенклатуры изделий модификаций блок-секций проведены исследования годовой производственной программы трех предприятий индустриального домостроения: ГП «Витебский ДСК» (серия 11-108), ОАО «Гомельский ДСК» (серия 152М), ОАО «Бобруйский завод КПД» (серия БО 24.10). В табл. 2 представлены средние показатели параметров номенклатуры изделий в производственной программе предприятий. Отклонения усредненных параметров номенклатуры изделий модификаций блок-секций от типовых представлены на рис. 2.



Рис. 1. Доля изделий в номенклатуре типовых серий: а – по бетоноемкости изделий, м³; б – по количеству изделий, шт.

Fig. 1. Portion of products in the range of typical block sections:

a – by concrete capacity of products, m³; b – by number of products, pcs.

Таблица 1

Аналитические данные параметров номенклатуры изделий типовых блок-секций

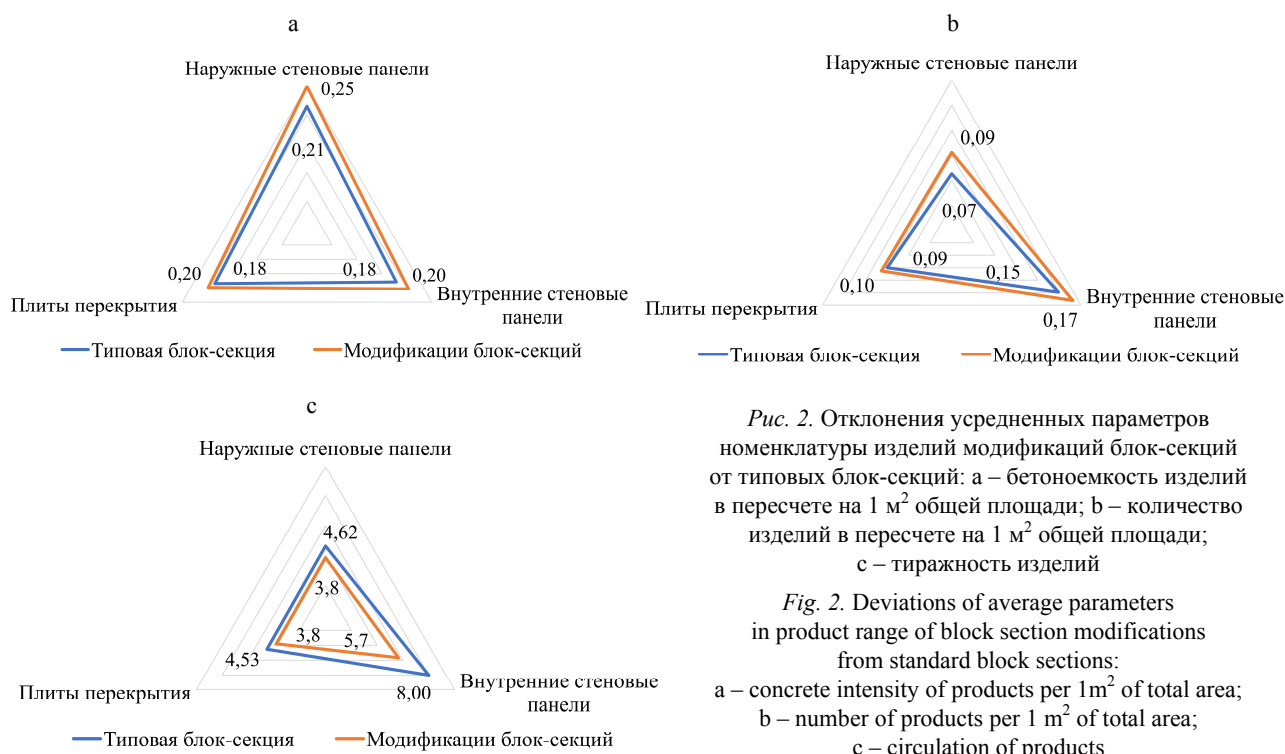
Analytical data of parameters product range of typical block sections

Серия	Количество этажей	Общая площадь, м ²	Наружные стеновые панели			Внутренние стеновые панели			Плиты перекрытия			Изделия добора			Всего по серии					
			шт./м ²	м ³ /м ²	Тиражность	шт./м ²	м ³ /м ²	Тиражность	шт./м ²	м ³ /м ²	Тиражность	шт./м ²	м ³ /м ²	Тиражность	шт.	м ³	шт./м ²	м ³ /м ²	Количество марок	Тиражность
152 М	10	2860	0,08	0,20	4,0	0,2	0,215	10,6	0,11	0,2	5,3	0,21	0,07	9,6	1702	1691,7	0,60	0,68	231	7,4
11-108	10	2568,8	0,06	0,24	3,4	0,14	0,15	8,3	0,08	0,18	5,0	0,18	0,12	6,2	1191	1503,8	0,46	0,69	206	5,8
БО 24.10	9	3706,1	0,06	0,21	6,4	0,10	0,17	5,1	0,08	0,17	3,4	0,13	0,07	11,7	1376	1978,1	0,37	0,62	239	5,8
Среднеарифметический показатель			0,07	0,21	4,6	0,15	0,18	8,0	0,10	0,18	4,5	0,17	0,09	9,2			0,48	0,66		6,3
Среднеквадратическое отклонение:			0,01	0,02	1,6	0,05	0,03	2,7	0,01	0,02	1,00	0,04	0,03	2,8			0,11	0,04		0,92
Коэффициент вариации, %			17	10	34	34	19	34	16	8	22	23	36	30			24	6		15

Усредненные показатели параметров номенклатуры изделий модификаций блок-секций

Average indicators for product range parameters of block section modifications

Серия	Этажность	м ² общей площади	секции	Наружные стеновые панели			Внутренние стеновые панели			Плиты перекрытия			Изделия добора		Всего по серии					
				шт./м ²	м ³ /м ²	Тиражность	шт./м ²	м ³ /м ²	Тиражность	шт./м ²	м ³ /м ²	Тиражность	шт./м ²	м ³ /м ²	шт.	м ³	шт./м ²	м ³ /м ²	Количество марок	Тиражность
152М	10,0	5767,1	2,1	0,10	0,25	3,4	0,20	0,25	6,3	0,12	0,22	4,4	0,24	0,08	3714	4433,0	0,67	0,80	455	4,7
11-108	10,2	6568,3	2,8	0,09	0,28	2,7	0,17	0,16	5,9	0,08	0,18	3,9	0,07	0,18	2537	4949,1	0,41	0,80	515	4,6
БО 24.10	8,4	5698,8	2,3	0,09	0,21	5,4	0,13	0,21	4,8	0,09	0,20	3,1	0,18	0,09	2752	3881,5	0,49	0,70	398	4,2
Среднеарифметический показатель				0,09	0,25	3,8	0,2	0,2	5,7	0,1	0,2	3,8	0,2	0,1			0,5	0,8		4,5
Среднеквадратическое отклонение				0,00	0,04	1,4	0,04	0,04	0,8	0,02	0,02	0,6	0,09	0,05			0,13	0,06		0,2
Коэффициент вариации, %				4	15	36	21	22	13	21	8	17	54	47			25	8		5



Как видно из графиков, представленных на рис. 2, бетоноёмкость и общее количество изделий в пересчете на 1 м² общей площади для модификаций блок-секций в производственной программе предприятий увеличились, а тиражность изделий снизилась в сравнении с номенклатурой типовых блок-секции соответствующих серий.

Важным является исследование колебаний параметров номенклатуры изделий, которые, в первую очередь, характеризуют объёмность номенклатуры производственной программы предприятия. Также следует отметить, что, по данным [14], колебания параметров номенклатуры изделий являются основной причиной колебаний производственной мощности предприятий.

На рис. 3 приведены графики колебания показателей бетоноёмкости и количества изделий в пересчете на 1 м² общей площади, а также

тиражности изделий для модификаций блок-секций в производственных программах предприятий.

Анализ данных, представленных на рис. 3, свидетельствует о значительных колебаниях параметров номенклатуры изделий модификаций блок-секций в производственной программе предприятий. В соответствии с приведенными фактами следует установить влияние колебаний параметров номенклатуры изделий на производственную мощность предприятий и определить зависимость этих колебаний от доли точечных домов в производственной программе предприятий, этажности и набора секций в комплектации домов.

Исследование влияния доли точечных домов в производственной программе предприятий на номенклатуру изделий

Для установления зависимости роста номенклатуры изделий от индивидуальности архитектурных и конструктивно-планировочных решений модификаций блок-секций домов выполнен анализ производственных программ шести предприятий индустриального домостроения. Результаты представлены в табл. 3.

Как показывают аналитические данные в табл. 3, номенклатура только основных типов сборных железобетонных изделий (наружных стеновых панелей, внутренних стеновых панелей и плит перекрытия) на современном этапе развития индустриального домостроения в годовой программе строительства достигает 6000 марок и более.

Рис. 3. Колебания параметров номенклатуры изделий модификаций блок-секций в производственных программах предприятий: а – бетоноёмкость изделий в пересчете на 1 м² общей площади; б – количество изделий в пересчете на 1 м² общей площади; в – тиражность изделий

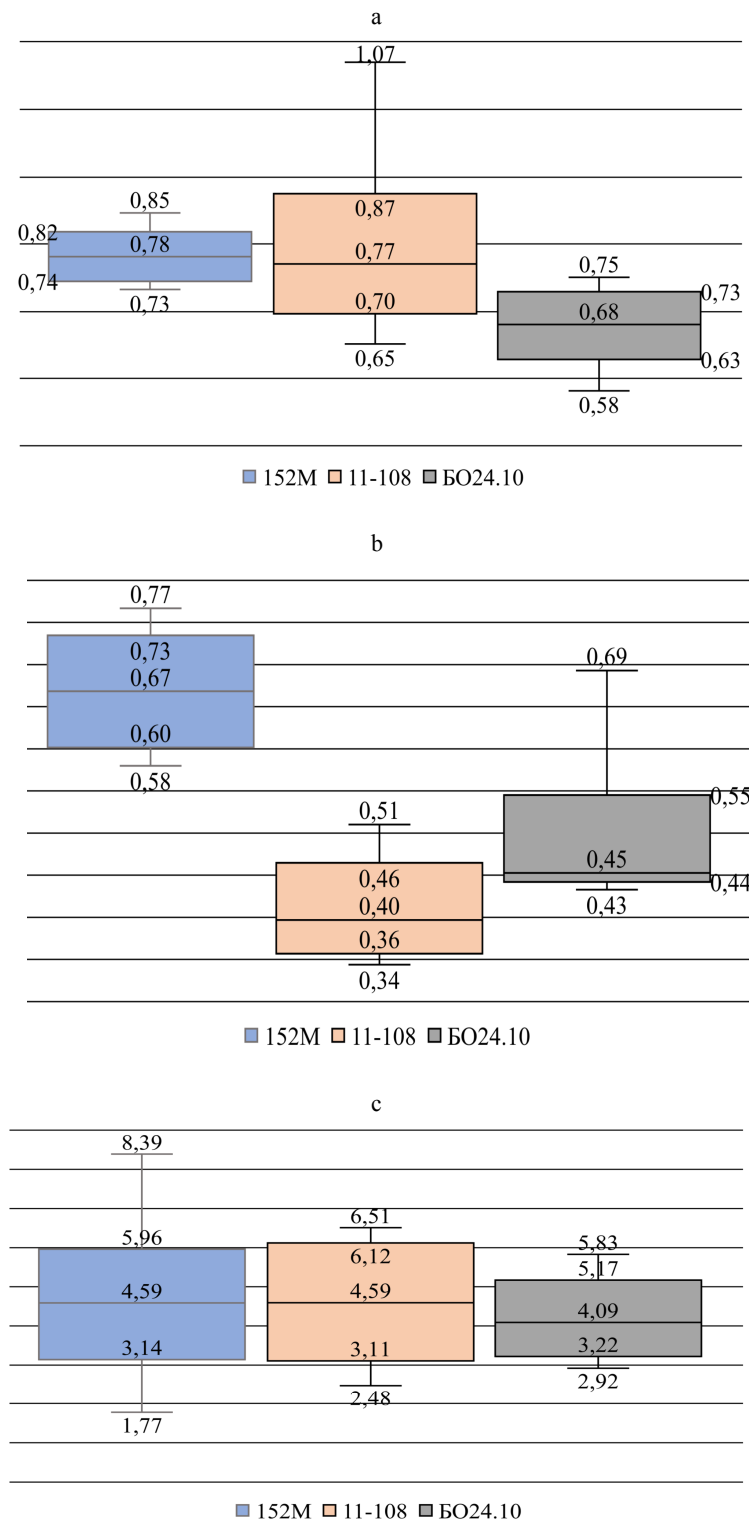


Fig. 3. Fluctuations in parameters of product range of block section modifications in construction program of plants: а – concrete intensity of products per 1 m² of total area; б – number of products per 1 m² of the total area; в – repeatability of products

Таблица 3

Количество марок в номенклатуре изделий годовой программы строительства
Number of brands in the product range of annual construction program

Предприятие	Серия	Количество марок основных изделий в годовой программе строительства y_i , шт.	Общее количество домов, шт.	Количество точечных домов x_i , шт.
ГП «Витебский ДСК»	11-108	639	19	3
ОАО «Гомельский ДСК»	152М	6497	27	23
ОАО «МАПИД»	М464-У	2231	25	17
	М464-М	1270	9	8
ОАО «Борисовжилстрой»	МС-50	1106	28	5
ОАО «Строительно-монтажный трест № 16, г. Новополоцк»	90Н	158	6	2
ОАО «Бобруйский завод КПД»	БО24.10	1308	14	11

Зафиксирована функциональная зависимость изменения номенклатуры изделий от количества точечных жилых домов типовых серий в годовой программе строительства жилья, которая представлена на рис. 4.

Исследование зависимости колебаний номенклатуры изделий от этажности и набора секций в комплектации домов

Для установления зависимости соответствия количества изделий и бетоноемкости изделий 1 м^2 общей площади от этажности и количест-

ва секций в комплектации домов проведен регрессионный анализ данных производственной программы четырех предприятий индустриального домостроения: ГП «Витебский ДСК» (серия 11-108), ОАО «Гомельский ДСК» (серия 152М), ОАО «Бобруйский завод КПД» (серия БО 24.10), ОАО «МАПИД» (серия М464-У1). После проведения статистической обработки данных регрессионного анализа получены модели зависимости соответствия количества (K_5) и бетоноемкости изделий (K_6) 1 м^2 общей площади от этажности и числа секций (табл. 4).

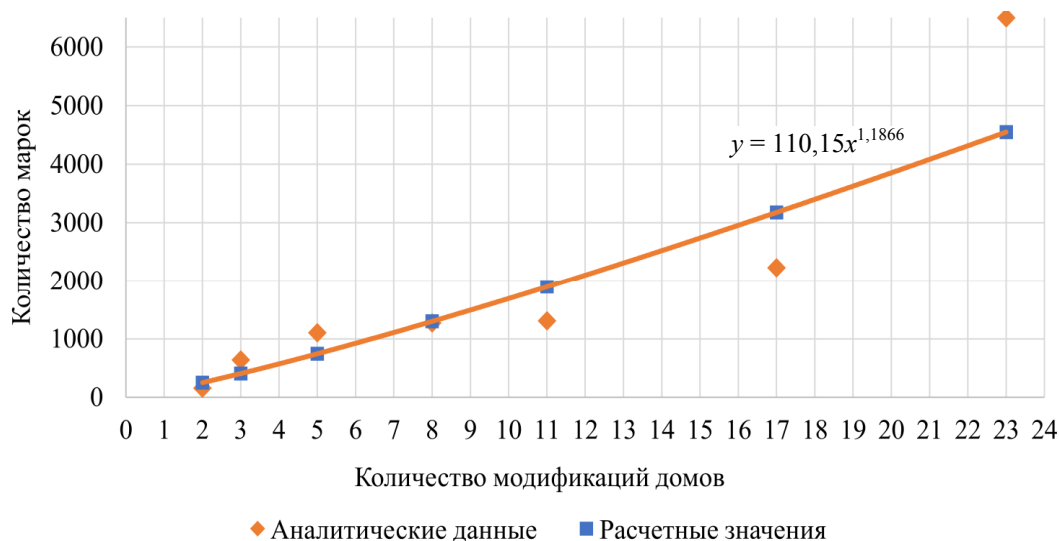


Рис. 4. Зависимость числа марок изделий от количества точечных домов в программе строительства

Fig. 4. Dependence of the number of product brands on the number of single-family houses in the construction program

Таблица 4

**Зависимость соответствия количества
и бетоноемкости изделий 1 м² общей площади
от этажности и количества секций**

**Dependencies of correspondence of the number
of products and concrete capacity of products per 1 m²
of total area depending on the number
of floors and number of sections**

Серия	Зависимость	Множествен- ный коэффи- циент кор- реляции R	Коэффи- циент детерми- нации R ²
11-108	$K_s = 0,636X_1^{-0,126}X_2^{-0,203}$	0,87	0,75
	$K_6 = 0,961X_1^{-0,014}X_2^{-0,210}$	0,87	0,76
152 М	$K_s = 0,833X_1^{-0,085}X_2^{0,011}$	0,85	0,72
	$K_6 = 1,129X_1^{-0,127}X_2^{-0,085}$	0,87	0,76
БО 24.10	$K_s = 0,831X_1^{-0,254}X_2^{-0,019}$	0,90	0,82
	$K_6 = 1,476X_1^{-0,311}X_2^{-0,089}$	0,89	0,79
М464-У ₁	$K_s = 0,626X_1^{-0,067}X_2^{-0,041}$	0,86	0,74
	$K_6 = 0,744X_1^{-0,022}X_2^{-0,043}$	0,84	0,71

На основании полученных моделей рассчита-
но изменение соответствия бетоноемкости
изделий 1 м² общей площади от этажности
и количества секций в комплектации домов.
Полученные значения для четырех анализиру-
емых серий домов приведены в табл. 5.

Анализ производственных программ пред-
приятий показал, что количество секций в ком-
плектации основной массы домов не превыша-

ет 4, при этом этажность имеет значительные
колебания от 3 до 18 этажей. Зафиксированы
лишь единичные точечные дома в производ-
ственных программах с набором секций 5 и бо-
лее. Таким образом, для анализа приняты огра-
ничения в наборе секций от 1 до 4 и этажности
домов от 3 до 18. На рис. 5–8 представлены от-
клонения показателей освоения производствен-
ных мощностей от проектных значений, уста-
новленных по параметрам соответствия бето-
ноемкости изделий 1 м² общей площади.
Диапазон колебаний показателей освоения
производственных мощностей на графиках де-
монстрирует влияние количества секций для
соответствующей этажности домов.

Анализируя данные, приведенные на графи-
ках, можно утверждать о влиянии номенклату-
ры изделий на показатели производственной
мощности предприятий. При этом установлено,
что этажность и количество секций в ком-
плектации домов являются основными пара-
метрами, которые определяют колебания пара-
метров номенклатуры изделий. Следует также
отметить, что колебания номенклатуры изде-
лий в зависимости от этажности и набора сек-
ций для различных серий имеют индивидуаль-
ные функциональные зависимости.

Таблица 5

**Расчетные значения соответствия бетоноемкости изделий 1 м² общей площади
Calculated values for compliance with the concrete capacity of products per 1 m² of total area**

Серия	Секции, шт.	Этажи, шт.						Колебания значений	Отклонения от показателя типовой блок-секции
		3	6	9	12	15	18		
11-108	1	0,95	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,69–0,95	0,0 +0,26
	2	0,82	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80		
	3	0,75	0,74	0,74	0,74	0,74	0,73		
	4	0,71	0,70	0,70	0,69	0,69	0,69		
152М	1	0,98	0,90	0,85	0,82	0,80	0,78	0,69–0,98	–0,01 +0,3
	2	0,93	0,85	0,80	0,78	0,75	0,74		
	3	0,89	0,82	0,78	0,75	0,73	0,71		
	4	0,87	0,80	0,76	0,73	0,71	0,69		
БО 24.10	1	1,05	0,84	0,74	0,68	0,64	0,60	0,53–1,05	–0,09 +0,43
	2	0,99	0,79	0,70	0,64	0,60	0,56		
	3	0,95	0,77	0,68	0,62	0,58	0,54		
	4	0,93	0,75	0,66	0,60	0,56	0,53		
М464-У ₁	1	0,73	0,72	0,71	0,71	0,70	0,70	0,66–0,73	+0,03 +0,10
	2	0,71	0,69	0,69	0,68	0,68	0,68		
	3	0,69	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67		
	4	0,68	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66		

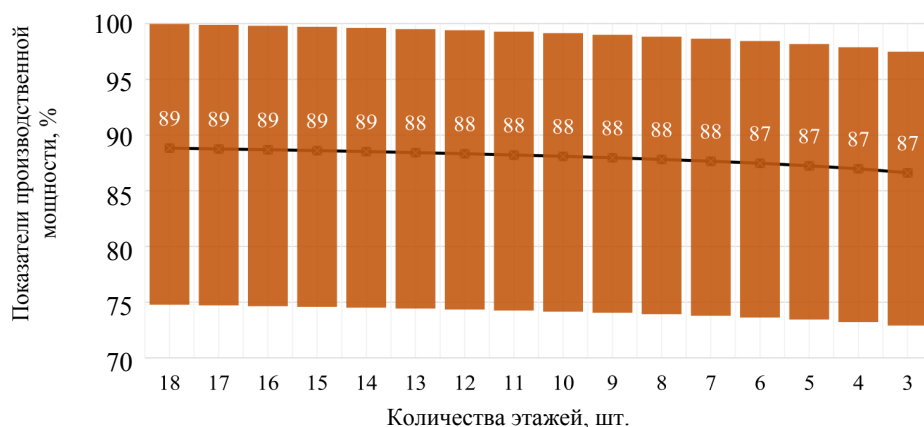


Рис. 5. Освоение проектных мощностей в зависимости от этажности и количества секций для модификаций блок-секций серии 11-108 ГП «Витебский ДСК»

Fig. 5. Development of design capacity depending on the number of storeys and number of sections for modifications of block-sections of the 11-108 series ГП [GP] of State Enterprise “Vitebsk House-Building Plant”

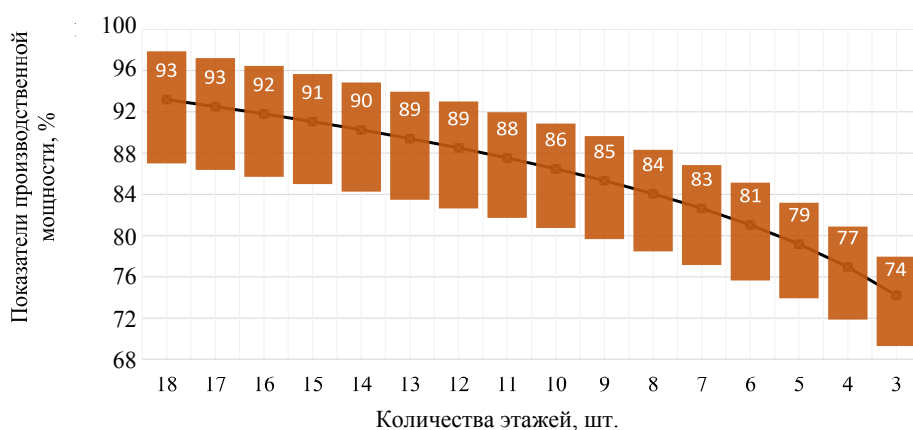


Рис. 6. Освоение проектных мощностей в зависимости от этажности и количества секций для модификаций блок-секций серии 152М ОАО «Гомельский ДСК»

Fig. 6. Development of design capacity depending on the number of storeys and number of sections for modifications of block-sections of the 152M series of JSC “Gomel House-Building Plant”

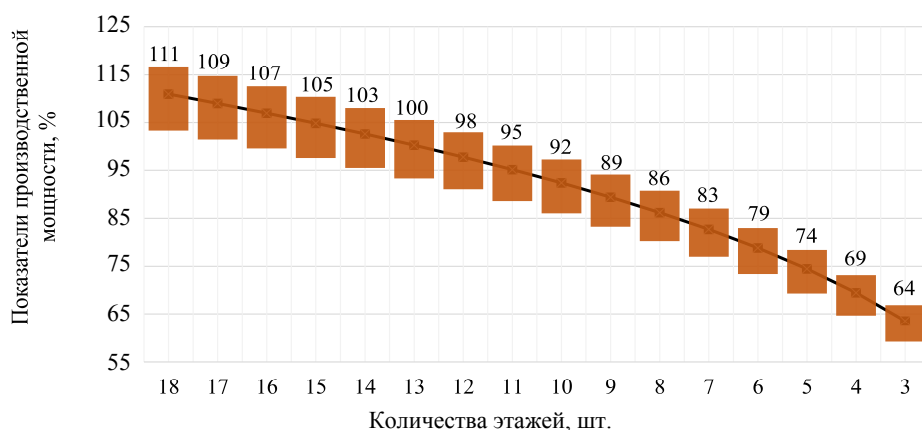


Рис. 7. Освоение проектных мощностей в зависимости от этажности и количества секций для модификаций блок-секций серии БО 24.10 ОАО «Бобруйский завод КПД»

Fig. 7. Development of design capacity depending on the number of storeys and number of sections for modifications of block-sections of БО [BO] 24.10 series of JSC “Bobruisk Plant of Large-Panel Housing Construction”

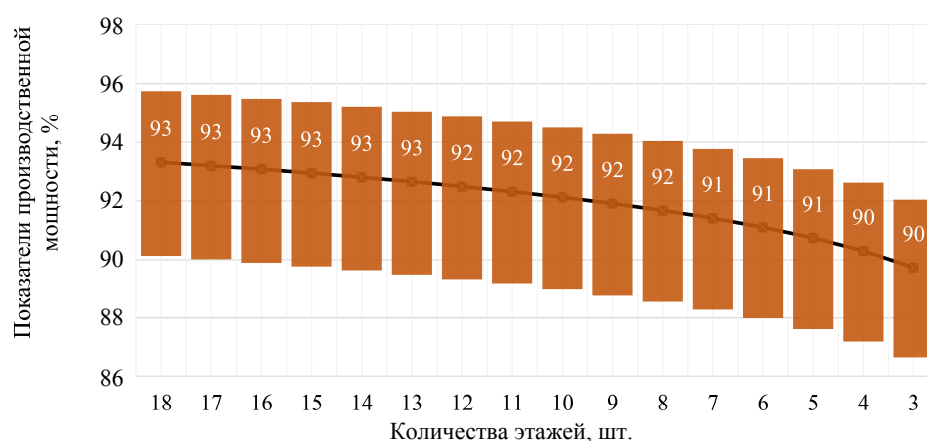


Рис. 8. Освоение проектных мощностей в зависимости от этажности и количества секций для модификаций блок-секций серии М464-У1 ОАО «МАПИД»

Fig. 8. Development of design capacity depending on the number of storeys and number of sections for modifications of block-sections of M464-Y1 series of OJSC "MAPID"

ВЫВОДЫ

1. Выявленные отклонения усредненных параметров номенклатуры изделий модификаций блок-секций от параметров типовых блок-секций свидетельствуют о динамичности и росте параметров номенклатуры изделий в производственной программе предприятий. При этом рост количества изделий в пересчете на 1 м² общей площади для наружных стеновых панелей составил 28 %, внутренних стеновых панелей – 13 %, плит перекрытия – 11 %. Бетоноемкость в пересчете на 1 м² общей площади для наружных стеновых панелей увеличилась на 19 %, для внутренних стеновых панелей и плит перекрытия – на 11 %. Тиражность наружных стеновых панелей, внутренних стеновых панелей и плит перекрытия снизилась на 18, 29 и 16 % соответственно.

2. Основываясь на полученных данных колебаний параметров номенклатуры изделий, можно утверждать о расширении номенклатуры изделий современных типов домов, что необходимо учитывать при формировании производственной программы предприятий и расчете производственной мощности. Установлены колебания показателей бетоноемкости в пересчете на 1 м² общей площади в пределах 38–67 % в зависимости от серии, количества изделий в пересчете на 1 м² общей площади в пределах 33–61 %. При этом колебания показателей тиражности изделий достига-

ют 100–374 %, что может подтверждать многократный рост количества марок изделий в производственной программе предприятий.

3. Установлена связь изменения номенклатуры изделий от доли точечных домов в производственной программе предприятий, которая выражается функциональной зависимостью. Выявлена зависимость количества и бетоноемкости изделий в пересчете на 1 м² общей площади от этажности и количества секций в комплектации домов. После проведения статистической обработки данных регрессионного анализа получены модели зависимости изменения количества и бетоноемкости изделий в пересчете на 1 м² общей площади от этажности и числа секций в комплектации домов.

4. Зафиксирована зависимость производственной мощности предприятий от бетоноемкости изделий в пересчете на 1 м² общей площади. На основании этой зависимости установлено влияние этажности и набора секций в комплектации домов на показатели освоения производственных мощностей предприятий. Так, показатели освоения производственных мощностей для анализируемых серий имеют значительные колебания. Для серии 11-108 ГП «Витебский ДСК» расчетные показатели освоения производственных мощностей в зависимости от этажности и набора секций в комплектации домов установлены в диапазоне от 72,9 до 100 %, для серии 152М ОАО «Гомельский ДСК» – от 69,3 до 97,9 %, для серии

БО 24.10 ОАО «Бобруйский завод КПД» – от 59,1 до 116,8 %, для серии М464-У1 ОАО «МАПИД» – от 86,7 до 95,7 %.

5. Установлена целесообразность формирования производственной программы предприятий с учетом постоянно изменяющегося спроса на домостроительную продукцию, обусловленной разнообразием архитектурных и конструктивно-планировочных решений домов различной этажности и набора секций. Полученные результаты исследований влияния номенклатуры изделий на производственную мощность предприятий являются научным базисом для формирования их производственной программы и учета установленных закономерностей при организации выпуска широкой изменяемой номенклатуры изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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>.
2. Гуринович, В. Ю. Тенденции и направления развития индустриального домостроения в мировой и отечественной практике жилищного строительства / В. Ю. Гуринович, С. Н. Леонович, Д. А. Поздняков // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F. Строительство. Прикладные науки. 2023. № 1. С. 10–18. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-33-1-10-18>.
3. Гуринович, В. Ю. Наукометрический анализ направлений исследований в области индустриального домостроения / В. Ю. Гуринович, С. Н. Леонович, Д. А. Поздняков // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17, вып. 12. С. 1716–1731. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.12.1716-1731>.
4. Li, X., Lean Precast Production System Based on the CONWIP Method / X. Li, Z. Li, G. Wu // KSCE Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 22. P. 2167–2177. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-2009-4>.
5. Research on Lean Planning and Optimization for Precast Component Production Based on Discrete Event Simulation / Z. Yuan [et al.] // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Article ID 8814914. <https://doi.org/10.1155/2020/8814914>.
6. Algorithms for In-Situ Production Layout of Composite Precast Concrete Members / W. Hong [et al.] // Automation in Construction. 2014. Vol. 41. P. 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.005>.
7. Optimization of Flow Shop Scheduling in Precast Concrete Component Production via Mixed-Integer Linear Programming / Z. Liu [et al.] // Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 2021. Article ID 6637248. <https://doi.org/10.1155/2021/6637248>.
8. Hu, H. A Study of Resource Planning in Precast Production / H. Hu // Architectural Science Review. 2007. Vol. 50, No 2. P. 106–114. <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5016>.
9. Khalili, A. Integrated Prefabrication Configuration and Component Grouping for Resource Optimization of Precast Production / A. Khalili, D. K. Chua // Journal of Construction Engineering and Management. 2013. Vol. 140, No 2. P. 04013052. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000798](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000798).
10. Layout Optimization Model for the Production Planning of Precast Concrete Building Components / D. Wang [et al.] // Sustainability. 2018. Vol. 10, No 6. P. 1807. <https://doi.org/10.3390/su10061807>.
11. Prata, B. D. A. An Integer Linear Programming Model for the Multi-Period Production Planning of Precast Concrete Beams / B. D. A. Prata, A. R. Pitombeira-Neto, C. J. M. Sales // Journal of Construction Engineering and Management. 2015. Vol. 141, No 10. P. 04015029. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000991](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000991).
12. Yang, Z. Optimized Flowshop Scheduling of Multiple Production Lines for Precast Production / Z. Yang, Z. Ma, S. Wu // Automation in Construction. 2016. No 72. P. 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.021>.
13. Гуринович, В. Ю. Производственный потенциал базы индустриального домостроения Республики Беларусь / В. Ю. Гуринович, С. Н. Леонович, Д. А. Поздняков // Вестник БрГТУ. 2023. № 1 (130). С. 3–6. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-130-1-3-6>.
14. Николаев, С. В. Оптимизация проектных и производственных решений технологии производства изделий крупнопанельного домостроения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08 / С. В. Николаев. М., 1981. 399 с.
15. Алешина, Л. С. Унификация сборных железобетонных изделий полносборного домостроения на основе заводского производства: дис. ... канд. техн. наук: 08.00.05 / Л. С. Алешина. М., 1984. 166 с.
16. Джалилов, Ф. Ф. Разработка методов формирования организационно-технологических решений по реконструкции действующих предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08 / Ф. Ф. Джалилов. М., 1996. 356 с.
17. Клишкин, К. А. Методические основы оценки использования производственных мощностей домостроительных предприятий в условиях инвестиционного спада: дис. ... канд. эконом. наук: 08.00.05 / К. А. Клишкин. Хабаровск, 1998. 143 с.
18. Граник, Ю. Г. Реконструкция и техническое перевооружение предприятий полносборного домостроения / Ю. Г. Граник, С. И. Полтавцев. М.: Стройиздат, 1989. 271 с.
19. Липидус, А. А. Идентификация и анализ технических рисков при строительстве малоэтажных жилых зданий / А. А. Липидус, А. С. Воробьев // Строительное производство. 2021. № 2. С. 2–7. <https://doi.org/10.54950/26585340-2021-2-2>.

Поступила 06.10.2023

Подписана к печати 14.12.2023

Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. Gurinovich V. Yu. (2022) The Comparative Study of the Development on Prefabricated Construction. *Nauka*

- i Tekhnika = Science and Technique*, 21 (5), 397–409. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-397-409> (in Russian).
2. Gurinovich V. Yu., Leonovich S. N., Pozdnyakov D. A. (2023) Trends and Directions of Development of Prefabricated Construction in the World and Domestic Practice of Civil Construction. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, (1), 10–18. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-33-1-10-18> (in Russian).
 3. Gurinovich V. Yu., Leonovich S. N., Pozdnyakov D. A. (2022) Scientometric Analysis of Research in the Field Prefabricated construction. *Vestnik MGSU*, 17 (12), 1716–1731. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.12.1716-1731> (in Russian).
 4. Li, X., Li Z., Wu G. (2017) Lean Precast Production System Based on the CONWIP Method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 2167–2177. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-2009-4>.
 5. Yuan Z., Qiao Y., Guo Y., Wang Y., Chen C., Wang W. (2020) Research on Lean Planning and Optimization for Precast Component Production Based on Discrete Event Simulation. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 8814914. <https://doi.org/10.1155/2020/8814914>.
 6. Hong W., Lee G., Lee S., Kim S. (2014) Algorithms for In-Situ Production Layout of Composite Precast Concrete Members. *Automation in Construction*, 41, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.005>.
 7. Liu Z., Liu Z., Liu M., Wang J. (2021) Optimization of Flow Shop Scheduling in Precast Concrete Component Production via Mixed-Integer Linear Programming. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 6637248. <https://doi.org/10.1155/2021/6637248>.
 8. Hu H. (2007) A study of Resource Planning in Precast Production. *Architectural Science Review*, 50 (2), 106–114. <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5016>.
 9. Khalili A., Chua D.K. (2013) Integrated Prefabrication Configuration and Component Grouping for Resource Optimization of Precast Production. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140 (2), 04013052. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000798](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000798).
 10. Wang D., Liu G., Li K., Wang T., Shrestha A., Martek I., Tao X. (2018) Layout Optimization Model for the Production Planning of Precast Concrete Building Components. *Sustainability*, 10 (6), 1807. <https://doi.org/10.3390/su10061807>.
 11. Prata B. D. A., Pitombeira-Neto A. R., Sales C. J. M. (2015) An Integer Linear Programming Model for the Multi-Period Production Planning of Precast Concrete Beams. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141 (10), 04015029. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000991](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000991).
 12. Yang Z., Ma Z., Wu S. (2016) Optimized Flowshop Scheduling of Multiple Production Lines for Precast Production. *Automation in Construction*, (72), 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.021>.
 13. Gurinovich V. Yu., Leonovich S. N., Pozdnyakov D. A. (2023) Production Potential of the Prefabricated Construction Base in the Republic of Belarus. *Vestnik of Brest State Technical University*, (1), 3–6. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-130-1-3-6> (in Russian).
 14. Nikolaev S. V. (1981) *Optimization of Design and Production Solutions for the Production Technology of Large-Panel Housing Construction Products*: Dissertation of Doctor of Technical Sciences. Moscow. 399 (in Russian).
 15. Alyoshina L. S. (1984) *Unification of Prefabricated Reinforced Concrete Products for Prefabricated Housing Construction Based on Factory Production*: Dissertation of Candidate of Technical Sciences. Moscow. 166 (in Russian).
 16. Dzhililov F. F. (1996) *Development of Methods for Forming Organizational and Technological Solutions for the Reconstruction of Existing Enterprises*: Dissertation of Candidate of Technical Sciences. Moscow. 356 (in Russian).
 17. Klimkin K. A. (1998) *Methodological Basis for Assessing the use of Production Capacity of House-Building Enterprise in Conditions of Investment Recession*: Dissertation of Candidate of Economic Sciences. Khabarovsk. 143 (in Russian).
 18. Granik Yu. G., Poltavtsev S. I. (1989) *Reconstruction and Technical Re-Equipment of Prefabricated Housing Construction Enterprises*. Moscow, Stroiizdat Publ. 271 (in Russian).
 19. Lapidus A. A., Vorobyov A. S. (2021) Identification and Analysis of Technical Risks in the Construction of Low-Rise Residential Buildings. *Stroitelnoe Proizvodstvo = Construction Production*, (2), 2–7. <https://doi.org/10.54950/26585340-2021-2-2> (in Russian).

Received: 06.10.2023

Accepted: 14.12.2023

Published online: 29.03.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-140-150>

УДК 625.85.06

Сравнительный анализ изменения свойств модифицированных асфальтобетонов в зависимости от способа модификации и концентрации полимера в вяжущем

Магистр П. П. Яцевич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Широкое применение полимеров различной природы для модификации асфальтобетонных смесей ставит задачу по определению наиболее оптимального метода их введения в состав асфальтобетонной смеси. В работе рассматриваются варианты сухого введения и через предварительную модификацию битума. При этом оцениваются изменения свойств асфальтобетонов, отражающих условия работы материала в широком диапазоне температур, и учитываются технологические особенности при устройстве покрытия в зависимости от количественной концентрации полимерного модификатора в вяжущем. Исследования наглядно показали, что оптимальной для достижения высокотемпературных показателей асфальтобетонов, с точки зрения расхода полимера, является предварительная модификация битума, которая позволяет оптимизировать распространение модификатора по объему асфальтобетонной смеси. Также показано, что предпочтительными для модификации являются асфальтобетоны с высоким содержанием вяжущего, так как битум является основным компонентом взаимодействия с полимерами и, чем толще пленка битума, тем более оптимально протекает этот процесс. Кроме того, исследования показали негативное влияние относительно высокого содержания термопласта на низкотемпературные и технологические свойства асфальтобетонных смесей, которые могут приводить к снижению устойчивости асфальтобетона к коррозионным разрушениям.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, асфальтобетон, максимальная структурная прочность, водонасыщение, технологические свойства, хрупкость, концентрация полимера, термопласты, эластопласты, модификация битума, модификация асфальтобетона

Для цитирования: Яцевич, П. П. Сравнительный анализ изменения свойств модифицированных асфальтобетонов в зависимости от способа модификации и концентрации полимера в вяжущем / П. П. Яцевич // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 2. С. 140–150. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-140-150>

Comparative Analysis of Property Changes in Modified Asphalt Concretes Depending on the Modification Method and Polymer Concentration in the Binder

P. P. Yatsevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The widespread use of polymers of various types for modifying asphalt concrete mixtures poses the task of determining the most optimal method for their introduction into the composition of asphalt concrete mixtures. The study considers options for dry introduction and pre-modification of bitumen. In this context, changes in the properties of asphalt concrete that reflect the material performance in a wide range of temperature are assessed. Technological aspects during construction of the pavement are also taken into account, depending on the quantitative concentration of the polymer modifier in the binder. The research has clearly demonstrated that the optimal way to achieve high-temperature properties of asphalt concrete,

Адрес для переписки

Яцевич Павел Петрович
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 338-78-40
cniidsgm@bntu.by

Address for correspondence

Yatsevich Pavel P.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 338-78-40
cniidsgm@bntu.by

in terms of polymer consumption, is pre-modification of bitumen, which allows optimizing the distribution of the modifier throughout the volume of the asphalt concrete mixture. Additionally, the research has shown that asphalt concretes with a high binder content are preferable for modification because bitumen is the primary component in interaction with polymers, and the thicker the bitumen film, the more optimally this process occurs. In addition, the studies have revealed the negative influence of relatively high thermoplastic content on the low-temperature and technological properties of asphalt concrete mixtures, which can lead to a decrease in the resistance of asphalt concrete to corrosion damage.

Keywords: asphalt concrete mixture, asphalt concrete, maximum structural strength, water saturation, technological properties, brittleness, polymer concentration, thermoplastics, elastoplasts, bitumen modification, asphalt concrete modification

For citation: Yatsevich P. P. (2024) Comparative Analysis of Property Changes in Modified Asphalt Concretes Depending on the Modification Method and Polymer Concentration in the Binder. *Science and Technique*. 23 (2), 140–150. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-140-150> (in Russian)

Введение

Изменение транспортного потока (количественное и качественное в части осевых нагрузок) неминуемо приводит к возникновению дефектов уже в первый год эксплуатации покрытия улиц и дорог из асфальтобетонных, производимых на стандартных битумах, с последующим их лавинообразным распространением [1]. При выборе материалов и расчете дорожных конструкций в населенных пунктах предлагается учитывать свойства, не регламентированные нормативными документами [2, 3]. Практика показывает, что достижение требуемых при проектировании показателей невозможно с точки зрения уровней надежности [4] при использовании не модифицированных полимерами асфальтобетонных смесей.

Модификация асфальтобетонных смесей в зависимости от возможностей производителя и региона строительства может осуществляться по двум направлениям: предварительная модификация битума; сухое смешение полимера с каменным материалом непосредственно в смесительной установке по приготовлению асфальтобетонной смеси [5]. Оба метода имеют свои достоинства и недостатки с экономической и технологической точек зрения [6]. При «мокром» методе необходимо применять полимеры, которые имеют точку плавления ниже технологических температур модификации битума. И если желаемым эффектом является не только гомогенизация, но и химическое взаимодействие между полимером и функциональными группами битума [7], то следует учитывать «сродство», по Гильдебранту [8]. Последний аспект также критически важен при «сухом» методе введения полимера, ведь он подразумевает значительно меньшее время воздействия катализатора химического взаимодействия, которым выступает тепловая энергия. Важным является определение количества полимера различной природы, достаточного

для успешной модификации асфальтобетонной смеси до требуемых значений свойств, учитывая их равновесность при положительных и отрицательных температурах, и соблюдение технологических условий устройства покрытия.

Методика проведения исследований

Для выполнения экспериментальных исследований с целью оптимизации ресурсной базы, сравнимости и воспроизводимости в последующем использовали стандартизированные методы. Все испытания проводили на двух типах асфальтобетонных смесей, которые могут применяться в верхних слоях дорожного покрытия [2], как наиболее уязвимые к воздействию транспортной нагрузки [9] и погоднo-климатических факторов. Это щебеночная мелкозернистая смесь типа С (ЩМС_т) и щебеночная мелкозернистая смесь типа Б (ЩМБ_т), приготовленные в соответствии с СТБ 1033 [3]. При этом обе смеси были модифицированы как отдельно термопластом и эластопластом, так и их смесью в пропорции 33/66 и 66/33 для полноты картины воздействия полимеров различной природы на свойства вяжущего.

Высокотемпературные свойства асфальтобетонных определялись на сформованных образцах асфальтобетона по показателю предела прочности при сжатии при 50 °С в соответствии с СТБ 1115 [10]. Выбор этого испытания обусловлен тем, что в отличие от приложения нагрузки по схеме Маршалла минимизировано влияние строения щебеночного каркаса и угла сдвига, по которому происходит разрушение, на результаты, а прочность всего образца с большей долей вероятности коррелируется с прочностью вяжущего, которое и является непосредственно модифицированным компонентом асфальтобетона.

Низкотемпературные свойства определялись на сформованных образцах асфальтобето-

на по показателю максимальной структурной прочности в соответствии с СТБ 1115 [10]. Максимальная структурная прочность – это максимальная прочность материала, реализуемая в широком диапазоне температур и времени нагружения [11]. Для бетонов на органических вяжущих она находится в диапазоне отрицательных температур ввиду кристаллизации структуры битума. Этот параметр наиболее наглядно демонстрирует поведение асфальтобетона при отрицательных температурах.

При модификации асфальтобетонных смесей следует учитывать также фактор удобоукладываемости [12], так как модифицированные смеси обладают повышенной жесткостью относительно немодифицированных смесей [13]. Для оценки технологических свойств асфальтобетонных смесей сравнивали значения параметра водонасыщения сформованных при одинаковом давлении и времени образцов.

В соответствии с методикой [14] минимальное количество испытаний с доверительной вероятностью 0,95 при гарантийном коэффициенте, принимаемом по функции Лапласа, для определения предела прочности на сжатие при температуре 50 °С и максимальной структурной прочности составляет по два образца, для определения показателя водонасыщения с той же доверительной вероятностью достаточно четырех образцов.

Полученный на установке суперконцентрат вводился в асфальтобетонную смесь сверх 100 % минеральной части в количестве, рассчитанном таким образом, чтобы конечное соотношение полимер/битум оставалось неизменным по сравнению со смесями, приготовленными на модифицированном битуме. Битум модифицировал-

ся 2; 4; 6 и 8 % полимера, при «сухом» методе модификатор добавлялся в смесь типа С в количестве 0,11; 0,22; 0,34 и 0,45 % сверх 100 % минеральной части, а для смеси типа Б – 0,10; 0,21; 0,31 и 0,42 % также сверх 100 % минеральной части. При таких содержаниях полимера при «сухом» методе введения модификатора происходит корреляция процентных соотношений. Ввиду большого количества испытаний исследования проводились в течение продолжительного периода времени, что привело к необходимости для каждой серии формировать стандартные образцы без содержания полимера.

Смесь щебеночная мелкозернистая типа С была подобрана на щебне фракции от 5 до 10 мм, песках из отсеков дробления РУПП «Гранит», минеральном порошке ОАО «Доломит» и битуме марки 70/100. Гранулометрический состав минеральной части представлен на рис. 1 и табл. 1.

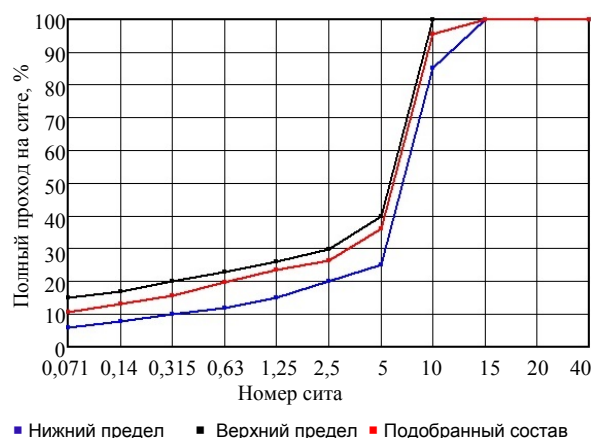


Рис. 1. Кривая гранулометрического состава

Fig. 1. Particle size distribution curve

Таблица 1

Гранулометрический состав минеральных материалов

Granulometric composition of mineral materials

Размер зерен, мм	Гранулометрический состав						Сумма, %	Полный остаток, %	Полный проход, %
	материалов			материалов в смеси					
	1	2	3	1	2	3			
10	5,87	1,35	0	4,23	0,20	0	4,43	4,43	95,57
5	80,44	9,44	0	57,92	1,42	0	59,33	63,76	36,24
2,5	8,49	24,57	0	6,11	3,69	0	9,80	73,56	26,44
1,25	1,20	14,11	0	0,86	2,12	0	2,98	76,54	23,46
0,63	0,93	17,32	2,50	0,67	2,60	0,33	3,59	80,13	19,87
0,315	0,71	20,84	4,17	0,51	3,13	0,54	4,18	84,31	15,69
0,14	0,80	7,87	5,00	0,58	1,18	0,65	2,41	86,72	13,28
0,071	1,09	3,12	10,83	0,78	0,47	1,41	2,66	89,38	10,62
<0,071	0,47	1,38	77,50	0,34	0,21	10,07	10,62	100	-

Смесь щебеночная мелкозернистая типа Б подобрана на щебне фракций от 5 до 20 мм и от 5 до 10 мм, песков из отсеков дробления РУПП «Гранит», песков природных, минерального порошка ОАО «Доломит» и битума марки 70/100. Гранулометрический состав минеральной части представлен на рис. 2 и в табл. 2.

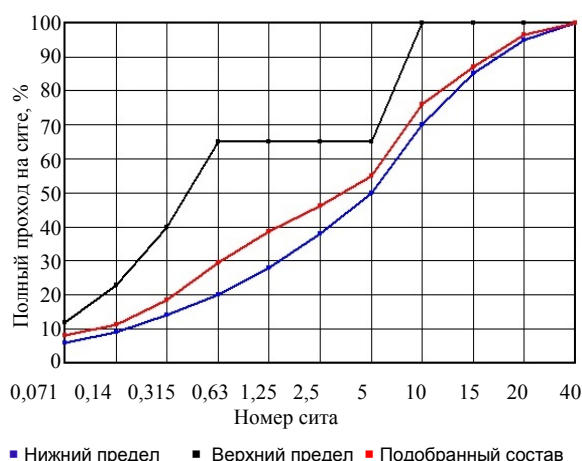


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава

Fig. 2. Particle size distribution curve

Результаты испытаний

Исследования высокотемпературных свойств асфальтобетонных смесей показали их улучшение с ростом концентрации полимера в составе асфальтобетонной смеси. При этом у щебеночного мелкозернистого асфальтобетона типа С эти свойства имели значительно большее приращение, чем у щебеночного мелкозернистого ас-

фальтобетона типа Б. Это можно объяснить тем, что у первого содержание битума больше и, следовательно, полимер может эффективнее взаимодействовать с вяжущим, что подтверждается работой М. А. Далхата [15]. Также из результатов видно, что эффективность предварительной модификации битума значительно выше, чем при «сухом» методе. Это может быть объяснено более рациональным распределением полимера по объему смеси и высокой эффективностью, которую проявляет предварительная гомогенизация вяжущего [16]. Результаты испытаний предела прочности при сжатии при температуре 50 °С представлены на рис. 3 и в табл. 3.

Кроме того, из результатов испытаний видно, что термопласт при «сухом» методе полимеризации смеси активнее проявляется и изменяет свойства асфальтобетона, чем эластопласт. При применении для приготовления щебеночной мелкозернистой смеси типа С предварительно модифицированного битума картина меняется и эластопласт дает большее приращение свойств. Но в мелкозернистой смеси типа Б из-за значительно более тонкой пленки битума термопласт имеет доминирующую позицию в плане улучшения высокотемпературных свойств (рис. 4, табл. 4). Таким образом, исследования показывают, что при модификации смесей с малым содержанием битума эффективнее применение термопластов.

Таблица 2

Гранулометрический состав минеральных материалов

Granulometric composition of mineral materials

Размер зерен, мм	Гранулометрический состав										Сумма, %	Полный остаток, %	Полный проход, %
	материалов					материалов в смеси							
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
20	11,42	0	0	0	0	3,54	0	0	0	0	3,54	3,54	96,46
15	29,94	3,18	0	0	0	9,28	0,25	0	0	0	9,54	13,08	86,92
10	26,59	6,80	3,17	4,45	0	8,24	0,54	0,89	1,2	0	10,88	23,95	76,05
5	24,63	85,17	15,59	8,33	0	7,64	6,81	4,37	2,25	0	21,06	45,02	54,98
2,5	1,89	1,62	23,21	6,01	0	0,59	0,13	6,5	1,62	0	8,84	53,85	46,15
1,25	1,14	0,14	15,20	10,27	0	0,35	0,01	4,26	2,77	0	7,39	61,25	38,75
0,63	0,85	1,14	14,25	17,45	2,50	0,26	0,09	3,99	4,71	0,15	9,21	70,45	29,55
0,315	0,64	0,28	11,37	27,46	4,17	0,2	0,02	3,18	7,41	0,25	11,07	81,52	18,48
0,14	0,73	0,36	7,56	16,13	5,00	0,23	0,03	2,12	4,36	0,30	7,03	88,55	11,45
0,071	0,05	0,34	6,35	3,18	10,83	0,02	0,03	1,78	0,86	0,65	3,33	91,88	8,12
<0,071	2,12	0,97	3,30	6,72	77,5	0,66	0,08	0,92	1,81	4,65	8,12	100	—

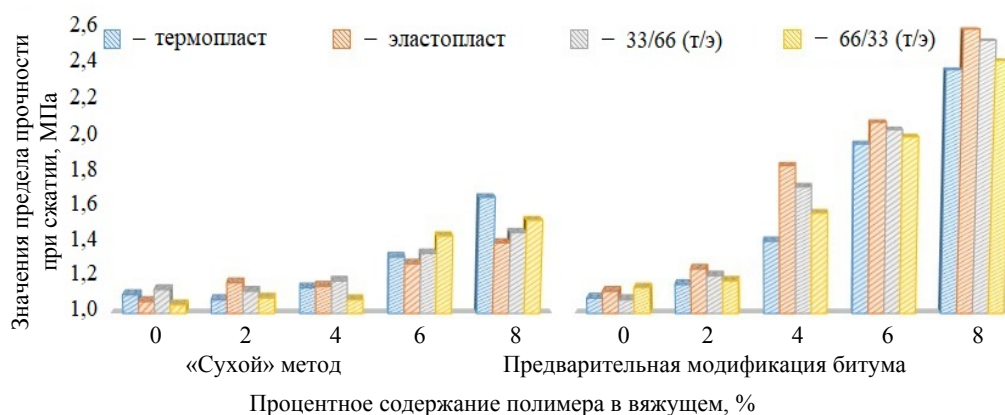


Рис. 3. Изменение предела прочности при сжатии при температуре 50 °С смеси типа С

Fig. 3. Change in compressive strength at a temperature of 50 °C of type C mixture

Таблица 3

**Результаты испытаний предела прочности при сжатии при температуре 50 °С
щебеночной мелкозернистой смеси типа С**
**Results of tests of compressive strength of crushed stone fine-grained mixture of type C
at a temperature of 50 °C**

Метод доставки полимера в асфальтобетонную смесь	Тип полимера	Значения показателя предела прочности при сжатии в зависимости от процентного содержания полимера в композиции вяжущего, МПа				
		0	2 %	4 %	6 %	8 %
«Сухой» метод	Термопласт	1,11	1,08	1,15	1,33	1,67
	Эластопласт	1,07	1,18	1,16	1,29	1,41
	33/66 (Т/Э)	1,14	1,13	1,19	1,35	1,47
	66/33 (Т/Э)	1,05	1,09	1,08	1,45	1,54
Предварительная модификация битума	Термопласт	1,09	1,17	1,42	1,97	2,38
	Эластопласт	1,13	1,26	1,85	2,09	2,67
	33/66 (Т/Э)	1,08	1,22	1,73	2,05	2,54
	66/33 (Т/Э)	1,15	1,19	1,58	2,01	2,43

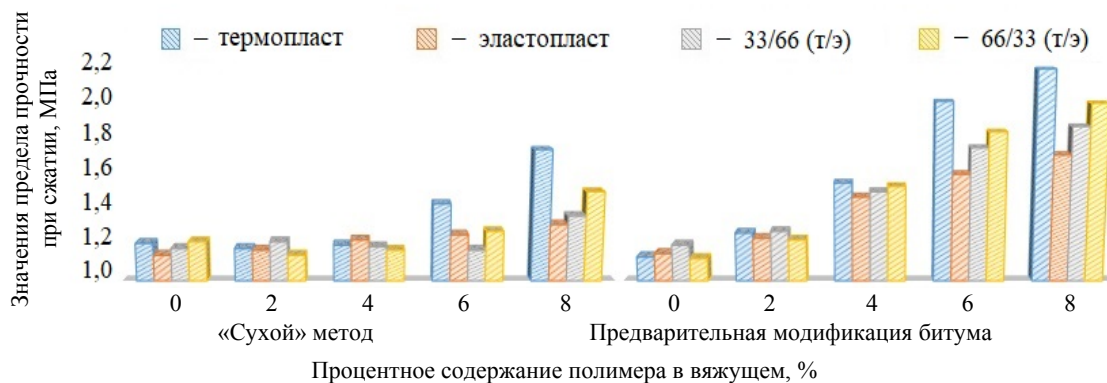


Рис. 4. Изменение предела прочности при сжатии при температуре 50 °С смеси типа Б

Fig. 4. Change in compressive strength at a temperature of 50 °C of type B mixture

Таблица 4

**Результаты испытаний предела прочности при сжатии при температуре 50 °С
щебеночной мелкозернистой смеси типа Б**
**Results of tests of compressive strength of crushed stone fine-grained mixture of type B
at a temperature of 50 °C**

Метод доставки полимера в асфальтобетонную смесь	Тип полимера	Значения показателя предела прочности при сжатии в зависимости от процентного содержания полимера в композиции вяжущего, МПа				
		0	2 %	4 %	6 %	8 %
«Сухой» метод	Термопласт	1,22	1,19	1,21	1,45	1,76
	Эластопласт	1,15	1,18	1,24	1,27	1,33
	33/66 (Т/Э)	1,19	1,23	1,20	1,18	1,38
	66/33 (Т/Э)	1,23	1,15	1,18	1,29	1,52
Предварительная модификация битума	Термопласт	1,14	1,28	1,57	2,03	2,21
	Эластопласт	1,16	1,25	1,49	1,62	1,73
	33/66 (Т/Э)	1,21	1,29	1,52	1,77	1,89
	66/33 (Т/Э)	1,13	1,24	1,55	1,86	2,02

При сопоставлении результатов исследований предела прочности при сжатии смесей типов С и Б, модифицированных термопластами и эластопластами при обоих методах модифи-

кации, установлено, что при «сухом» методе требуется значительно больше полимера для достижения того же эффекта от применения (рис. 5).

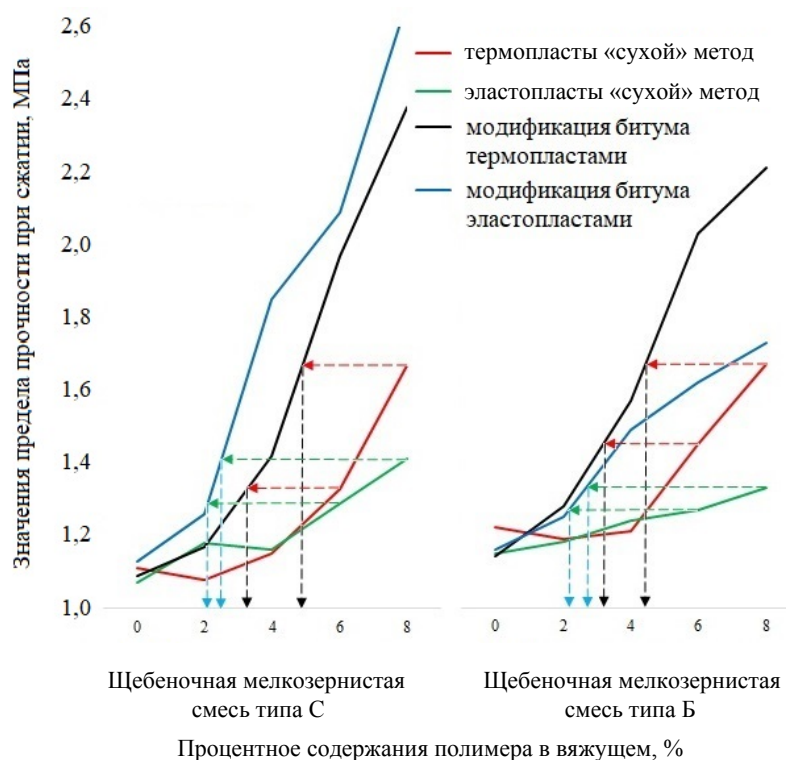


Рис. 5. Соотношение содержания полимера при различных способах модификации смеси

Fig. 5. Ratio of polymer content for various methods of mixture modifying

Результаты определения максимальной структурной прочности щебеночной мелкозернистой смеси типа С (табл. 5) демонстрируют аналогичные приращения свойств, а именно большую эффективность введения полимеров через предварительную модификацию битума, чем при «сухом» методе (рис. 6). При этом наблюдается снижение значений показателя при любом методе модификации при увеличении концентрации термопластов, что свидетельствует о том, что происходит негативное изменение вяжущего с приданием ему хрупких свойств [17].

Исследование максимальной структурной прочности щебеночного мелкозернистого асфальтобетона типа Б показало, что при «сухом» методе введения полимера в состав смеси практически не происходит изменений (табл. 6, рис. 7). Таким образом, можно сделать вывод, что для модификации асфальтобетона критическое значение имеет достаточность битума, который взаимодействует с полимером и раскрывает его потенциал влияния на свойства материала. Кроме того, при методе первоначальной модификации битума термопластами также происходит снижение значений максимальной структурной прочности.

Таблица 5

Максимальная структурная прочность щебеночной мелкозернистой смеси типа С
Maximum structural strength of crushed stone fine-grained mixture of type C

Метод доставки полимера в асфальтобетонную смесь	Тип полимера	Значения показателя максимальной структурной прочности в зависимости от процентного содержания полимера в композиции вяжущего, МПа				
		0	2 %	4 %	6 %	8 %
«Сухой» метод	Термопласт	6,53	6,54	6,49	6,42	6,35
	Эластопласт	6,48	6,45	6,51	6,62	6,79
	33/66 (Т/Э)	6,51	6,53	6,48	6,65	6,72
	66/33 (Т/Э)	6,47	6,51	6,50	6,49	6,38
Предварительная модификация битума	Термопласт	6,50	6,57	6,45	6,34	6,11
	Эластопласт	6,55	6,50	6,61	6,78	6,92
	33/66 (Т/Э)	6,46	6,53	6,59	6,61	6,69
	66/33 (Т/Э)	6,61	6,57	6,46	6,40	6,34

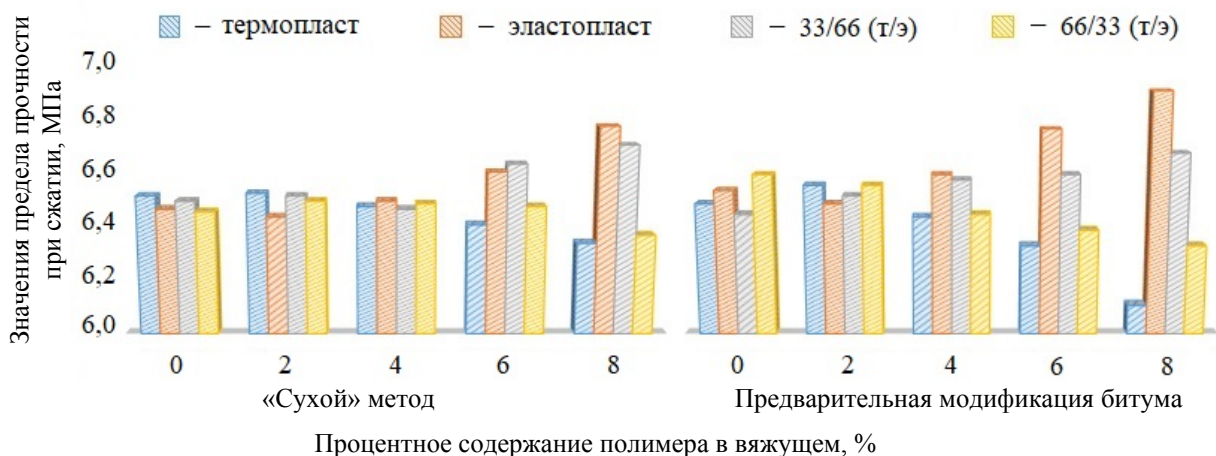


Рис. 6. Изменение максимальной структурной прочности смеси типа С

Fig. 6. Change in maximum structural strength of type C mixture

Таблица 6

Максимальная структурная прочность щебеночной мелкозернистой смеси типа Б

Maximum structural strength of crushed stone fine-grained mixture of type B

Метод доставки полимера в асфальтобетонную смесь.	Тип полимера	Значения показателя максимальной структурной прочности в зависимости от процентного содержания полимера в композиции вяжущего, МПа				
		0	2 %	4 %	6 %	8 %
«Сухой» метод	Термопласт	5,63	5,60	5,62	5,57	5,52
	Эластопласт	5,55	5,56	5,58	5,54	5,59
	33/66 (Т/Э)	5,58	5,61	5,57	5,64	5,66
	66/33 (Т/Э)	5,65	5,63	5,64	5,67	5,65
Предварительная модификация битума	Термопласт	5,49	5,52	5,44	5,31	5,09
	Эластопласт	5,60	5,57	5,62	5,75	5,89
	33/66 (Т/Э)	5,48	5,50	5,55	5,61	5,58
	66/33 (Т/Э)	5,56	5,53	5,59	5,51	5,48

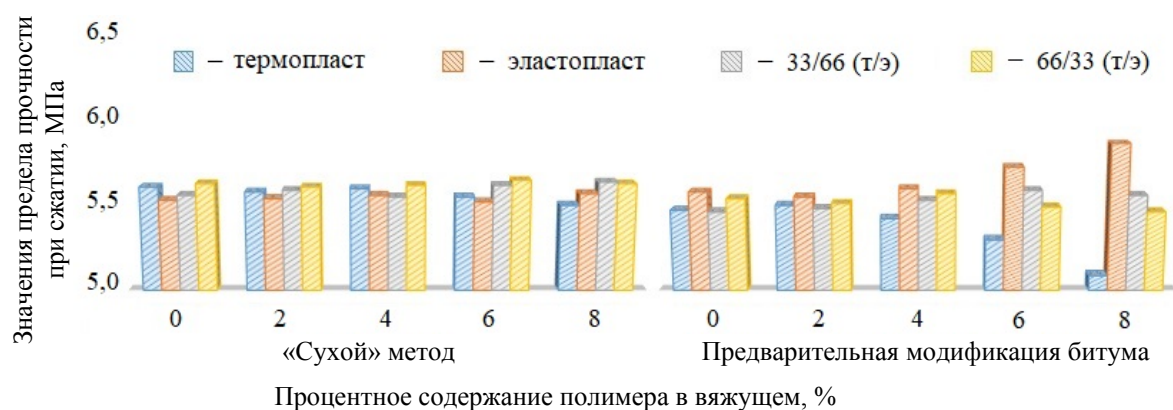


Рис. 7. Изменение максимальной структурной прочности смеси типа Б

Fig. 7. Change in maximum structural strength of type B mixture

Таблица 7

Значения водонасыщения стандартных образцов асфальтобетона

Water saturation values of standard concrete samples

Метод доставки полимера в асфальтобетонную смесь	Тип полимера	Значения показателя водонасыщения стандартного образца в зависимости от процентного содержания полимера в композиции вяжущего, %				
		0	2 %	4 %	6 %	8 %
1	2	3	4	5	6	7
Для щебеночной мелкозернистой смеси типа С						
«Сухой» метод	Термопласт	2,55	2,49	2,67	2,76	2,81
	Эластопласт	2,38	2,44	2,41	2,58	2,63
	33/66 (Т/Э)	2,46	2,51	2,48	2,57	2,69
	66/33 (Т/Э)	2,61	2,60	2,64	2,69	2,74

1	2	3	4	5	6	7
Предварительная модификация битума	Термопласт	2,69	2,73	2,89	3,34	4,53
	Эластопласт	2,54	2,52	2,66	2,83	3,19
	33/66 (Т/Э)	2,55	2,59	2,71	2,89	3,34
	66/33 (Т/Э)	2,39	2,42	2,76	3,04	4,25
Для щебеночной мелкозернистой смеси типа Б						
«Сухой» метод	Термопласт	1,87	1,76	1,81	2,08	2,37
	Эластопласт	1,73	1,77	1,70	1,74	1,92
	33/66 (Т/Э)	1,76	1,83	1,74	1,86	2,03
	66/33 (Т/Э)	1,79	1,85	1,93	2,15	2,24
Предварительная модификация битума	Термопласт	1,75	1,92	2,28	2,77	4,16
	Эластопласт	1,84	1,83	1,96	2,09	2,29
	33/66 (Т/Э)	1,88	1,85	2,04	2,17	3,05
	66/33 (Т/Э)	1,81	1,86	2,11	2,54	3,72

Показатель водонасыщения стандартных образцов щебеночных мелкозернистых асфальтобетонов типа С и Б значительно вырос при увеличении концентрации полимера методом предварительной модификации битума, при этом влияние эластопласта на этот показатель было практически минимальным, что отражено

на рис. 8 и 9. Это объясняется тем, что относительно высокие концентрации термопластов влияют на удобоукладываемость смеси [18], делая вяжущее значительно жестче, что также влияет на хрупкость асфальтобетона, которая была продемонстрирована при испытаниях по определению максимальной структурной прочности.

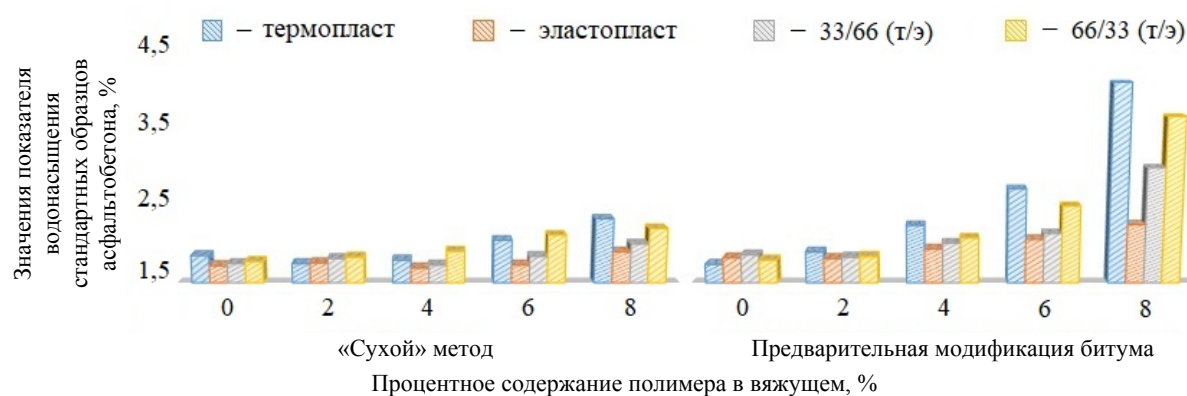


Рис. 8. Изменение водонасыщения асфальтобетона типа Б

Fig. 8. Change in water saturation of type B asphalt concrete

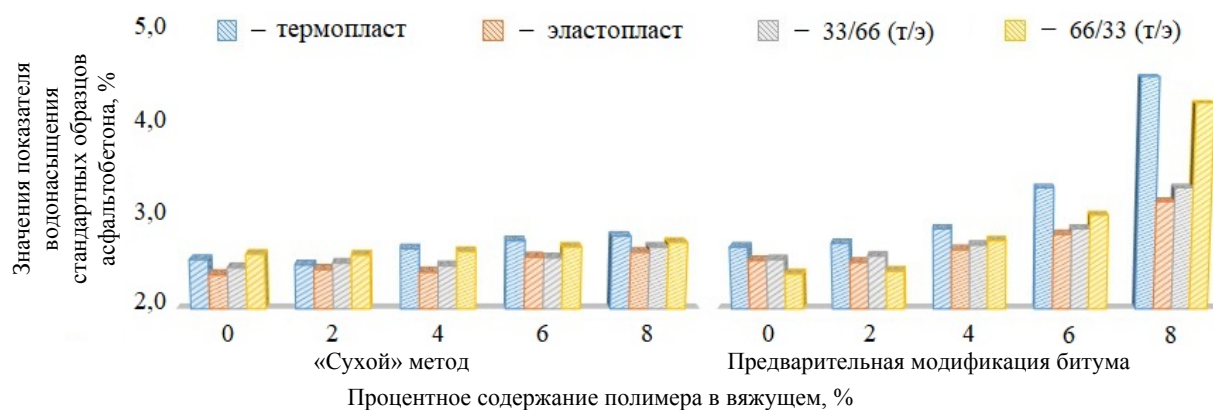


Рис. 9. Изменение водонасыщения асфальтобетона типа С

Fig. 9. Change in water saturation of type C asphalt concrete

При этом в отличие от прошлых испытаний толщина пленки битума не имеет весомого влияния на жесткость материала, так как удобоукладываемость асфальтобетонной смеси и коррелируемый с ним показатель водонасыщения стандартного образца относятся, скорее, к технологическим свойствам асфальтобетона, чем к физическо-механическим. Таким образом, можно утверждать, что присутствие большого количества термопласта в составе вяжущего, приводя к росту показателя водонасыщения, оказывает негативное воздействие на формирование в асфальтобетоне как матрицы вяжущего, так и каркаса каменного материала. Это непосредственно влияет и на все остальные свойства асфальтобетона, ухудшая их. Поэтому при применении модифицированной асфальтобетонной смеси особое внимание следует уделять ее температуре при укладке и технологическому регламенту уплотнения материала [19].

ВЫВОДЫ

1. Предварительная модификация битума является наиболее выгодной с точки зрения расхода полимерного материала, что связано с оптимальным его распределением по всему объему смеси и, как следствие, равномерно-стью изменения свойств покрытия, исключением вероятности конгломерации модифицированного вяжущего в процессе производства асфальтобетонной смеси, ее укладки и уплотнения, исключением эффекта сегрегации.

2. Выявлены изменения технологических свойств асфальтобетонной смеси на примере изменения показателя водонасыщения стандартных образцов при относительно высоких концентрациях термопластичных полимеров в асфальтобетонных смесях, которые могут приводить к снижению всех свойств асфальтобетонных. Также введение термопласта в состав смеси в количестве, относительно «мокрого» способа модификации, свыше 4 % приводит к увеличению хрупкости асфальтобетона и, как следствие, снижению его максимальной структурной прочности, что может отразиться на устойчивости материала покрытия к коррозионным разрушениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько [и др.]. Минск: Арт Дизайн, 2015. 296 с.
2. Проектирование дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов. ТКП 45-3.03-3-2004 / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2005. 54 с.
3. Смесей асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия: СТБ 1033-2016. Введ. 27.01.2016. Минск: М-во архит. и строительства Респ. Беларусь, 2016. 27 с.
4. Веренько, В. А. Надежность дорожных одежд. Минск: БГПА, 2002. 120 с.
5. Duarte, G. M. Asphalt Concrete Mixtures Modified with Polymeric Waste by the Wet and Dry Processes: A Literature Review / G. M. Duarte, A. L. Faxina // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 312. P. 125408. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125408>.
6. Comparison of Asphalt Mixtures Containing Polymeric Compounds and Polymer-Modified Bitumen Based on the VECD Theory / S. Spadoni [et al.] // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 349. P. 128725. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128725>.
7. Utilisation of Plastic Waste as Aggregate in Construction Materials: A review / N. H. Zulkernain [et al.] // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 296. P. 123669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123669>.
8. Acosta, E. Hildebrand-Assessed Margules (HAM) Interaction Parameter: Applications to Surfactant and Polar Oil Partition / E. Acosta // Fluid Phase Equilibria. 2023. Vol. 565. P. 113649. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2022.113649>.
9. Fan, H. Dynamic Response of a Multi-Layered Pavement Structure with Subgrade Modulus Varying with Depth Subjected to a Moving Load / H. Fan, J. Zhang, J. Zheng // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2022. Vol. 160. P. 107358. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107358>.
10. Смесей асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний: СТБ 1115-2013. Введ. 31.10.2013. Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2013. 39 с.
11. Веренько, В. А. Новые материалы в дорожном строительстве: учеб. пособие. Минск: Технопринт, 2004. 169 с.
12. Yu, S. Data sensing and Compaction Condition Modeling for Asphalt Pavements / S. Yu, S. Shen, M. Lu // Automation in Construction. 2023. Vol. 154. P. 105021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105021>.
13. Qasim, Z. I. Evaluation of Mixing and Compaction Temperatures (MCT) for Modified Asphalt Binders Using Zero Shear Viscosity and Cross-Williamson model / Z. I. Qasim, A. H. Abed, K. A. Almomen // Case Studies in Construction Materials. 2019. Vol. 11. P. e00302. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00302>.
14. Основы научных исследований: учебн. для техн. вузов / В. И. Крутов [и др.] / под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. М.: Высш. шк., 1989. 400 с.
15. Dalhat M. A. Recycling of Different Plastics in Asphalt Concrete / M. A. Dalhat, K. Al-Adham, M. A. Habib // Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete. Woodhead Publishing, 2019. P. 287-305. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102676-2.00013-X>.
16. Sengoz, B. Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen / B. Sengoz, G. Isikyakar // Construction and Building Materials. 2008.

- Vol. 22, Iss. 9. P. 1897–1905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013>.
17. Silane Crosslinkable Polyethylene Waste as Bitumen Modifier: A New Fortunate Destiny by in Time Recycling of thermoplastic Waste Before Conversion to Thermoset End-of-Life Unrecyclable Polymer / N. M. Sarkari [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 287. P. 122999. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122999>.
 18. Almusawi, A. Evaluation of Mechanical Properties of Different Asphalt Concrete Types in Relation with Mixing and Compaction Temperatures / A. Almusawi, B. Sengoz, A. Topal // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 268. P. 121140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121140>.
 19. Laboratory Investigation of Compaction Characteristics and Performance of Warm Mix Asphalt Containing Chemical Additives / L. Mo [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 37. P. 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.074>.
 20. Krutov V. I., Grushko I. M., Popov V. V., Savel'ev A. Ya., Sumarokov L. N., Venikov V. A., Kogdov N. M., Timofeeva O. V., Chus A. V., Momot A. I. (1989) *Fundamentals of Scientific Research*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 400 (in Russian).
 21. Verenko V. A. (2002) *Reliability of Road Pavements*. Minsk, Belarusian State Polytechnical Academy. 120 (in Russian).
 22. Duarte G. M., Faxina A. L. (2021) Asphalt Concrete Mixtures Modified with Polymeric Waste by the Wet and Dry Processes: A literature Review. *Construction and Building Materials*, 312, 125408. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125408>.
 23. Spadoni S., Ingrassia L.P., Mocelin D., Kim Y.R., Canestrari F. (2022) Comparison of Asphalt Mixtures Containing Polymeric Compounds and Polymer-Modified Bitumen Based on the VECD Theory. *Construction and Building Materials*, 349, 128725. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128725>.
 24. Zulkernain N. H., Gani P., Chuan N. C., Uvarajan T. (2021) Utilisation of Plastic Waste as Aggregate in Construction Materials: A review. *Construction and Building Materials*, 296, 123669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123669>.
 25. Acosta, E. (2023) Hildebrand-Assessed Margules (HAM) Interaction Parameter: Applications to Surfactant and Polar oil partition. *Fluid Phase Equilibria*, 565, 113649. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2022.113649>.
 26. Fan H., Zhang J., Zheng J. (2022) Dynamic Response of a Multi-Layered Pavement Structure with Subgrade Modulus Varying with Depth Subjected to a Moving Load. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 160, 107358. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107358>.
 27. STB 1115-2013. *Asphalt Concrete Road, Airfield and Asphalt Concrete Mixtures. Test Methods*. Minsk, Publishing House of the State Standard of the Republic of Belarus, 2013. 39 (in Russian).
 28. Verenko V. A. (2004) *New Materials in Road Construction*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 169 (in Russian).
 29. Yu S., Shen S., Lu M. (2023) Data Sensing and Compaction Condition Modeling for Asphalt Pavements. *Automation in Construction*, 154, 105021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105021>.
 30. Qasim Z. I., Abed A. H., Almomen K. A. (2019) Evaluation of Mixing and Compaction Temperatures (MCT) for Modified Asphalt Binders Using Zero Shear Viscosity and Cross-Williamson Model. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00302. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00302>.
 31. Krutov V. I., Grushko I. M., Popov V. V., Savel'ev A. Ya., Sumarokov L. N., Venikov V. A., Kogdov N. M., Timofeeva O. V., Chus A. V., Momot A. I. (1989) *Fundamentals of Scientific Research*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 400 (in Russian).
 32. M. A. Dalhat, Khaleel Al-Adham, M. A. Habib. Recycling of Different Plastics in Asphalt Concrete // Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete. 2019. Vol. 476. P. 287–305.
 33. Sengoz B., Isikyakar G. (2008) Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen. *Construction and Building Materials*, 22 (9), 1897–1905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013>.
 34. Sarkari N. M., Ayar P., Oskoue M. H., Khosrowshahi F. K., Mohseni M. (2021) Silane Crosslinkable Polyethylene Waste as Bitumen Modifier: A New Fortunate Destiny by in Time Recycling of Thermoplastic Waste Before Conversion to Thermoset End-of-Life Unrecyclable Polymer. *Construction and Building Materials*, 287, 122999. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122999>.
 35. Almusawi A., Sengoz B., Topal A. (2021) Evaluation of Mechanical Properties of Different Asphalt Concrete Types in Relation With Mixing and Compaction Temperatures. *Construction and Building Materials*, 268, 121140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121140>.
 36. Mo L., Li X., Fang X., Huurman M., Wu S. (2012) Laboratory Investigation of Compaction Characteristics and Performance of Warm Mix Asphalt Containing Chemical Additives. *Construction and Building Materials*, 37, 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.074>.

Received: 17.08.2023

Accepted: 21.11.2023

Published online: 29.03.2024

REFERENCES

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-151-162>

UDC 629.331.03-83-592.3

The Influence of Road Adhesion Coefficient on Energy Consumption and Dynamics of Battery Electric Vehicles

Le Thanh Nhan¹⁾, Dam Hoang Phuc¹⁾, Le Hue Tai Minh^{1, 2)}, S. V. Kharytonchyk³⁾,
V. A. Kussyak³⁾, Nguyen Thanh Cong⁴⁾

¹⁾Hanoi University of Science and Technology (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),

²⁾University of Science and Technology of Hanoi (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),

³⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

⁴⁾University of Transport and Communications (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Abstract. Currently, in economically developed countries, electric vehicles are considered as a solution to the problematic issue of reducing greenhouse gas emissions from road vehicles. The level of energy consumption is a critical factor in determining the overall performance of an electric vehicle. The article analyzes the influence of tire adhesion coefficient on the energy consumption of a battery electric vehicle when operating in typical standard driving cycles. In order to estimate the energy consumption during driving with different tire adhesion coefficients an electric vehicle longitudinal dynamic model is used, which allows taking into account various driving modes (Eco, Comfort, Sport) and sliding of the drive wheels in contact with the road surface. The proposed model, based on submodels of such main components of an electric vehicle as an electric motor and a traction battery, includes tire and vehicle body dynamics submodels, as well as a human-driver submodel with PID controller in the control circuit to track given trajectories. A series of experiments with the VinFast Vf e34 passenger electric vehicle on a dynamometer test bench were carried out to determine the electric motor's performance characteristics at various operating modes and identify many other input parameters for simulation and verifying the mathematical model accuracy. The simulation results of the distance traveled by an electric vehicle on a single charge are compared with the manufacturer's experimental data during operating the test vehicle in the standard European driving cycle. Simulation scenarios with different accelerating modes are proposed to analyze the influence of the adhesion coefficient on the EV's dynamic characteristics and the level of energy consumption. The simulation results on the determination of the energy consumed by an electric vehicle when moving in various driving cycles with road adhesion coefficients are presented in the activity. The given results show the significant impact of the adhesion coefficient on electric vehicle energy consumption in various standard driving cycles, especially on low-grip roads.

Keywords: battery electric vehicle, traction electric motor, energy consumption, tire adhesion coefficient, vehicle dynamics, standard European driving cycles, computer modeling

For citation: Le Thanh Nhan, Dam Hoang Phuc, Le Hue Tai Minh, Kharytonchyk S. V., Kussyak V. A., Nguyen Thanh Cong. (2024) The Influence of Road Adhesion Coefficient on Energy Consumption and Dynamics of Battery Electric Vehicles. *Science and Technique*. 23 (2), 151–162. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-151-162>

Адрес для переписки

Дам Хоанг Пхук
Ханойский университет науки и технологий
ул. Дай Ко Вьет, 1,
100000, г. Ханой, Вьетнам
Тел.: +84 932367577
Phuc.damhoang@hust.edu.vn

Address for correspondence

Dam Hoang Phuc
Hanoi University of Science and Technology
1, Dai Co Viet Street,
100000, Ha Noi, Viet Nam
Tel.: +84 932367577
Phuc.damhoang@hust.edu.vn

Влияние коэффициента сцепления шин с дорогой на потребляемую энергию и динамику аккумуляторных электромобилей

Асп. Ле Тхань Нань¹⁾, канд. техн. наук, доц. Дам Хоанг Пхук¹⁾, асп. Ле Хуэ Тай Минь^{1, 2)}, докт. техн. наук, проф. С. В. Харитончик³⁾, кандидаты техн. наук, доценты В. А. Кусяк³⁾, Нгуен Тхань Конг⁴⁾

¹⁾Ханойский университет науки и технологий (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),

²⁾Университет науки и технологий Ханоя (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),

³⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

⁴⁾Университет транспорта и коммуникаций (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам)

Реферат. В настоящее время в экономически развитых странах электромобили рассматриваются как решение проблемного вопроса по сокращению выбросов парниковых газов от мобильных транспортных средств. Уровень потребляемой энергии электромобилем является решающим фактором, определяющим общую производительность транспортного средства на электрической тяге. В статье анализируется влияние коэффициента сцепления шин с дорогой на потребляемую энергию аккумуляторным электромобилем при эксплуатации в типичных стандартных ездовых циклах. Для оценки потребляемой энергии при движении с различными коэффициентами сцепления шин используется продольная динамическая модель электромобиля, позволяющая учитывать различные режимы вождения («эко», «комфорт», «спорт») и скольжение ведущих колес в контакте с дорожным покрытием. Разработанная модель, построенная на основе субмоделей таких основных компонентов электромобиля, как электрический двигатель и тяговая аккумуляторная батарея, включает субмодели динамики шин и кузова, а также субмодель логики действий водителя с ПИД-регулятором в цепи управления для отслеживания заданных траекторий движения транспортного средства. Для определения внешних рабочих характеристик тягового электродвигателя на различных режимах работы силового агрегата и идентификации ряда других входных параметров для математического моделирования и оценки адекватности имитационной модели была проведена серия экспериментов с легковым электромобилем VinFast VF e34 на динамометрическом испытательном стенде. Результаты моделирования по максимальному пройденному расстоянию электромобилем на одном заряде батареи сопоставляются с экспериментальными данными завода-производителя при эксплуатации испытуемого автомобиля в стандартном европейском ездовом цикле. Предлагаются сценарии моделирования процессов разгона с различными режимами ускорения для анализа влияния коэффициента сцепления шин с дорогой на динамические характеристики электромобиля и уровень потребляемой энергии. Приводятся результаты компьютерных экспериментов по определению потребляемой электромобилем энергии при движении в различных ездовых циклах с различными коэффициентами сцепления шин с опорной поверхностью дорожного покрытия. Полученные результаты показывают значительное влияние коэффициента сцепления шин на расход потребляемой электромобилем энергии в различных ездовых циклах, особенно на дороге с низким коэффициентом сцепления.

Ключевые слова: аккумуляторный электромобиль, тяговый электродвигатель, потребляемая энергия, коэффициент сцепления шин с дорогой, динамика автомобиля, стандартные европейские ездовые циклы, компьютерное моделирование

Для цитирования: Влияние коэффициента сцепления шин с дорогой на потребляемую энергию и динамику аккумуляторных электромобилей / Ле Тхань Нань [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 2. С. 151–162. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-151-162>

Introduction

Given the current air pollution, electric vehicles (EVs) are currently considered as one of the solutions to reduce greenhouse gas emissions. Recently, many large companies have focused on developing environmentally friendly cars and have also achieved many successes with a large number EVs sold [1, 2]. However, the major problem with electric cars is that the distance traveled on a single charge does not meet consumers' needs. Many studies have been conducted on the EV's energy consumption (EC), such as the optimization of

energy management, vehicle's available energy usage [3–6], regenerative braking [7–9], and other operating parameters on EC [8, 10–12].

Research [3] shows that the combined use of two energy sources, namely supercapacitors and batteries, can extend battery life. The LQG control algorithm makes it possible to reduce the average current during vehicle operation by 18,9 % (from 34,3 A to 27,8 A), thus reducing energy consumption. However, this study did not consider the external condition's that influence on the EV's energy consumption.

In research [7], strategies for controlling the regenerative braking system during vehicle movement are proposed with different objectives. The research results show that the vehicle braking process from a velocity of 100 km/h to a complete stop with an optimal regenerative energy control strategy can increase the amount of regenerative energy by 84,4 % compared to the standard control strategy. In addition, the braking distance was 13,2 % shorter. This study also did not investigate the effectiveness of regenerative braking control strategies under low adhesion coefficient conditions.

The research [10] shows the influence of the driver on the energy consumption of the vehicle through real-time data collection and analysis. The article provides parameters to be evaluated by driving, which evaluates and analyzes the impact of these parameters on energy consumption. Nevertheless, the research was conducted only on roads with good adhesion coefficients. The research [11] also shows the significant dependence of the electric motor (EM) power demand and EC on the driving styles. However, these studies have only focused on energy issues in EVs themselves without considering the influence of external parameters on EC, especially the tire adhesion coefficient.

In terms of internal combustion engine (ICE) vehicles, studies on the adhesion coefficient mainly focus on its influence on dynamics control to enhance vehicle safety and efficiency [13–15], not on the vehicle's fuel or energy consumption in certain driving cycles.

Therefore, this article analyzes the influence of the tire adhesion coefficient on EV's energy consumption and dynamic characteristics when operating in different driving cycles. The research methodology consists of vehicle simulation in combination with real experiments to determine the input information and verify the accuracy of the model, thereby enabling surveys and analysis of the EV performance in various operating conditions. An EV longitudinal dynamic model with all of the EV powertrain components is built to study the vehicle dynamics performance and energy consumption in different road adhesion conditions. Real experiments on the dynamometer are performed to collect the input parameters for the simulation and verify the mathematical model's accuracy. Finally, the results of the vehicle dynamic characteristics and energy consumption after simulating by the proposed model on various roads with different tire adhesion coefficients are analyzed.

Research method

Vehicle simulation model. To achieve the purpose of the research the electric vehicle simulation model (Fig. 1) was developed, which includes the submodels of driving cycle, electric motor, traction battery, braking system, active/passive tires dynamics, and vehicle body dynamics [16]. The simulation of the EV operating process by given driving cycles can be done on the proposed model.

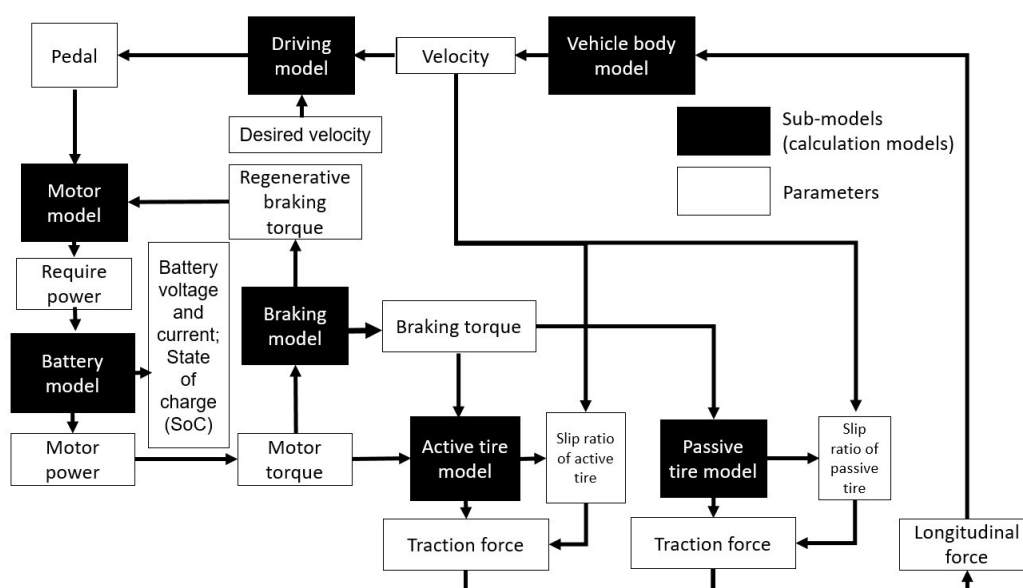


Fig. 1. Electric vehicle models

The above EV submodels were based on [7, 17], including the tire models to calculate the tire slip ratio, the battery model based on SOC percentage, the load-efficiency curve, and the relationship between the pedal signal and driving mode. Each submodel is described as follows.

The vehicle body dynamic submodel, based on the classic equations of ground vehicles theory, is shown in Fig. 2. The longitudinal forces of the vehicle (Fig. 3) include traction force F_{xf} , F_{xr} and rolling resistance F_{rf} , F_{rr} at the front/rear wheels respectively, aerodynamic resistance F_{r_air} , slope resistance F_{hc} with slope angle α , EV's inertia and are described in detail in the literature [18].

According to Fig. 3, the longitudinal dynamic of the vehicle is expressed:

$$(m + m_e)\dot{V} = (F_{xf} + F_{xr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_{r_air} + F_{hc}), \quad (1)$$

where m and m_e are respectively the EV's mass and the equivalent mass of the electric drive rotating parts, kg; $\dot{V}$ is the vehicle acceleration, m/s².

$$m_e = \frac{1}{r_{wh}^2} \{ J_{fwh} + J_{fd} + J_{gb} i_{fd}^2 + J_m u_{gb}^2 i_{fd}^2 \}, \quad (2)$$

where J_{fwh} , J_{fd} , J_{gb} , J_m are the inertia moment respectively of the front wheel assembly, final drive,

transmission system, and electric motor, kg·m²; i_{fd} is the final drive's transmission ratio, u_{gb} is the gearbox ratio.

Front and rear wheel dynamic submodels as well as the forces acting on them are shown in Fig. 4–7. The dynamic model of the active front wheel can be calculated by the following equation [18]:

$$J_{fwh} \dot{\omega}_{fwh} = T_{fdin} - F_{xf} r_{wh} - F_{zf} e_f - T_{bf}, \quad (3)$$

where ω_{fwh} is the front wheel's angular velocity, rad/s; T_{fdin} , T_{bf} are respectively the wheel active torque and the front wheel brake torque, N·m; $e_f = f_{rf} r_{wh}$ is the eccentricity of normal force F_{zf} (Fig. 2) at the vehicle front wheels, m; f_{rf} is rolling coefficient of front wheel, r_{wh} is dynamic wheel radius, m.

The formula for calculating the torque from the electric motor to the active wheel is built as follows:

$$T_{fdin} = T_{motor} u_{gb} \eta_{gb} i_{fd} \eta_{fd}, \quad (4)$$

where T_{motor} is the motor torque, N·m; η_{gb} is the gearbox efficiency; η_{fd} is the final drive's transmission efficiency.

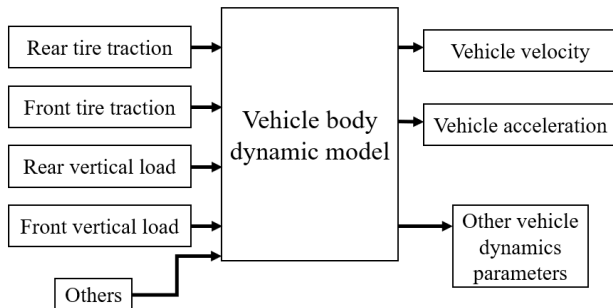


Fig. 2. Body vehicle dynamic model

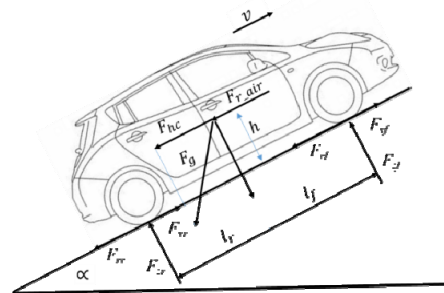


Fig. 3. The forces acting on the vehicle

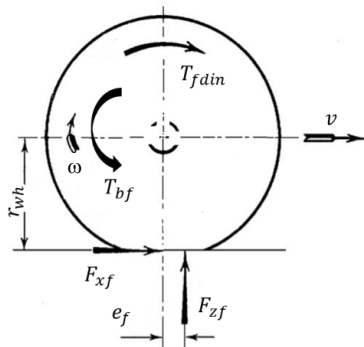


Fig. 4. The forces acting on the front wheel

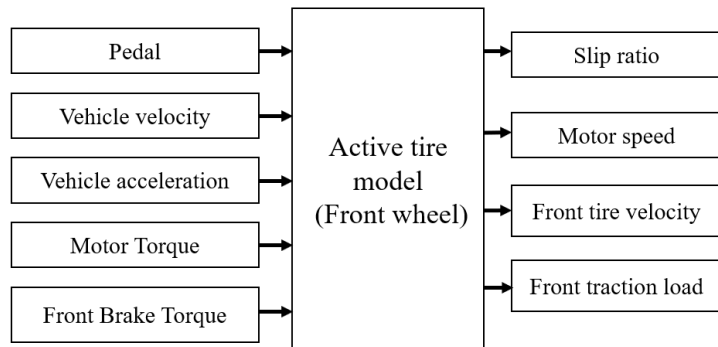


Fig. 5. Front wheel model

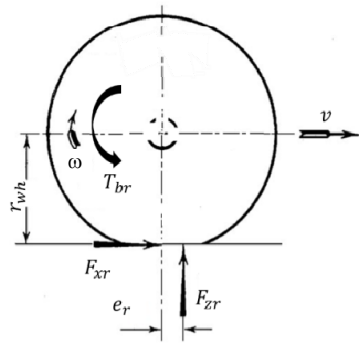


Fig. 6. The forces acting on the rear wheel

The total moment of inertia relative to the front wheel is calculated as follows:

$$J_{fwh} = J_{whf} + J_{fd} + J_{gb} i_{gb}^2 + J_m i_{fd}^2 u_{gb}^2. \quad (5)$$

The rear wheel is the driven wheel, hence the forces acting on it are shown in Fig. 6.

The dynamic model of the passive rear wheel can be illustrated by the following equation [18]:

$$J_{rwh} \dot{\omega}_{rwh} = F_{xr} r_{wh} - T_{br} + F_{zr} e_r, \quad (6)$$

where J_{rwh} is the total moment of inertia relative to the rear wheel, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, ω_{rwh} is the rear wheel's angular velocity, rad/s ; $e_r = f_{rr} r_{wh}$ is the eccentricity of normal force F_{zr} (Fig. 2) at the vehicle rear wheels, m ; f_{rr} is rolling coefficient of the rear wheel.

Tire submodel. According to the automotive theory [18], the maximum traction at the wheel is equal to the tire adhesive force. When the traction force provided by the electric motor acting on the wheel is higher than the adhesive force, a part of the traction force which is equal to the tire adhesive force propels the vehicle forward, while the rest is lost due to the tire slipping.

The equations for the calculation of the wheel slip ratio during the acceleration or braking process as well as the equations for determination of the corresponding traction forces F_{xf} and F_{xr} are well-known from the literary resource [18] and fully described in [7].

The reference slip ratio varies for the different tire characteristics and road adhesion conditions; therefore, to enhance the simulation accuracy a real-time reference slip ratio curve must be proposed. The relationship between the traction coefficient and tire slip ratio (Fig. 8) is determined empirically [7].

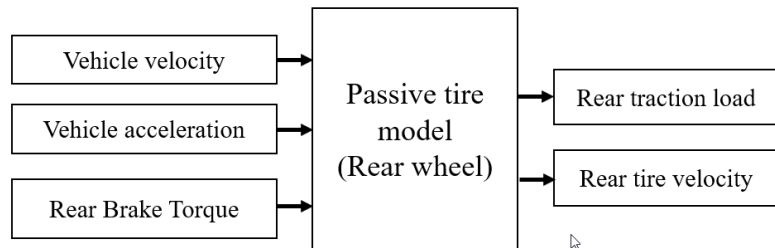


Fig. 7. Rear wheel model

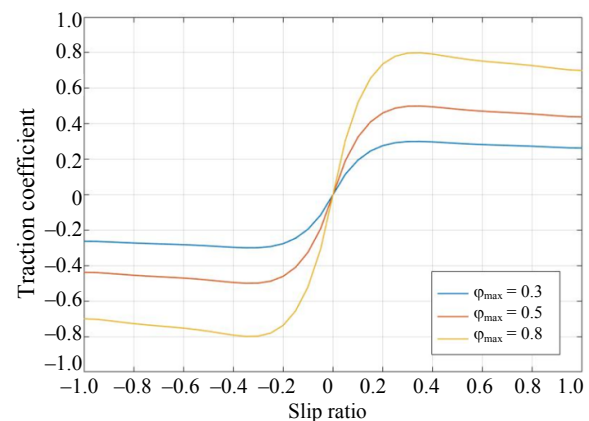


Fig. 8. The relationship between traction coefficient and tire slip ratio

Electric motor submodel based on the rotating permanent magnet electric motor (PMSM) with code number VFAAGB. The main PMSM's parameters and technical characteristics [19] and also the coefficients of piecewise function [17] for determining the efficiency in motor/generator mode are shown in Tab. 1 and 2.

Most electric motors are designed to run at 50 to 100 % of the rated load. Maximum efficiency is usually near 75 % of the rated load [20]. The efficiency of an electrical motor varies between 88 to 92 % for induction machines and from 93 to 95 % for synchronous motors [21].

The load and motor/generator efficiency relationship [17] are approximated by the piecewise function:

$$\text{efficiency}(x) = \frac{c_1 x + c_2}{x + c_3} \quad (0 \leq x < 0.25);$$

$$\text{efficiency}(x) = d_1 x + d_2 \quad (0.25 \leq x < 7.25); \quad (7)$$

$$\text{efficiency}(x) = e_1 x + e_2 \quad (x \geq 7.25),$$

where $x = \frac{P_{motor}}{P_{rated}}$ denotes the ratio of the motor's mechanical power (P_{motor}) to the rated power (P_{rated}).

Table 1

Electric motor's parameters

Parameters, dimensionality	Value
Mass, <i>kg</i>	90,6
Rated torque, <i>N·m</i>	160
Time to reach the peak motor power, <i>s</i>	3
Rated efficiency, %	97
Rated power, <i>kW</i>	75

Table 2

Piecewise function coefficient

Coefficient	Motor mode	Generator mode
c_1	0,942269	0,942545
c_2	0,000061	0,000067
c_3	0,006118	0,006732
d_1	0,060000	0,057945
d_2	0,905000	0,904254
e_1	0,076000	0,066751
e_2	1,007000	1,002698

Obtained by equation (7) the load-efficiency curves in motor and generator modes are shown in Fig. 9.

The electric motor's maximum torque ($T_{\max}$) is presented as a function of the angular velocity. In most cases, when the motor's angular velocity is small, the torque is at the maximum and constant value. When the electric motor reaches the angular velocity limit (ω_c), the torque starts decreasing. In a PMSM, the torque decreases linearly with the increase of the angular velocity. The motor's torque is reduced while the motor's power remains unchanged [22, 23].

When the electric motor's angular velocity is lower than the limit ($\omega \leq \omega_c$), the motor torque

reaches the maximum value $T_c = T_{\max}$. When the electric motor's angular velocity is higher than the limit ($\omega > \omega_c$), the motor torque is inversely proportional to the motor speed $T_c = \frac{T_{\max} \omega_c}{\omega}$.

The electric motor drive characteristics and also its angular speed determination diagram are shown in the Fig. 10, 11.

The motor torque varies non-linearly according to each driving mode (Eco, Comfort, Sport) and depends on the accelerator pedal position (P_{in}). Assuming the relationship between P_{in} and $T_{\max}$ is a quadratic function:

$$T_{motor} = (aP_{in}^2 + bP_{in} + c)T_{\max}. \quad (8)$$

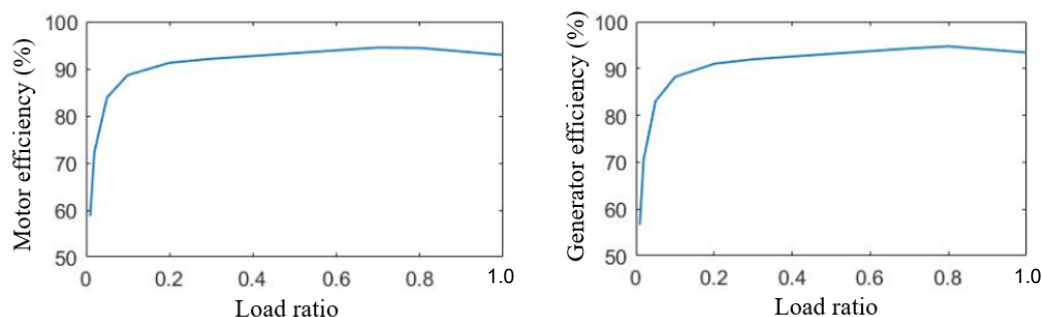


Fig. 9. The electric motor load-efficiency curve

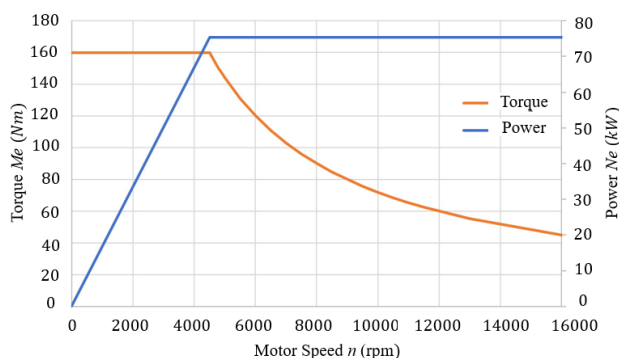


Fig. 10. The PMSM drive characteristics

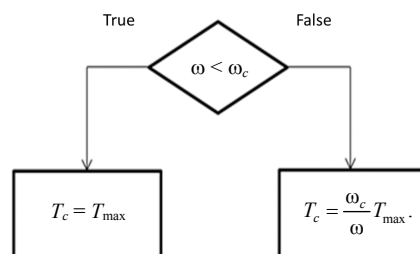


Fig. 11. The PMSM angular speed determination diagram

$$\text{Assuming: } \frac{T_{motor}}{T_{max}} = \%T_{max}.$$

$$\text{Therefore: } \%T_{max} = a(P_{in})^2 + bP_{in} + c. \quad (9)$$

In order to obtain the coefficients a , b , and c in different power unit driving modes, the real experiments on the dynamometer were conducted, the results of which are shown in this paper below.

Regenerative braking and battery submodels.

During regenerative braking, the electric motor performs as a generator, converting the vehicle's kinetic energy into electrical energy, which is recharged in the EV battery. The regenerative brake model (Fig. 12) is built based on [7].

The traction accumulator battery model is built based on the documents [7, 17]. The battery equivalent circuit (Fig. 13) does not directly model the chemical characteristics inside the battery system, but it simulates the overall battery operation to calculate approximately the battery output parameters.

The driving cycle submodel provides the pedal signal by PID controller (Fig. 14). The driving cycle

data are the standard driving cycles according to European standards with the following information: speed versus time, acceleration, and distance. These driving cycles are used to evaluate the EV's operating efficiency through energy consumption.

The input signal of this submodel (the variation between the desired and actual vehicle's speed) is processed in PID regulator to produce an output signal for simulating the driver's accelerator position with a value ranging from -1 to 1 corresponding to the combination of the actual acceleration signal (from 0 to 1) and the actual braking signal (from -1 to 0).

Dynamometer test results and mathematical model verification. Real experiments with VinFast VF e34 passenger electric vehicle on a dynamometer test bench were carried out to determine the EV model input parameters and verify the mathematical model accuracy. Main vehicle technical specifications [19] are presented in Tab. 3, where the EV's mass center position was determined in the Automotive Dynamics Laboratory of the Hanoi University of Science and Technology (Vietnam).

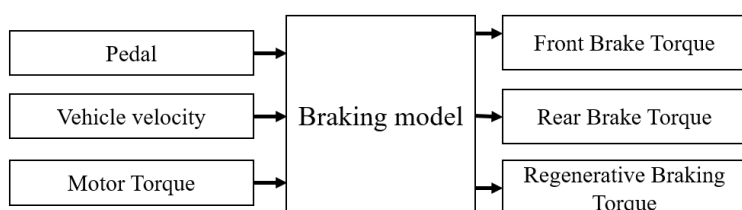


Fig. 12. Braking model

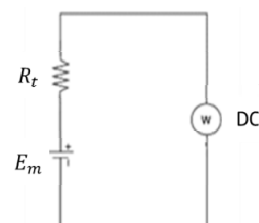


Fig. 13. Battery equivalent circuit:
 R_t – internal resistance; E_m – open circuit voltage,
DC – battery direct current

Table 3

Technical specifications of VF e34-2020

Parameters	Value
Curb weight, kg	1490
Wheelbase, mm	2610.8
Overall dimension ($L \times W \times H$), mm	4300×1768×1613
Tire code	215/45R18
Gearbox transmission ratio	10.42
Motor rated power, kW	75
Motor rated torque, N·m	160
Battery type	Li-on
Battery capacity, kW·h	41.58
Battery nominal voltage, V	400
Battery amperage, A·h	103.38
Gravity center/front axle distance, m	1.118
Gravity center/rear axle distance, m	1.493
Height of gravity center, m	0.649

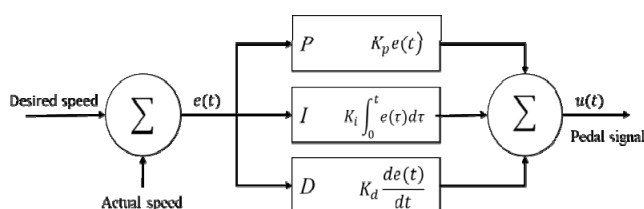


Fig. 14. Driving cycle submodel

The EV motor characteristics in different operating modes (Eco, Comfort, Sport) are determined on the AHS MULTIFLEX EASY dynamometer [24]. This stand allows the operator to adjust the wheel's drag power and to measure the drive wheel's velocity and tractive force (F_x) according to different accelerator pedal positions:

$$T_{motor} = \frac{F_x r_{wh}}{i\eta}, \quad (10)$$

where F_x is the traction force at the wheel, N ; i , η are the gear ratio and the efficiency of the transmission system; r_{wh} is the wheel radius, m .

Such experiments were conducted in different operating modes (Eco, Comfort, Sport) with two pedal positions of 50 and 100 %. The results of experiments (Tab. 4) were used for determination with the help of equations (8)–(9) of the relationship between the accelerator pedal position and motor torque in different driving modes (Fig. 15).

Table 4

Torque parameters of the electric motor

Eco			Comfort			Sport		
P_{in}	T_{motor} , $N \cdot m$	$\%T_{max}$	P_{in}	T_{motor} , $N \cdot m$	$\%T_{max}$	P_{in}	T_{motor} , $N \cdot m$	$\%T_{max}$
0.5	34	0.213	0.5	52	0.325	0.5	139	0.869
1	160	1	1	160	1	1	160	1

In order to verify the above-mentioned model's accuracy, some experiments were carried out to measure the power and longitudinal force on the vehicle's drive wheels at different driving speeds [24]. Then, these measurement results are compared with the simulation results to evaluate the model's accuracy.

Since the experimental devices cannot simulate the inertial force acting on the vehicle, the experi-

ments are performed in the zero inertial resistance condition or, in other words, at the constant velocity. The air and rolling resistance are constant and the slope resistance varies, but the total drag force at the constant speed in both simulation and experiment must be equal.

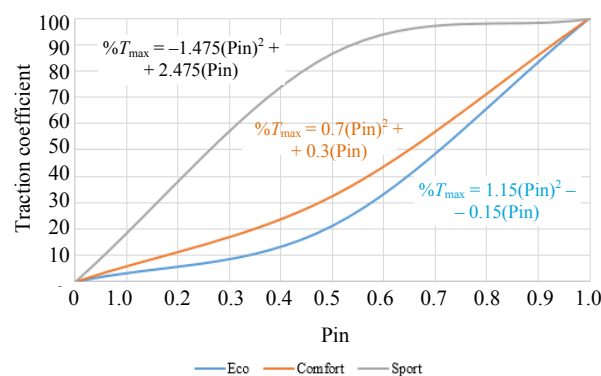


Fig. 15. The electric motor characteristics in several driving modes

During the different operating modes (Eco, Comfort, Sport) the accelerator pedal is held at 50 %, according to the data obtained from the OBD-II communication port, and the wheel load varies to achieve the desired speed. The simulation and experimental results are shown in Tab. 5.

The experimental and simulated results show a large deviation (less than 10 %) when the vehicle is running in the SPORT mode, and this deviation increases as the vehicle velocity gets higher. This is due to the slip on the dynamometer's rollers when the motor generates high torque and power. In the other driving modes, the deviation between the simulation and the experiment's results is low and does not exceed 4 % thus ensuring the accuracy of the EV model and its reliability for future research.

Table 5

Simulation and experimental results

Operating modes	V , km/h			F_x , N			P , kW		
	Simulation	Experiment	Error (%)	Simulation	Experiment	Error (%)	Simulation	Experiment	Error (%)
Eco	75.94	76	0.08	640.2	640	0.03	13.50	14	3.54
	62.20	62	0.32	779.1	800	2.61	13.46	13.8	2.46
	53.80	54	0.37	897.9	900	0.23	13.42	13.8	2.76
Comfort	77.90	78	0.12	1023	1000	2.30	22.14	22	0.64
	60.80	60	0.45	1302	1300	0.15	21.99	22	0.05
	51.24	51	0.47	1448	1400	3.43	20.60	20	3.05
Sport	81.66	82	0.41	2254	2460	8.37	51.10	56.0	8.75
	66.80	67	0.30	2760	2950	6.44	51.20	54.9	6.72
	46.70	47	0.64	3780	4050	6.67	49.00	52.9	7.26

Besides, the EV model's accuracy was evaluated by comparison in terms of the NEDC vehicle driving distance at a full battery charge in simulation mode and real experiments. According to VinFast technical information [25] passenger electric vehicle VF e34 can travel in the NEDC a distance of 285 km on a full battery state of charge (100 % SOC). In order to measure the maximum VF e34 driving NEDC distance the simulation was repeated many times until the battery's SOC dropped up to 0 %. The results of such an experiment show a small deviation of less than 5 % between the NEDC driving distance of 272,14 km in simulation mode and VinFast manufacturer's claim of 285 km, which confirms the high accuracy of the EV model. Hence, this model is reliable for performing further vehicle evaluation.

Simulation results

The proposed EV model is used to analyze the influence of the adhesion coefficient on the EV's energy consumption and driving dynamics in the following cases: acceleration based on RAMP-pattern [26] or operation in standard driving cycles.

Acceleration based on RAMP-pattern. The EV's acceleration from 0 to 100 km/h with dif-

ferent RAMP levels (t_{ramp}) in Comfort driving mode with different road adhesion coefficients of 0.3, 0.5, and 0.8 were investigated. In this case, the time t_{ramp} required to increase the accelerator level from 0 to 1 was varied in the range from 2 to 16 seconds with 2-second intervals. The adhesion coefficient's influence on vehicle dynamics is analyzed based on 2 criteria: acceleration time and energy consumption. The simulation results of the acceleration tests with different adhesion coefficients are shown in Fig. 16, 17.

As can be seen from the research results the acceleration time required for the vehicle to reach 100 km/h increases with the rise of the RAMP step (t_{ramp}). However, the vehicle consumes less energy as the RAMP step increases. On the roads with a high adhesion coefficient of 0.8 the acceleration time difference between extreme RAMP values is approximately 10 s, which is 56.4 % (the acceleration time is 16.2 s with 2 s-RAMP step and 25.34 s with 16 s-RAMP step). In this case, from the point of energy consumption view, there is no significant difference in terms, only 0.07 km/(kW·h), which is 8.0 %. This shows that under conditions with a high adhesion coefficient, the RAMP step shows less impact on the EV's energy consumption.

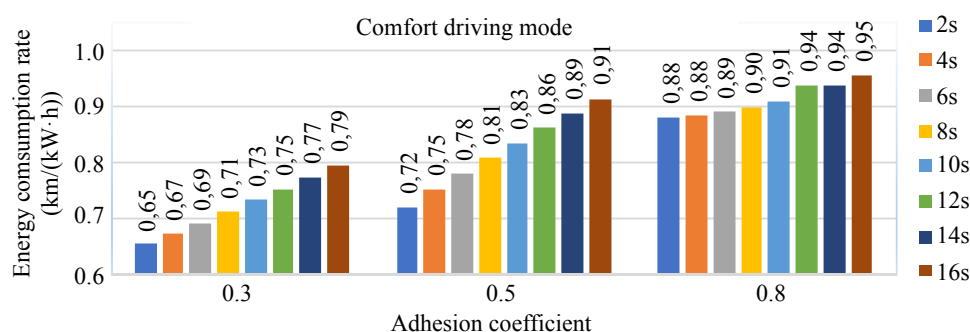


Fig. 16. Energy consumption comparison chart at RAMP-pattern EV acceleration

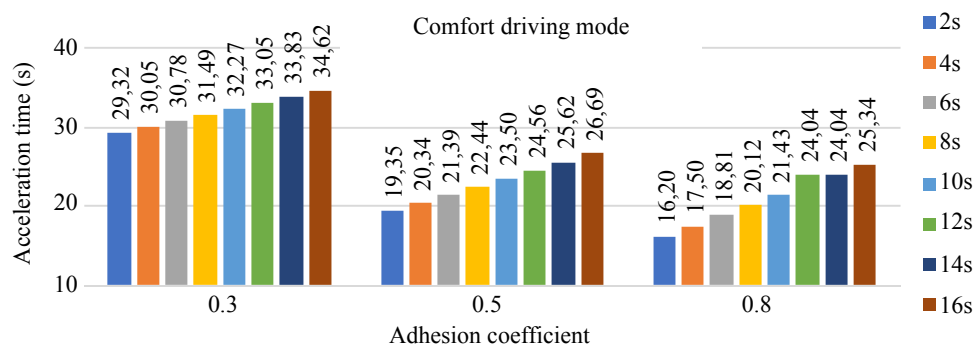


Fig. 17. Acceleration time comparison chart at RAMP-pattern EV acceleration

On roads with a low adhesion coefficient of 0.3, in which the wheels are prone to slipping, the variation of acceleration times between the lowest and highest RAMP steps are almost halved of those in a high adhesion coefficient condition (acceleration time in 2 s-RAMP step is only about 5.3 s longer than 16 s-RAMP step, corresponding to 18.1 %), but the energy consumption is twice as high as that in the high adhesion coefficient condition, at 0.14 km/(kW·h) (corresponding to 21,5 %). This shows that under the low adhesion coefficient condition, the acceleration method does not have much influence on the acceleration time.

The above test results are fully compatible with the laws of physics when vehicles run on roads with different adhesion coefficients.

Road adhesion coefficient impact on EV's energy consumption in different driving cycles. The time-speed graph of the standard driving cycles [27, 28], such as HWFET, ArtURBAN, NEDC and NYCC, are presented in Fig. 18. The characteristic parameters [29] of the above driving cycles are shown in Tab. 6.

Based on the above presented information the EV's energy consumption in different standard driving cycles was investigated in order to evaluate the EV's energy saving capability in Comfort driving mode with different adhesion coefficients. The simulation results of the energy consumption rate are shown in Fig. 19.

The research results shows that on the road with a high adhesion coefficient of 0.8 the low tire slipping ratio occurs. Hence, the energy consumption slightly changed under different driving cycles, ranging from 6.06 to 6.53 km/(kW·h). Thus, the EV's energy economy is stable under different operating conditions.

On roads with low adhesion coefficients of 0.5 and 0.3, the energy consumption rate dropped significantly in the inner-city driving cycles (NYCC and ArtUrban). On the road with an adhesion coefficient of 0.5 the energy consumption is half of that in the high adhesion coefficient. On the road with an adhesion coefficient of 0.3 the energy consumption is even lower, about one-fifth of that in the high adhesion coefficient. In contrast, in the high-speed driving cycles (HWFET and NEDC), the energy consumption is similar to those in the high adhesion coefficient condition.

The variation in the energy consumption in the NYCC and ArtUrban when varying the adhesion coefficient can be explained as follows: Those urban driving cycles have low average speed, velocity ratio and high acceleration characteristics (Tab. 6), so the RAMP steps are small at each acceleration and braking, which means that the vehicle operates under continuous acceleration and braking conditions. At this time energy is consumed due to the tire slipping when the road's adhesion coefficient is low.

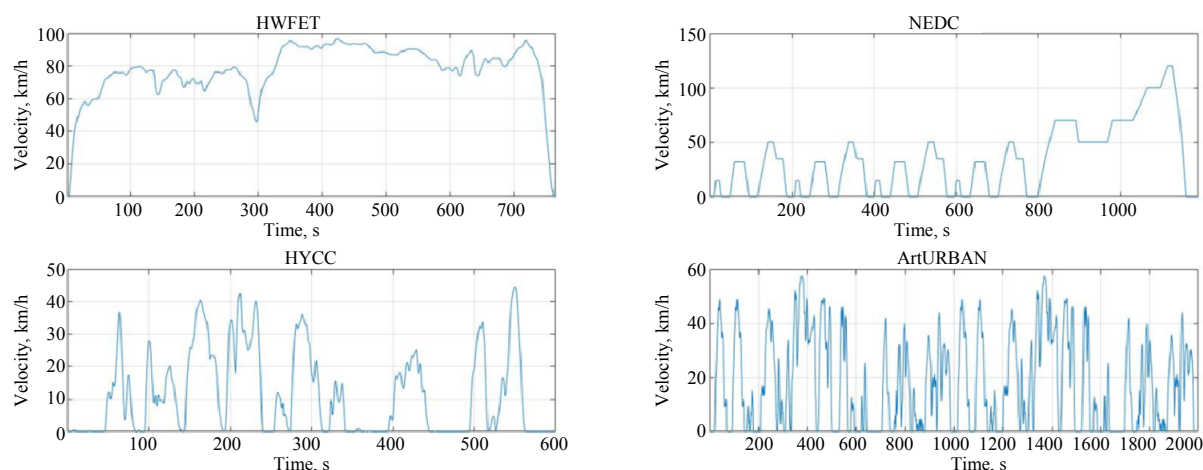


Fig. 18. Survey driving cycles

Table 6

Characteristic parameters of the standard driving cycles

Driving Cycle	Average velocity V_{avg} , m/s	Root-mean-cube velocity V_{rms} , m/s	Velocity ratio Λ	Characteristic acceleration $\ddot{a}$, m/s ²
NYCC	3.16	5.73	1.81	0.293
HWFET	21.45	22.22	1.04	0.069
NEDC	9.18	14.89	1.62	0.112
ArtURBAN	4.90	7.93	1.62	0.313

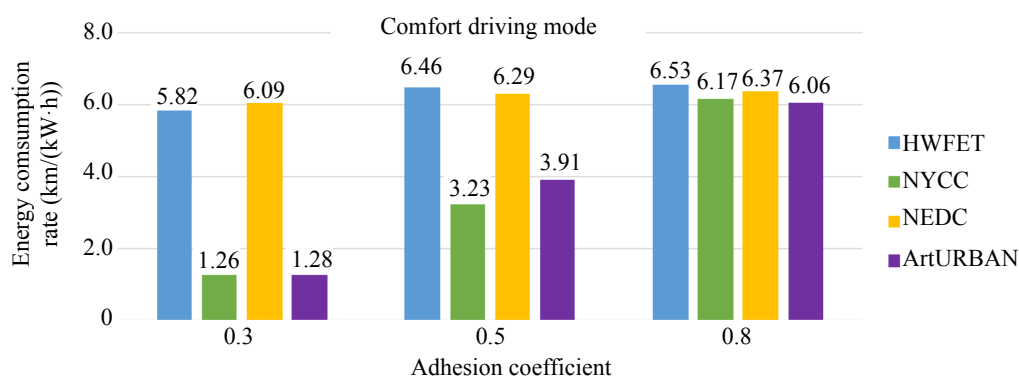


Fig. 19. Energy consumption rate at different driving cycles

In the high-speed driving cycle (HWFET) the first acceleration phase is a small RAMP step, while the rest of the driving cycle shows stable acceleration and speed, hence the energy consumption is independent of the road adhesion coefficient. In the NEDC cycle, although acceleration and braking are frequent, the tire slipping occurs less frequently, even in the low adhesion coefficient due to high RAMP steps. Therefore, high energy consumption is achieved even in low adhesion coefficient roads.

CONCLUSIONS

1. The EV model with different driving modes was built and its results were compared with the empirical data for the model's verification. The error between the simulation and experiment in terms of the driving distance in NEDC is less than 10 %, and those errors in terms of tire dynamics are less than 4% with ECO driving mode and less than 9 % with SPORT driving mode. These aforementioned number ensures the model's accuracy and its possibility for further research about the vehicle dynamics and energy efficiency comparison with different tire adhesion coefficients without conducting complex experiments.

2. Simulation results show that on a road with a high adhesion coefficient of 0.8 the acceleration time from 0 to 100 km/h depends heavily on the driver's depression intensity on the accelerator pedal, with a maximum variation of up to 56.4 %; however, the energy consumption is less dependent on the acceleration time, with the maximum variation of 8.0 %. In contrast, on a road with a low adhesion coefficient, the acceleration time is less dependent on the driver's depression intensity on the accelerator pedal, with a maximum variation of up to 18.1 %; however, the energy consumption

is more dependent on the acceleration time, with the maximum variation of 21.5%, which is twice more than that on high adhesion coefficient road.

3. On standard driving cycles with high traction coefficients, there is not much difference in energy consumption, which shows the stable operation of EVs in different traffic conditions. On driving cycles with high braking frequency and acceleration, such as NYCC and ArtURBAN, the energy consumption fluctuates considerably to the decrease of the adhesion coefficient, with a maximum variation of five times; however, on the driving cycles with low braking frequency and acceleration, such as HWFET and NEDC, there are no significant changes in the energy consumption.

Funding: This research was funded by the Hanoi University of Science and Technology, grant number T2023-PC-023.

REFERENCES

1. Bloomberg New Energy Finance. *Electric Vehicle Outlook 2021 Executive Summary* Available at: <https://bnef.turtl.co/story/evo-2021/page/1?teaser=yes> (accessed 05 December 2023).
2. Le V. N., Dam H. P., Duong N. K., Hoang M. H. (2022) An Average Method for Calculating the Vehicle Energy Consumption on Driving Cycles. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 16, 610–619. <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i12.22954>.
3. Adrian F., Antoneta I. B., Iulian M., Seddik B. (2012) Energy Management System within Electric Vehicles Using Ultracapacitors: An LQG-Optimal-Control-Based Solution. *IFAC Proceedings Volumes*, 45 (25), 229–234. <https://doi.org/10.3182/20120913-4-IT-4027.00033>.
4. Liu K., Wang J., Yamamoto T., Morikawa T. (2018) Exploring the Interactive Effects of Ambient Temperature and Vehicle Auxiliary Loads on Electric Vehicle Energy Consumption. *Applied Energy*, 227, 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.074>.
5. Viswanathan V., Palaniswamy L. N., Leelavinodhan P. B. (2019) Optimization Techniques of Battery Packs Using

- Re-Configurability: A Review. *Journal of Energy Storage*, 23, 404–415. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.002>.
6. Zhu W. (2022) Optimization Strategies for Real-Time Energy Management of Electric Vehicles Based on LSTM Network Learning. *Energy Reports*, 8 (8), 1009–1019. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.349>.
 7. Le V. N., Dam H. P., Nguyen T. H., Kharitonchik S. V., Kussyak V. A. (2023) Research of Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (2), 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-105-123>.
 8. Andreas B., Wolfgang R. (2017) The influence of Driving Patterns on Energy Consumption in Electric Car Driving and the Role of Regenerative Braking. *Transportation Research Procedia*, 22, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.024>.
 9. Revathy R., Balaji B., Mohasin A. K. A., Gobinath A. (2023) Supercapacitor and BLDC Motor-Based Regenerative Braking for an Electric Vehicles. *2nd International Conference on Smart Technologies and Systems for Next Generation Computing (ICSTSN)*. Villupuram, India, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSTSN57873.2023.10151546>.
 10. Kubaisi R., Gauterin F., Giessler M. (2014) A Method to Analyze Driver Influence on the Energy Consumption and Power Needs of Electric Vehicles. *IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*. Florence, Italy, 1–4. <https://doi.org/10.1109/IEVC.2014.7056215>.
 11. Carreón-Sierra S., Salcido A. (2022) Effects of Driving Style on Energy Consumption and CO₂ Emissions. *Collective Dynamics*, 7, 1–34. <https://doi.org/10.17815/CD.2022.137>.
 12. Rodolfo R. (2020) A Study on the Impact of Driver Behavior on the Energy Consumption of Electric Vehicles in a Virtual Traffic Environment: Master's Thesis in the University of Michigan. Dearborn, USA. 84.
 13. Leontiev D. N., Bogomolov V. A., Klymenko V. I., Ryzhyh L. A., Lomaka S. I., Suhomlin A. V., Kuripka A. V., Frolov A. A. (2022) About Braking of Wheeled Vehicle Equipped with Automated Brake Control System. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 21 (1), 63–72. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-63-72> (in Russian).
 14. Leontiev D. N., Nikitchenko I. N., Ryzhyh L. A., Lomaka S. I., Voronkov O. I., Hritsuk I. V., Pylshchyk S. V., Kuripka O. V. (2019) About Application the Tyre-Road Adhesion Determination of a Vehicle Equipped with an Automated System of Brake Proportioning. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 18 (5), 401–408. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-401-408> (in Russian).
 15. Li L., Song J., Li H. Z., Shan D. S., Kong L., Yang C. C. (2009) Comprehensive Prediction Method of Road Friction for Vehicle Dynamics Control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 223 (8), 987–1002. <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO1168>.
 16. Konstantinos, N. G., Mitrentsis G. (2017) A Computationally Efficient Simulation Model for Estimating Energy Consumption of Electric Vehicles in the Context of Route Planning Applications. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, 98–118. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.014>.
 17. Le T. N., Dinh B. T., Pham V. S., Le V. T., Nguyen T. D., Nguyen T. L., Nguyen T. D. (2021) Research on Building an Electric Car Model. *Sustainable Energy. Student Forum*. Hanoi, Viet Nam, 514–520.
 18. Vo V. H., Nguyen T. D., Ta T. H. (2021) *Modern Automotive Theory*. Hanoi, Vietnam Education Publishing House Limited Company. 210.
 19. VF e34. *Vinfast*. Available at: https://shop.vinfastauto.com/vn_en/dat-coc-xe-dien-vfe34.html (accessed 25 August 2023).
 20. Department of Energy USA (1997) *Determining Electric Motor Load and Efficiency*. Available at: <https://energy.gov/eere/amo/downloads/determining-electric-motor-load-and-efficiency#:~:text=Most%20electric%20motors%20are%20designed,dramatically%20below%20about%2050%25%20load> (accessed 23 August 2023).
 21. Vodovozov V., Raud Z., Lehtla T., Rassolkina A., Lillo N. (2014) Comparative Analysis of Electric Drives Met for Vehicle Propulsion. *Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. Monte-Carlo, Monaco, 1–8. <https://doi.org/10.1109/EVER.2014.6844125>.
 22. Ngo P., Gulkov G. I. (2017) Calculation of a Mechanical Characteristic of Electric Traction Motor of Electric Vehicle. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 41–53. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53> (in Russian).
 23. Ngo P. (2017) Calculation of Inductance of the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (2), 133–146. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-133-146> (in Russian).
 24. AHS MULTIFLEX EASY. *AHS Prüftechnik*. Available at: <https://www.xn--ahs-prftechnik-lsb.de/produkte/rollen-brems-pruefstaeende-pkw/ahs-multiflex-easy/> (accessed 25 August 2023).
 25. How Many Kilometers Can the VinFast VF e34 Electric Car Travel on a Full Charge? *Vinfast*. Available at: https://vinfastauto.com/vn_vi/vf-e34-di-duoc-bao-nhieukm (accessed 25 August 2023).
 26. Ferrarin M., Pedotti A. (2000) The Relationship Between Electrical Stimulus and Joint Torque: a Dynamic Model. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8 (3), 342–352. <https://doi.org/10.1109/86.867876>.
 27. Zhang B., Yang F., Teng L., Ouyang M., Guo K., Li W. (2019) Comparative Analysis of Technical Route and Market Development for Light-Duty PHEV in China and the US. *Energies*, 12, 3753. <https://doi.org/10.3390/en12193753>.
 28. Mallouh M., Surgenor B. W., Mohammad S., Abdelhafez E., Hamdan A., Mohammad A. H. (2014) Performance Comparison of Different Power Management Control Strategies for a Hybrid Fuel Cell/Battery Vehicle. *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, July 25–27, 2014, Vol. 1. 5 p. <https://doi.org/10.1115/ESDA2014-20599>.
 29. IMEE (2019) *Standardized Drive Cycles*. Available at: <https://imee.pl/pub/drive-cycles> (accessed 25 August 2023).

Received: 21.11.2023

Accepted: 23.01.2024

Published online: 29.03.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-163-171>

UDC 656

Road Safety Concept in the Republic of Belarus

D. V. Kapski¹⁾, S. V. Bogdanovich¹⁾, E. N. Kot¹⁾, L. V. Khmel'nitskaya¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Abstract. The general trend of accident rate reduction, which has been observed in the Republic of Belarus since 2010, reversed in 2017–2018. Remaining within the framework of the country's traditional engineering activities related to road maintenance is unlikely to significantly improve road safety. A transition to qualitatively new practices and mechanisms for ensuring road safety is required. In order to implement this transition, a second Road Safety Concept has been developed. The Concept is based on the Safe System approach, which offers the implementation of measures in four areas: improving road infrastructure safety, increasing vehicle safety, ensuring safe speeds, and training safe road users. The main threat to the implementation of the Safe System approach in the Republic of Belarus is the fixation of stakeholders on their narrow corporate interests and the unwillingness to take into account nation-wide road safety. The Concept mainly focuses on the "Safe Road Infrastructure" component. A transition to sustainable road safety and the introduction of a Forgiving Road approach are included in the Concept. The introduction of assessment of infrastructure projects impact on traffic safety, traffic safety audit and inspections, road traffic risk assessment, and elimination of accident hotspots are also specified. The introduction of road safety audit is considered an important milestone in the transition to the Forgiving Road approach. The development of Intelligent Transportation Systems is included for the same purpose. Despite the fact that the Concept sets reasonably realistic goals, there are certain concerns about the feasibility of their achievement. This is due to significant institutional problems, such as the lack of a single coordinating body and the complexity of interdepartmental interaction.

Keywords: road safety in Belarus, Safe System; Safe Road Infrastructure, Forgiving Road, safe speeds

For citation: Kapski D. V., Bogdanovich S. V., Kot E. N., Khmel'nitskaya L. V. (2024) Road Safety Concept in the Republic of Belarus. *Science and Technique*. 23 (2), 163–171. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-163-171>

Концепция безопасности дорожного движения в Республике Беларусь

Докт. техн. наук Д. В. Капский¹⁾, кандидаты техн. наук С. В. Богданович¹⁾, Е. Н. Кот¹⁾,
Л. В. Хмельницкая¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Общая тенденция снижения аварийности, наблюдавшаяся в Республике Беларусь с 2010 г., в 2017–2018 гг. сменилась на обратную. Оставаясь в рамках традиционной для страны инженерной деятельности, связанной с содержанием дорог, вряд ли удастся существенно повысить безопасность дорожного движения. Необходим переход к качественно новым практикам и механизмам обеспечения безопасности дорожного движения. Для осуществления этого перехода была разработана вторая Концепция безопасности дорожного движения. Концепция базируется на системном подходе к «безопасности», который предлагает реализацию мероприятий по четырем направлениям: повышение безопасности дорожной инфраструктуры, повышение безопасности транспортных средств, обеспечение безопасных скоростей и обучение безопасных участников дорожного движения. Основной угрозой реализации системного подхода безопасности в Республике Беларусь является заикленность заинтересованных сторон на своих узкокорпоративных интересах и нежелание учитывать общегосударственную безопасность дорожного движения. Основное

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь
просп. Независимости, 66,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-11-57
d.kapsky@gmail.com

Address for correspondence

Kapski Denis V.
Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus
66, Nezavisimosty Ave.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-11-57
d.kapsky@gmail.com

внимание в Концепции уделяется компоненту «Безопасная дорожная инфраструктура». В Концепцию включены переход к устойчивой безопасности дорожного движения и внедрение подхода «дорога, которая прощает». Также предусмотрено внедрение оценки влияния инфраструктурных проектов на безопасность движения, аудита и проверок безопасности движения, оценки рисков дорожно-транспортных происшествий, ликвидации очагов аварийности. Внедрение аудита безопасности дорожного движения считается важной вехой в переходе к подходу «дорога, которая прощает». С той же целью включена разработка интеллектуальных транспортных систем. Несмотря на то что в Концепции поставлены достаточно реалистичные цели, существуют определенные опасения по поводу возможности их достижения. Это связано со значительными институциональными проблемами, такими как отсутствие единого координирующего органа и сложность межведомственного взаимодействия.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения в Республике Беларусь, безопасная система, безопасная дорожная инфраструктура, прощающая дорога, безопасные скорости

Для цитирования: Концепция безопасности дорожного движения в Республике Беларусь / Д. В. Капский [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 2. С. 163–171. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-163-171>

Introduction

The improvement of road safety, which is aimed at preserving the life, health, and property of the public, is one of the national policy priorities of the Republic of Belarus and an important factor in ensuring the country's sustainable development.

Road traffic is marked by increased hazards and includes the following main threats:

- physical and property threats, which include traffic accidents leading to the death and injury of people, damage to vehicles, cargo, road structures, and other property;
- environmental threats, which include environmental pollution by motor vehicles, increased noise levels, and other factors that are harmful to human health, to the state and society;
- social threats, which include deliberate violation of the legislation by road users, their aggressive and inadequate behavior on the roads, public dissatisfaction with the state of the roads and traffic management;
- economic threats, which include unjustified stops and excess mileage of vehicles, excessive fuel consumption of vehicles, and delays of road users on the road.

A fairly large number of traffic accident deaths as well as the lack of positive downward trends of this number, set against an increase in the number of vehicles in the early 2000s, contributed to the adoption by the government of the first Road Safety Concept in the Republic of Belarus in 2006 [1].

The implementation of measures from the first Concept led to positive results: thus a constant decrease in the number of traffic accidents, traffic deaths and injuries was noted in the country.

The situation with traffic accidents has been improving in the Republic of Belarus since 2010. The total number of traffic accidents has decreased by a factor of 1.8, the number of deaths has decreased by a factor of 2, the number of injuries has decreased by a factor of 1.8. The number of child deaths has decreased by a factor of 2.8, and the number of injured children has decreased by a factor of 1.8. A downward trend has been noted in almost all types of traffic accidents. The most steadily decreasing types of accidents were collisions with animal-drawn transport, accidents involving a vehicle and a pedestrian, head-on collisions, and rollover accidents. At the same time, an insignificant overall growth has been noted starting from 2010 for such type of traffic accidents as “Other Accidents”.

The three most common types of traffic accidents in 2020 were accidents involving a vehicle and a pedestrian, collisions at road intersections or at road turns, and rollover accidents.

Meanwhile, the trend changed in 2017–2018, and the indicators show deterioration. An increase in the total number of traffic accidents, deaths, and injuries has been registered, as well as an increase in certain types of traffic accidents and their prevailing causes.

Since 2017, there has been a constant increase in such traffic accidents as rollover accidents and collisions with cyclists. The most significant increase has been noted for such traffic accidents as animal collisions: from 3 to 41 cases since 2017. An increase in other 4 types of traffic accidents has been noted since 2018.

The main types of traffic accidents in the Republic of Belarus are collisions with pedestrians,

rollover accidents, vehicle collisions, including collisions at road intersections and road turns, and collisions with cyclists. In total, they account for more than 70 percent of all accidents and injuries.

More than 80 percent of traffic accidents in the Republic of Belarus occur through the fault of vehicle drivers, and the number of such accidents is increasing. The prevalent reasons for these accidents are violating the rules for driving through pedestrian crossings, driving while intoxicated, non-observance of priority, and speeding. Such accidents account for almost 50 % of all cases.

About 56 % of traffic accidents in the Republic of Belarus are registered within cities and towns. For 10 years, 55 % of all injuries were sustained during these accidents. The number of fatalities is significantly higher on highways, accounting for 72 % of all deaths between 2010 and 2020. At the same time, accident rates have been deteriorating both on highways and within towns starting from 2017–2018.

The number of vehicles has increased by a factor of 1.1 since 2010, amounting to 3.72 million vehicles. Thus, the transport risk indicator in the Republic of Belarus is 154.4 deaths per million vehicles. According to this indicator, the situation in the Republic of Belarus is better than in Russia, but worse than in Western Europe. Compared to countries such as the United Kingdom, Sweden, or Norway, the situation is 3.2–5.6 times worse.

Traffic injuries remain one of the most pressing concerns for the Republic of Belarus, which require intensified efforts of the state and the public in influencing the key accident factors that affect the number of fatalities in traffic accidents. The lack of attention to this problem can lead to a more noticeable increase in the main accident rates in the coming years.

The analysis of the experience of economically developed countries shows that traffic accidents can and should be prevented, and if an accident nevertheless does occur, then its negative impact on the life and health of the public must be reduced as much as possible [2].

Thus, it is required to reinforce the systemic work on the implementation of relevant measures, to develop and implement new approaches in priority activities, taking into account the current situation in the considered area and the existing resource constraints.

As of January 1, 2021, there are 86 technical standards in place in the Republic of Belarus that are directly related to road safety. However, these standards barely contain any requirements for the road infrastructure safety management processes. For this reason, no effective action is being taken in this area.

Due to the lack of real road infrastructure safety management in the Republic of Belarus, the accident rates, which had tended to decline, began to grow in 2017–2018 (Fig. 1). In general, this fact corresponds to the global experience of countries' adaptation to the conditions of growing motorization of the population, and at the same time confirms that after reaching a certain level of motorization, traditional road safety practices become ineffective and the introduction of fundamentally different approaches is required [3].

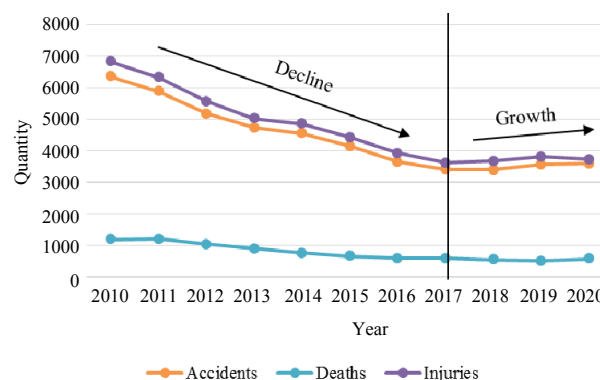


Fig. 1. Change in accident rates in the Republic of Belarus

This situation led the transport industry executives of the Republic of Belarus to initiate the development of the second Road Safety Concept.

Concept Development Methodology

After analyzing the experience of other countries, the Concept developers made a decision to use the Safe System approach. Safe System notably includes the coordinated implementation of measures in four areas: improving road infrastructure safety, increasing vehicle safety, ensuring safe speeds, and training safe road users [4]. The Safe System principles are widely known and have been described many times in different publications [5, 6]. The Safe System approach was also promoted in Belarus by the World Bank. However, the problem in the Republic of Belarus is that the principles of this system do not find

the necessary response among the public, either at the level of ethics or at the level of practical actions.

The work of the transportation sector, law enforcement and health authorities directly affects the risks and consequences of traffic accidents.

The activities of the parties interested in arranging and improving road safety in the Republic of Belarus are currently not coordinated properly. No single national operator of the road safety system exists, which results in no single systemic policy being developed in this area. Traffic management has no control structure either. Its functions are dispersed among many departments and organizations that are not responsible for the quality of road traffic. At the same time, international experience shows that without solving these issues, the country has little chance of implementing successful measures to achieve road safety and the desired results [3].

The most significant problem is the fixation of the parties concerned on their narrow corporate interests and the unwillingness to consider nationwide road safety. When it comes to road safety issues, the reasoning of a considerable part of decision-makers has halted at the level of the first half of the 20th century [7].

Effective management of the results of road safety requires systematic and planned response measures, as well as improvement of the overall road safety management system. Based on international experience, road safety should be considered as a production process where the primary role is assigned to institutional management functions that ensure the implementation of effective system-wide measures for achieving results designated as long-term goals and short-term quantitative indicators [8].

The primary long-term goal of the Concept is to create prerequisites for achieving such a state of road traffic in the future in which no people are killed or injured as a result of traffic accidents in the Republic of Belarus.

The short-term goals of the Concept are:

- reducing the number of traffic accidents with injuries, not exceeding 3050 cases per year by 2025, and 2850 cases by 2030;
- restoration of the downward trend of accident rate statistical indicators that took place in 2010–2017.

The concept is designed for the period till 2030. This does not mean that all problems will be solved and the Safe System approach will be fully implemented by 2030. It is expected that the basic prerequisites will be created and the active implementation of the Safe System approach will begin during this period. The achievement of targets will be assessed every 5 years and corrective actions will be taken, if necessary. If the Concept goals for each component are successfully achieved, the Concept can be extended with the establishment of new targets.

Safe Road Infrastructure. The second Concept mainly focuses on improving road infrastructure safety. A safe road infrastructure minimizes traffic accident potential through road design and road usage [9].

The Concept makes provisions for a range of works on determining the key performance indicator called “percentage of length of roads with a safety rating above the established limit”. This indicator can be based on the determination of the rating according to the IRAP methodology and has more of a probable value, since such research is not done in Belarus.

The Concept includes the following areas of improving road infrastructure safety for highways (Fig. 2).

During investment feasibility studies, the impact of infrastructure projects on road safety is assessed. Any changes within a new infrastructure project or changes to the existing infrastructure that significantly affect traffic on the road network are subject to assessment.

The goal of transitioning towards sustainable road network safety is to prevent traffic accidents and minimize their consequences. Infrastructure designed and built on sustainable safety principles maximizes the separation of vehicles with large differences in direction, speed, and mass on the roads and contributes to the safe behavior of road users.

Sustainable road network safety assumes that prevention is better than mitigation of consequences, and is based on the following principles [10]:

- road functionality;
- uniformity of mass and/or speed and direction;
- recognition and predictability of roads and user behavior;
- physical and social forgiveness;
- awareness of the condition.

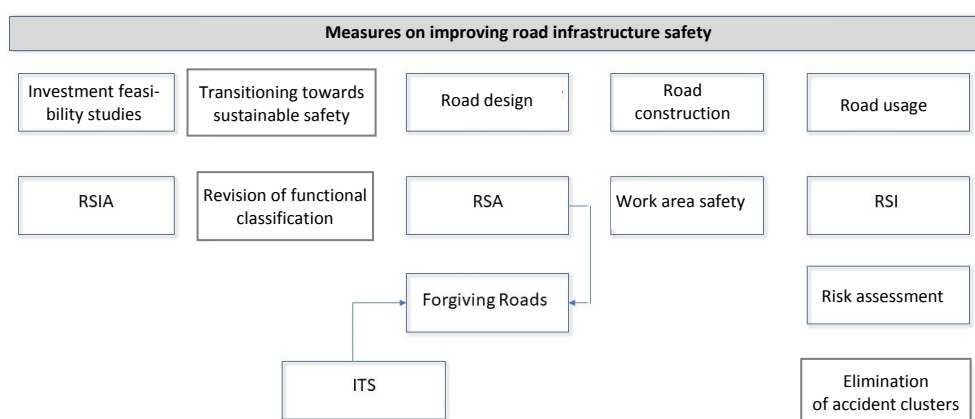


Fig. 2. Areas of improving road infrastructure safety included in the Concept

Roads should be mono-functional. This means that each road must perform only its own function. In accordance with the road mono-functionality approach, roads are classified as local, distribution, and through roads. However, the road network in the Republic of Belarus has been formed a long time ago, and the mono-functionality principle is not observed in almost all cases. Moreover, road owners and road authorities show no interest in eliminating multi-functionality. For this reason, the implementation of the principle is one of the most difficult tasks.

The Concept includes the following main measures at the road design stage:

- introduction of the Forgiving Road approach into the design [11];
- introduction of road safety audit.

The Concept includes implementation of the following measures within the Forgiving Road approach:

- introduction of road design in the Republic of Belarus with the number of lanes “2+1”;
- multi-stage pedestrian crossings. On highways with two carriageways, only multi-stage pedestrian crossings are used;
- road interchanges. On highways with two carriageways which perform through road functions, a gradual reconstruction of all one-level intersections to multi-level intersections is included;
- expanding the use of traffic barriers, including front barriers, revision of the usage rules for traffic barriers;
- using horizontal road marking with noise bands;
- pedestrian refuge islands are used at pedestrian crossings both on highways with one carriageway and within towns;

- reconstruction of intersections (roundabouts, channeling, arrangement of acceleration and deceleration lanes). On highways with one carriageway, a gradual reconstruction of all one-level intersections is included using technical solutions that improve road safety, primarily the arrangement of roundabouts;

- artificial lighting. The use of artificial lighting is expanded on sections of highways outside of towns, and the standards for carriageway illumination are revised, primarily in hazardous areas;

- improving traffic management at the locations of roadside service facilities;

- the length of pedestrian footpaths is increased, primarily in areas with heavy pedestrian traffic outside of towns; designing structurally designated bikeways, primarily within towns;

- development of technical standards which take into account the needs of unprotected road users.

The purpose of road safety audit is to identify potential road safety problems that may affect any road user, and to propose measures for eliminating or mitigating these problems. An additional challenge for road safety audit in the Republic of Belarus is identifying the main road safety problems associated with road design in order to facilitate the transition to the Forgiving Road approach. Currently, road safety audit is recognized as an effective procedure in all developed countries. However, the implementation of this audit in the Republic of Belarus faces severe financial constraints. Moreover, the term “audit” is not allowed to be used in relation to road safety, instead experts have to use the euphemism “inspection of the road safety system”.

An additional line of action included in the second Concept, but not related to the Safe System approach, is expanding the use of Intelligent Transport Systems. ITS solutions allow meeting the requirements of the Forgiving Road concept

in a more cost-effective way. This is especially true for roads designed and constructed using old USSR standards. Reconstructing these roads in accordance with the requirements of the Forgiving Road concept is an expensive endeavor. ITS solutions can diminish and in some cases even eliminate the existing shortcomings of the old design and construction. The best results are achieved by combining ITS and the Forgiving Road concept.

At the stage of road construction, reconstruction, and repair, the main focus is given to the safe performance of road works in order to improve road safety. The Concept includes the revision of existing approaches to the fencing of road works, taking into account the best international practices and the introduction of risk management and planning in order to ensure safety.

At the stage of road usage, the following measures are implemented:

- inspection of road safety;
- road traffic risk assessment;
- identification and elimination of traffic accident clusters.

The inspection of road safety is an independent and formal assessment of the road in use in order to identify potential road safety problems that may affect any road user, and to propose measures for eliminating or mitigating these problems. As with road safety audit, the term “inspection” is also not allowed to be used in Belarus in relation to road safety. This term has to be replaced with “survey of the road safety system at the stage of road usage.”

The Concept includes the revision of existing approaches to identifying traffic accident clusters, taking into account the best international practices [11, 12].

Safe Speeds. The effect of high speeds on road safety has been well studied [13, 14]. Some studies show that the risk of an accident when speeding is 12.8 times higher than in case of complying with the established speed [15]. Speeding remains one of the most common causes of traffic accidents in the Republic of Belarus. The percentage of accidents caused by speeding has been 10–12 % annu-

ally since 2014. The downward trend in the number of accidents caused by speeding, which started in 2010, has slowed down after 2018 (Fig. 3).

The long-term goal of the Concept in terms of traffic speeds is to create prerequisites for achieving such a state of road traffic in the future in which no people are killed or injured as a result of traffic accidents caused by speeding in the Republic of Belarus.

The short-term goal of the Concept is to reduce the percentage of traffic accidents caused by speeding with injuries, not exceeding 7.5 % per year by 2025, and not exceeding 4.5 % per year by 2030. In 2020, this indicator was 10.5 %.

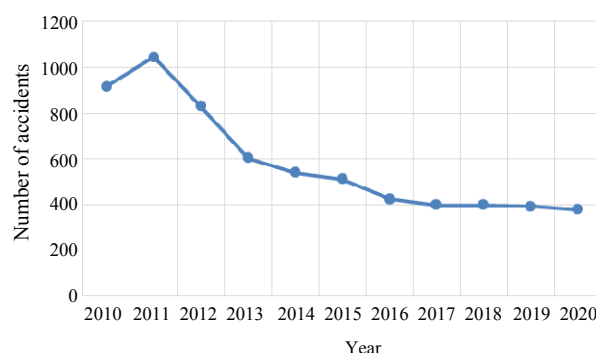


Fig. 3. Change in the number of accidents caused by speeding with fatalities and injuries

In order to introduce measures for optimizing and controlling speed limits, the following is included:

- continuous analysis of speed limits on republican highways according to the data of automatic sensors;
- installation of traffic speed sensors on local roads with a large number of traffic accidents;
- implementation of the traffic speed measurement system and the installation of traffic speed sensors within towns;
- development of a technical standard regulating speed limit control.

The efficiency of speed limit control is defined by the percentage of vehicles not exceeding speed limits in the total traffic flow that is determined by the measurements results of speed sensors.

In order to reduce the number of conflict situations in road traffic, prevent traffic accidents, and reduce the severity of their consequences, the new Concept introduces traffic calming methods aimed at changing speed limits.

For effective control over the observance of speed limits, the following is included:

- implementation of the average traffic speed measuring method on road sections. this method is planned to be introduced on at least 5 % of the length of national roads by 2030;
- expanding the practice of applying the average traffic speed measuring method on sections of city streets, primarily in Minsk and regional centers.

Currently, public awareness does not include the necessity to comply with speed limits. A long-term public awareness campaign on safe speeds is envisioned, promoting at least the following views:

- actual and potential risks on the road are not always obvious or identifiable;
- the driver's decisions about the chosen driving speed are usually made without considering the impact on the safety of other drivers;
- the driver is not always able to correctly judge the capabilities of the vehicle at high speeds (for example, the braking distance) and thus cannot choose the correct speed depending on the geometric features of the road and roadside conditions;
- the driver often lacks understanding of the impact of speed on the probability of an accident and the severity of its consequences;
- more uniform traffic speed has major advantages.

The effectiveness of the campaign is assessed annually by conducting an opinion poll of users on their attitude to speed limits.

Safe Vehicles. The technical level and technical condition of vehicles is one of the main factors determining road safety. Sudden breakdowns of vehicles involved in road traffic are usually accompanied by the most severe consequences.

The Concept includes the development of measures related to vehicle safety aimed at improving the safety and quality of transport in general. The aim of the Concept is to use safe vehicles in road traffic, and to monitor the technical condition of vehicles and the compliance with safety requirements.

The safety of commercial vehicles requires special attention.

Along with the implementation of various well-known legislative initiatives on the introduction of safety features into vehicles, the Concept includes the introduction of innovative technical devices for

improving the active and passive safety of vehicles, including driver assistance systems, such as forward collision warning systems, and the introduction of other smart technologies in order to ensure the free exchange of data and information between vehicles, as well as between vehicles and the road infrastructure, and the deployment of an automatic accident notification system.

The concept stipulates that the Safe Car ideology is implemented in the Republic of Belarus, which is based on the need to compensate for human imperfections by means of modern tools for active and passive vehicle safety, using multipurpose information and communication systems and mobile devices. These include systems and tools that are capable of the following:

- providing automatic braking and forced speed limitation in case of danger, preventing collisions with obstacles;
- monitoring compliance with road marking requirements, tracking blind spots;
- self-parking in confined spaces;
- warning the driver about fatigue and loss of concentration, responding to voice commands, etc.

The following is included:

– development of mechanisms to facilitate the purchase of safe vehicles by legal entities and individuals, refusal to use old, less safe vehicles that are not equipped with modern active and passive safety systems

– incentives for the purchase of safer vehicles, including electric vehicles, can be achieved by reducing the tax burden (subsidies, lower tolls for road use and parking, reduced rates for electricity when charging vehicles with an electric drive, and other incentives).

In order to increase the efficiency of control over the technical condition and design of vehicles, the following is included:

- analysis of current vehicle safety standards in the Republic of Belarus.
- revision of technical standards that stipulate the requirements for the technical condition of vehicles and its compliance with the specified safety requirements.
- strengthening control over the technical condition of vehicles during the entire period of their operation.
- development of measures aimed at ensuring that vehicles which have received mechanical

damage in accidents are subject to repair in the amount necessary in order to return them to road traffic in a fully operational condition;

- creation of mobile stations for checking the technical condition of vehicles by 2025.

Safe Users. The training of road users is critical for ensuring road safety. This training is aimed at road users acquiring the skills of driving safely on the streets and roads and consciously avoiding actions that pose a danger to other road users and that disrupt road traffic.

During their training, safe users acquire the knowledge and skills that ensure the proper behavior and safety of themselves and other road users in various traffic situations. Appropriate training programs are developed and systematic awareness building is carried out for this purpose, including in the media, on the Internet, social networks, etc.

The general areas of action for the training of safe road users are the following:

- development and revision of methods and programs for teaching the behavior culture on the roads and for ensuring road safety, at all education levels;

- holding information campaigns to form a negative attitude towards violations of traffic rules, and campaigns to form positive stereotypes of safe behavior on the streets and roads;

- introduction of speed limits for cyclists when using sidewalks and footpaths;

- setting a ban and responsibility for the use of personal mobility means by pedestrians in a state of intoxication;

- enhancing the liability of road users and responsible individuals for violation of the road traffic rules.

The Concept includes psychological training of traffic police officers in order to improve the quality of interaction with road users, as well as the need to equip traffic police patrol cars with first aid equipment and CPR devices (defibrillators), and to teach the rules for their usage.

Analysis and Results

Currently, the Concept has been fully developed, and after finalizing the approval processes with the interested parties, the Concept will be approved at the government level. An important achievement of the development is the fact that

it was possible to persuade the decision-makers in the Republic of Belarus that a qualitative change in approaches to road safety is necessary. As a result of this, the Concept encompasses modern international experience, such as Safe System, Forgiving Road, the transition to sustainable safety of the road network. Measures for road infrastructure safety management are included, such as assessment of impact on road safety, road safety audit, road safety inspection, and risk assessment. Judging by the experience of other countries [16], it can be argued that these measures alone are capable of having a significant effect. In addition, numerous measures are planned for improving the safety of vehicles and training safe users of the road network.

The Concept includes rather flexible primary goals. However, a regular analysis of the achievement of goals and their adjustment, if necessary, is stipulated. It is assumed that the Concept, which is initially designed for the period till 2030, will later be extended taking into account the achieved results.

Discussion

The Republic of Belarus has already developed a second Road Safety Concept. The measures of the first Concept were generally completed and produced good results. Will the goals of the second Concept be achieved? It is reasonable to assume that it will be much more difficult. The measures of the first Concept were aimed primarily at the implementation of infrastructure solutions and were carried out mainly by organizations that are subordinate to one ministry. Right now the question is about management decisions. These decisions require a change in the existing approaches and are related to the formation of interdepartmental communications. The procedure for financing various types of work also requires a change.

CONCLUSIONS

The Republic of Belarus has developed a second Road Safety Concept. The main difference of the second Concept is that it is based on the Safe System approach, which is currently the most effective concept adopted in many countries worldwide. Safe System includes the coordinated

implementation of measures in four areas: improving road infrastructure safety, increasing vehicle safety, ensuring safe speeds, and training safe road users.

The main differences of the new version of the Concept relate to the improvement of road infrastructure safety. In this regard, the transition to sustainable safety of the road network is stipulated, in accordance with which the main focus will be on the implementation of preventive measures in terms of road safety, which will reduce the cost of eliminating the consequences of traffic accidents. Practical application of road design according to the Forgiving Road approach is included. It is planned to develop Intelligent Transport Systems as an additional tool for ensuring road safety.

The implementation of measures for road infrastructure safety management is also included, such as assessment of the impact of projects on road safety, road safety audit and inspection, and road traffic risk assessment.

REFERENCES

1. Kapsky D., Bogdanovich S., Volynets A. (2020) Implementation of the Road Traffic Safety Concept in Belarus. Varhelyi, A., Žuraulis, V., Prentkovskis, O. (eds). *Vision Zero for Sustainable Road Safety in Baltic Sea Region. VISZERO 2018. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer, Cham., 110–119. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22375-5_13.
2. Johansson R. (2009) Vision Zero – Implementing a Policy for Traffic Safety. *Safety Science*, 47 (6), 826–831. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.10.023>.
3. Bliss T., Breen J. (2009) *Implementing the Recommendations of the World Report on Road Traffic Injury Prevention. Country Guidelines for the Conduct of Road Safety Capacity Reviews and the Related Specification of Lead Agency Reforms, Investment Strategies and Safety Projects*. Available at: <https://www.aprso.org/sites/default/files/document/2020-07/country-guidelines-conduct-road-safety-management.pdf> (accessed 04 August 2022).
4. Austroads (2015) *Improving the Performance of Safe System Infrastructure. Research Report AP-R498-15*. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Chris-Jurewicz/publication/295072998_Improving_the_Performance_of_Safe_System_Infrastructure/links/56c6e91208ae8cf828fba7a/Improving-the-Performance-of-Safe-System-Infrastructure.pdf (accessed 13 March 2018).
5. Turner B. (2013) *Implementing the Safe System Approach to Road Safety: Some Examples of Infrastructure Related Approaches*. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:760022/FULLTEXT01.pdf> (accessed 04 August 2022).
6. McTiernan D., Turner B., Wernham R., Gregory R. (2010) *Local Government and the Safe System Approach to Road Safety*. Vermont South: ARRB Group Ltd.
7. Kapskii D. V., Blinkin M. Ya., Tsygankov A. A., Sushko A. A., Bakhanovich, A. G., Kuz'menko V. I., Erchak O. V., Frishchin B. V. (2017) *Road Safety: Development Paradigms*. Minsk, Kapital Print Publ. 264 (in Russian).
8. Varhelyi A. (2016) Road Safety Management – The Need for a Systematic Approach. *The Open Transportation Journal*, 10 (1), 137–155. <https://doi.org/10.2174/1874447801610010137>.
9. SWOV (October 2007). *Background of the five Sustainable Safety Principles. SWOV Fact sheet*. Leidschendam, The Netherlands. Available at: https://d3n8a8pro7vhmxc.cloudfront.net/20splentyforus/legacy_url/298/FS_Sustainable_Safety_background.pdf?1431368025.
10. Wegman F., Aarts L., Bax Sh. (eds.) (2008) Advancing Sustainable Safety: National Road Safety Outlook for 2005–2020. *Safety Science*, 46 (2), 323–343. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.06.013>.
11. La Torre F., Saleh P., Cesolini, E., Goyat Y. (2012) Improving Roadside Design to Forgive Human Errors. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 53, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.876>.
12. Elvik R. (2007) *State-of-The-Art Approaches to Road Accident Black Spot Management and Safety Analysis of Road Networks. Report 882/2007*. Available at: <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=9022> (accessed 04 August 2022).
13. Geurts K., Wets G. (2003) *Black Spot Analysis Methods: Literature Review*. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1090.8472&rep=rep1&type=pdf> (accessed 04 August 2022).
14. Richards D. C. (2010) *Relationship Between Speed and Risk of Fatal Injury: Pedestrians and Car Occupants. Road Safety Web Publication No 16*. Department for Transport, London, UK. Available at: https://nacto.org/docs/usdg/relationship_between_speed_risk_fatal_injury_pedestrians_and_car_occupants_richards.pdf (accessed 04 August 2022).
15. Rosen E., Sander U. (2009) Pedestrian Fatality Risk as a Function of Car Impact Speed. *Accident Analysis & Prevention*, 41 (3), 536–542. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.02.002>.
16. Dingus T. A., Guo F., Lee S., Antin J.F., Perez M., Buchanan-King M., Hankey J. (2016) Driver Crash Risk Factors and Prevalence Evaluation Using Naturalistic Driving data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113 (10), 2636–2641. <https://doi.org/10.1073/pnas.1513271111>.

Received: 30.01.2023

Accepted: 14.04.2023

Published online: 31.01.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-172-180>

УДК 330.131.7

Использование точек риска в системе управления рисками теплоэлектростанций

Магистр экон. наук Е. И. Тымуль¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В современных условиях независимо от того, каким видом экономической деятельности занимается организация, она сталкивается с различными рисками. Для производственных предприятий сфера рисков одна из самых обширных, так как необходимо учитывать неопределенности и в финансовой, и в производственной деятельности. Создание эффективной системы управления рисками определяет пути и возможности обеспечения устойчивости организаций, их способности противостоять неблагоприятным ситуациям. Снижение риска возможно за счет управления рисками, которое предполагает их выявление и оценку, а также использование таких процедур и методов управления, которые снижали бы возможные риски. Для наиболее эффективного осуществления риск-менеджмента необходим системный подход к организации этого процесса. Особое значение управление рисками будет иметь для энергетических предприятий в связи с теми изменениями, которые наблюдаются в данной сфере в последние несколько лет. В статье предложена модель управления рисками энергетических предприятий, которая включает в себя цель, объект, предмет, функции, принципы и процессы управления рисками с учетом особенностей энергетических предприятий. Представлен алгоритм реализации данной модели, состоящий из пяти основных этапов. Применение данного алгоритма позволит получать промежуточные результаты внедрения системы управления рисками и в случае необходимости корректировать данный процесс. В статье представлен анализ существующих концепций по использованию точек риска. Внимание уделено и вопросу использования данного метода на энергетических предприятиях других стран. Подробно рассмотрена методика определения критических контрольных точек, которая лежит в основе системы ХАССП, применяемой в пищевой промышленности. Обоснована возможность применения точек риска с целью определения ответственных за риски на энергетических предприятиях. Проведен анализ действующей теплоэлектроцентрали с целью определения точек производственно-технического риска. Результатом анализа стало выявление ответственных за данный вид риска.

Ключевые слова: энергетика, специфика деятельности, риски, управление, модель управления рисками, алгоритм, ТЭЦ, точки риска, ответственные за риск

Для цитирования: Тымуль, Е. И. Использование точек риска в системе управления рисками теплоэлектростанций / Е. И. Тымуль // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 2. С. 172–180. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-172-180>

Using Risk Points in Risk Management System of Thermal Power Plants

Ya. I. Tymul

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In modern conditions, regardless of what type of economic activity an organization faces various risks. For manufacturing enterprises, the area of risks is one of the most extensive, since it is necessary to take into account uncertainties in both financial and production activities. Creation of an effective risk management system determines ways and opportunities

Адрес для переписки

Тымуль Евгения Игоревна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 242-75-35
eoe@bntu.by

Address for correspondence

Tymul Yauheniya I.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 242-75-35
eoe@bntu.by

to ensure sustainability of organizations and their ability to withstand adverse situations. Risk reduction is possible through risk management, which involves their identification and assessment, as well as the use of procedures and management methods that would reduce possible risks. For the most effective implementation of risk management, a systematic approach to organizing this process is required. Risk management will be of particular importance for energy companies due to the changes that have been observed in this area over the past few years. The paper proposes a risk management model for energy enterprises, which includes the goal, object, subject, functions, principles and processes of risk management, taking into account the characteristics of energy enterprises. An algorithm for implementing this model is presented, consisting of five main stages. The use of this algorithm will allow us to obtain intermediate results from the implementation of the risk management system and, if necessary, adjust this process. The paper presents an analysis of existing concepts on the use of risk points. Attention is also paid to the issue of using this method at energy enterprises in other countries. The methodology for determining critical control points, which lies in at the heart of HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point) system used in the food industry, is discussed in detail. The possibility of using risk points to determine those responsible for risks at energy enterprises is substantiated. An analysis of the operating thermal power plant was carried out in order to identify points of production and technical risk. The result of the analysis was the identification of those responsible for this type of risk.

Keywords: energy, specifics of activity, risks, management, risk management model, algorithm, thermal power plant, risk points, responsible for the risk

For citation: Tymul Ya. I. (2024) Using Risk Points in Risk Management System of Thermal Power Plants. *Science and Technique*. 23 (2), 172–180. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-172-180> (in Russian)

Введение

Управление рисками на любом современном предприятии имеет стратегически важное значение, так как снижение существующих рисков и мониторинг новых рисков позволяют существенно повысить качество его работы. Процесс управления рисками имеет достаточно сложную архитектуру, поскольку в нем задействовано большое количество бизнес-процессов и персонала. Поэтому подход к управлению рисками должен иметь системный подход.

Основная часть

Одними из первых шагов, которые должны быть предприняты на предприятии в условиях осуществления риск-менеджмента, является создание модели (или системы) управления рисками, которая должна содержать в себе следующие элементы: цель, объект, субъект, принципы, функции, процессы. Обязательно должен быть определен конечный результат, к которому стремится организация посредством внедрения риск-менеджмента [1, 2]. Следует обратить внимание на то, что специфика деятельности предприятия должна найти отражение в каждом из перечисленных элементов.

Энергетические предприятия всегда являются стратегически важными для любого государства. В Республике Беларусь в последние годы ведется активная работы по реформированию энергетики с целью создания единого

энергетического рынка со странами ЕАЭС. Одним из этапов данного реформирования является переход к рыночным взаимоотношениям на стадии генерации энергии. Это означает необходимость самостоятельного ведения финансовой, хозяйственной и производственной деятельности для электростанций. Поэтому в изменившихся условиях для электростанций станет актуальным процесс управления рисками. Процесс генерации энергии имеет значительные отличия от любого другого процесса производства, что накладывает свои особенности и на процесс управления рисками [3, 4]. На рис. 1 представлена авторская модель управления рисками, учитывающая особенности деятельности теплоэлектростанций.

Как отмечалось ранее, процесс управления рисками достаточно сложен ввиду своей многофакторности, поэтому для повышения эффективности управления рисками должен быть разработан алгоритм его внедрения, который позволит определять промежуточные результаты и в случае необходимости корректировать процесс внедрения модели управления рисками. В наиболее общем виде алгоритм должен содержать такие этапы, как: разработка организационного обеспечения модели управления рисками; создание информационного обеспечения модели управления рисками; создание методического обеспечения модели управления рисками; формирование системы коммуникаций и информирования о рисках; практическая реализация модели управления рисками (рис. 2) [5, 6].

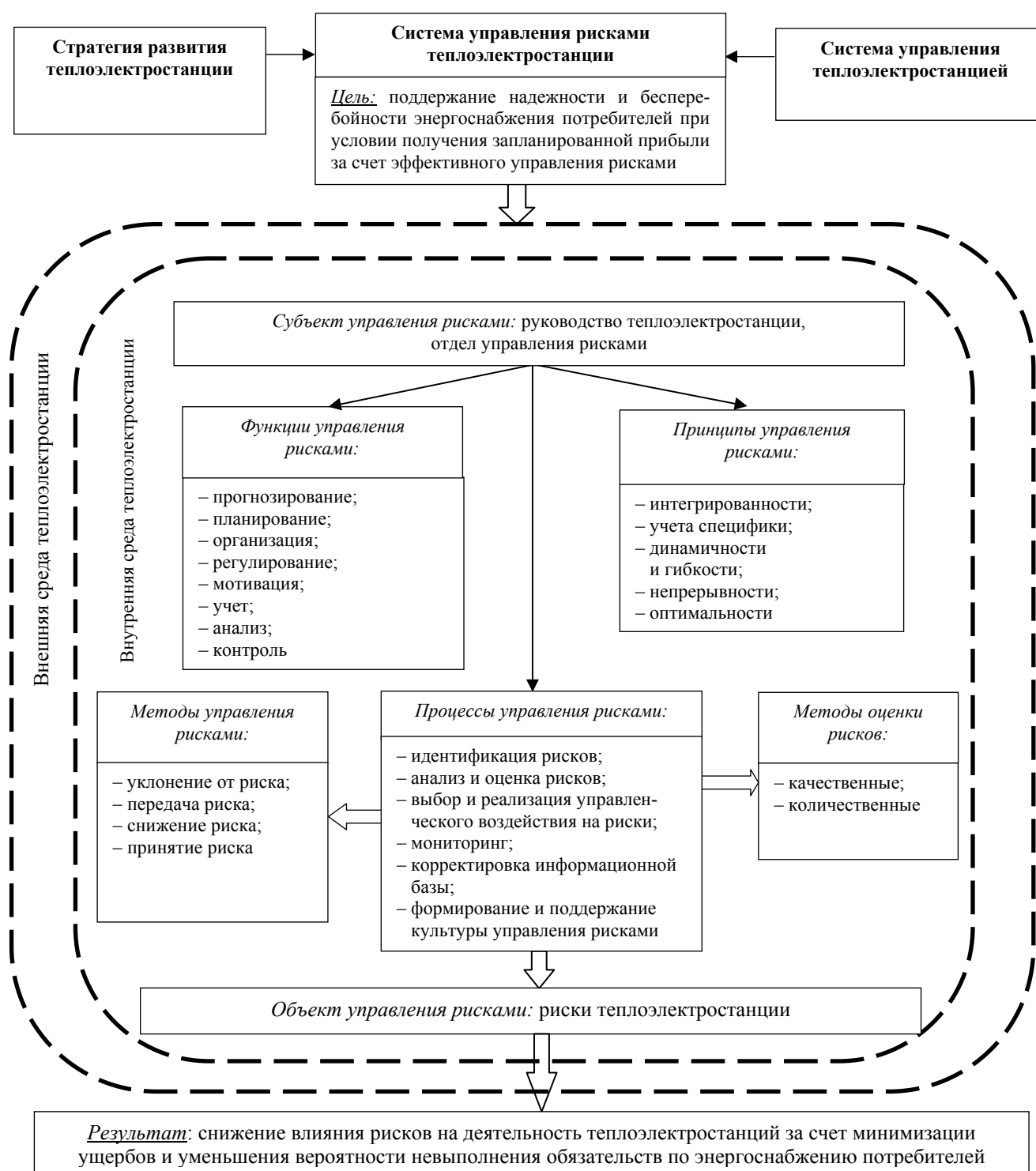


Рис. 1. Модель управления рисками теплоэлектростанций

Fig. 1. Risk management model for thermal power plant

Каждый из перечисленных этапов имеет ряд определенных шагов. Так, в состав первого этапа входят следующие шаги:

1.1. Создание рабочей группы по реализации модели управления рисками ТЭС: данная

рабочая группа должна состоять из представителей различных структурных подразделений теплоэлектростанции. Для формирования наиболее эффективной модели управления рисками теплоэлектростанции в состав рабочей

группы целесообразно включить главного инженера либо другого специалиста производственно-технического отдела.

Для обеспечения единого подхода к деятельности рабочей группы рекомендуется разработать Положение о рабочей группе по внедрению модели управления рисками, в котором будут изложены состав и порядок образования и реформи-

рования рабочей группы, а также компетенции, права и обязанности ее участников.

1.2. Распределение и закрепление обязанностей по управлению рисками ТЭС.

1.3. Внесение изменений во внутреннюю нормативную документацию, в том числе в должностные инструкции, и информирование сотрудников об этих изменениях.

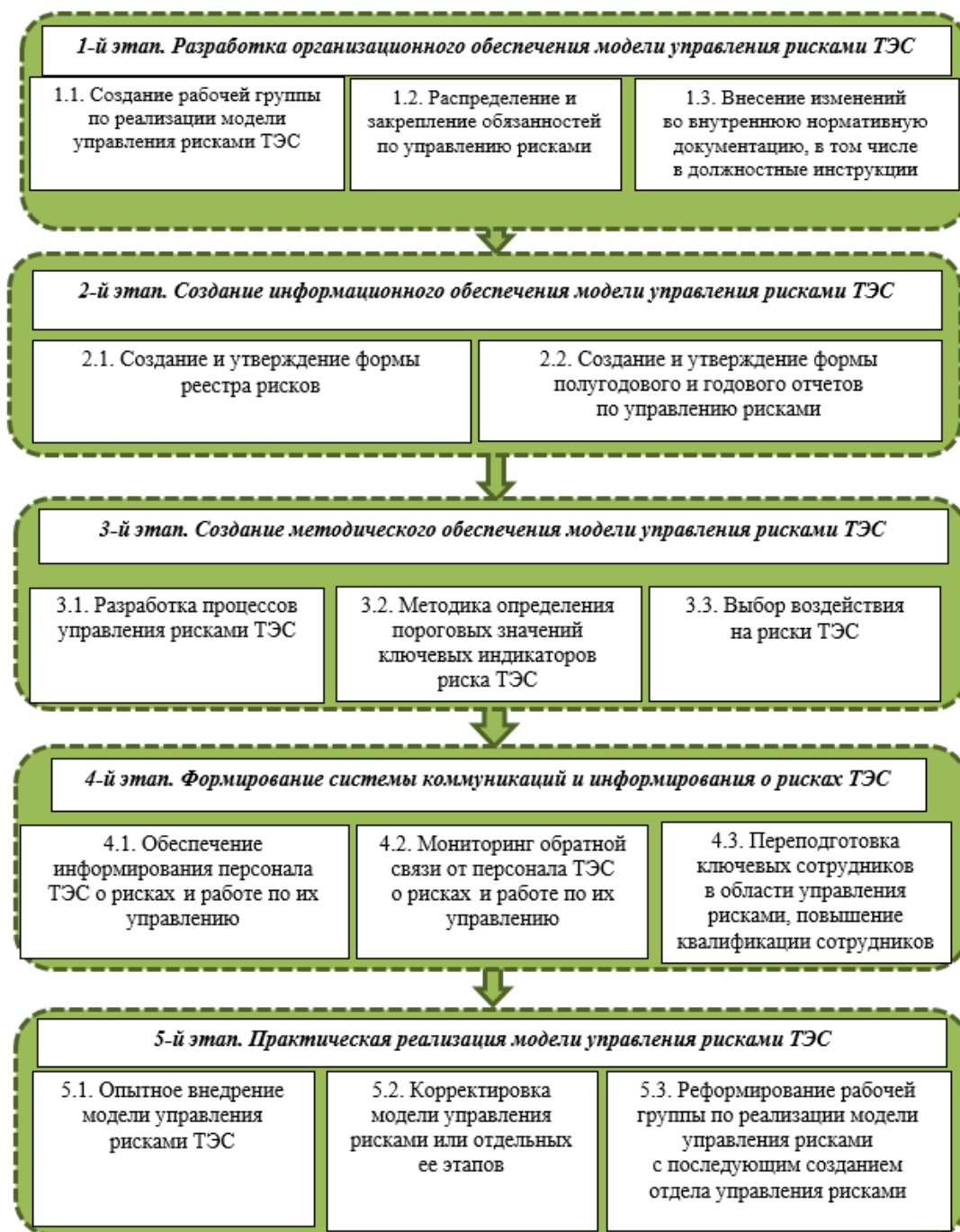


Рис. 2. Алгоритм реализации модели управления рисками теплоэлектростанции

Fig. 2. Algorithm for implementing the thermal power plant risk management model

Второй этап алгоритма реализации модели управления рисками заключается в создании информационного обеспечения модели управления рисками ТЭС.

Основным документом, в котором содержится информация о рисках предприятия, является реестр рисков. Реестр рисков содержит описание риска, возможные последствия реализации ущерба, оценку риска (вероятность, ущерб и уровень риска в матрице рисков), корректирующие действия (мероприятия по снижению) и владельца риска. Реестр риска может содержать в себе различный объем информации, то есть он может быть как более подробным (наименование риска, описание риска, причины возникновения риска, последствия от наступления, всесторонняя оценка риска, вид работы с риском, мероприятия по снижению риска, корректирующие действия, владелец риска и т. д.), так и иметь упрощенный вид, включающий в себя только описание риска, величины возможного ущерба, вероятности возникновения, общего уровня риска, мероприятий по снижению риска и владельца риска.

Независимо от того, какую форму реестра риска выберет предприятие, одним из главных вопросов является определение ответственных за риски работников. Для того чтобы грамотно распределить обязанности по управлению рисками требуется понимать, где именно и какие риски могут возникнуть. Для решения этого вопроса необходимо определить точки риска.

Наибольшее применение точки риска получили в пищевой промышленности. Так, согласно положениям Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» с 15 февраля 2015 г. при осуществлении процессов производства (изготовления) пищевой продукции, связанных с требованиями безопасности такой продукции, изготовителями должны разрабатываться, внедряться и поддерживаться процедуры, основанные на принципах ХАССП (англ. HACCP – Hazard Analysis and Critical Control Points, анализ рисков и критические контрольные точки) – системы управления безопасностью пищевых продуктов, которая позволяет обеспечить контроль на всех этапах производства пищевой

продукции, а также при ее хранении и реализации. Сущность системы ХАССП состоит в том, что процесс изготовления продукции от закупки сырья до потребления готовых изделий делится на стадии с контролем на промежуточных этапах. После каждой последующей стадии риск получить «на выходе» некачественный продукт «уменьшается».

Критические контрольные точки являются ключевыми элементами системы ХАССП, так как правильное определение угроз, разработка системы мониторинга, а также своевременное реагирование в случае обнаружения нарушений позволяют контролировать производственный процесс, свести к минимуму выпуск небезопасной продукции, а также снизить риск причинения вреда потребителям.

Критические контрольные точки определяются по методу дерева принятия решений на основе анализа каждого учитываемого опасного фактора при последовательном рассмотрении всех операций, включенных в блок-схему производственного процесса. Отвечая последовательно на вопросы дерева принятия решений, команда ХАССП принимает решение о целесообразности установления критических контрольных точек на данном этапе. Не существует ограничений для количества критических контрольных точек, это зависит от сложности и вида продукции, производственного процесса, подвергающихся анализу. На рис. 3 представлены принципы и преимущества использования системы менеджмента на основе принципов ХАССП.

При использовании системы ХАССП рабочая группа определяет для каждой критической контрольной точки границы предельных значений, которые позволяют контролировать контрольные точки, разрабатывает программу мониторинга с алгоритмом контроля за критической контрольной точкой, а также вырабатывает корректирующие мероприятия, которые должны снизить риски или устранить последствия превышения предельных значений критических контрольных точек. Вся информация по каждой критической контрольной точке находит отражение в итоговом документе, называемом план ХАССП.

Преимущества внедрения системы менеджмента на основе принципов ХАССП:

- системный и упреждающий подход к выявлению рисков в области пищевой безопасности, разработки и внедрения контрольных мер;
- предупреждение рисков, а не реагирование на уже возникшие опасности;
- возможность выхода на международный рынок; признание всеми организациями, входящими в мировую цепочку поставок пищевых продуктов;
- возможность создания эффективной системы менеджмента пищевой безопасности на базе уже существующих санитарно-гигиенических программ и планов производственного контроля;
- снижение количества ошибок в работе персонала за счет повышения уровня его подготовки;
- сокращение расходов на управленческую деятельность организации за счет их реструктуризации в части затрат на контроль и испытания продукции;
- получение тендерных конкурентных преимуществ в тендерах и на аукционах;
- повышение доверия потребителей к выпускаемой продукции, создание репутации производителя качественного и безопасного продукта питания;
- выполнение законодательных требований Республики Беларусь, стран ЕС и ЕАЭС

Принципы системы ХАССП:

- сбор исходной информации и анализ опасностей;
- определение критических контрольных точек (ККТ);
- установление критических пределов;
- организация системы мониторинга контроля ККТ;
- установление корректирующих действий в случае утери контроля над конкретной ККТ;
- разработка процедур, позволяющих установить эффективность работы системы ХАССП;
- утверждение документации для всех процедур и данных, относящихся к принципам ХАССП

Рис. 3. Принципы и преимущества использования системы менеджмента на основе принципов ХАССП

Fig. 3. Principles and benefits of use management systems based on HACCP principles

Главная задача разработки и внедрения системы ХАССП – провести анализ рисков для всех производственных процессов и выявить **критические контрольные точки** для каждого этапа. Разработка и внедрение ХАССП на предприятии необходимы для обеспечения контроля за безопасностью при производстве пищевой продукции [7].

Использование точек риска в системе управления рисками на предприятии повышает эффективность деятельности, минимизирует ущербы, позволяет спрогнозировать и предупредить негативные ситуации как в целом в бизнесе, так и в его отдельном сегменте. Выбор воздействия определяется как стратегическими, так и тактическими задачами, стоящими перед предприятием на текущий момент.

Рассмотрим опыт стран ЕАЭС в использовании точек риска на предприятиях различных видов экономической деятельности для повышения их эффективности и промышленной безопасности. Например, для повышения эффективности управления рисками Министерство энергетики Республики Казахстан разделило объекты генерации (ТЭЦ) по зонам риска. При разделении 37 ТЭЦ по зонам риска учитывались следующие факторы:

- износ оборудования (средний износ по анализируемым ТЭЦ 66 %, однако по пяти станциям износ превышает 80 %);
- количество технологических нарушений (аварийные отключения);
- срок эксплуатации объекта (средний срок эксплуатации по анализируемым ТЭЦ составил 61 год, в то же время более 76 % эксплуатируемых ТЭЦ имеют срок эксплуатации более 50 лет);
- нехватка технических специалистов, занятых обслуживанием ТЭЦ, в связи с низким уровнем заработной платы.

В результате проведенного анализа по вышеперечисленным факторам было установлено, что в критическую «красную» зону вошли 19 ТЭЦ. В зону «предупреждения», так называемую «желтую» зону, вошли 11 ТЭЦ. И только 7 ТЭЦ работают в благоприятных условиях, в «зеленой» зоне.

Полученная информация позволила:

- объективно оценить техническое состояние объектов генерации;

- сконцентрировать внимание на объектах, которые вошли в «красную» зону, обеспечивая их в первоочередном порядке необходимыми ресурсами, и усилить в дальнейшем контроль за их эксплуатацией;

- использовать положительный опыт ТЭЦ «зеленой» зоны и распространить его для руководства к действию на других объектах (бенчмаркинг) [8].

Техногенные факторы оказывают существенное влияние на безопасность объектов энергетики. Система управления рисками позволяет комплексно воздействовать на различные области рисков. В частности, на Барабинской ТЭЦ Новосибирской области осуществлен пилотный проект «Охота на риски», направленный на управление рисками для обеспечения производственной безопасности. Теперь риск-менеджер каждого цеха ТЭЦ проводит риск-сессии вверенного объекта с целью обнаружения рисков, ее фиксирования и разработки мероприятий, направленных на устранение риска. При опытной эксплуатации проекта риск-менеджерами проведены 22 риск-сессии и зафиксированы 89 рисков. Это позволило отделу охраны труда актуализировать информацию по возможным профессиональным рискам и принять меры по их устранению. Данный проект направлен на снижение и предотвращение профессиональных рисков персонала ТЭЦ [9].

Учет экологического риска особенно важен при эксплуатации объектов энергетики на густонаселенных территориях, в крупных промышленных центрах. Для этого проводятся различные мониторинги, обследования. Например, в Москве был выполнен экологический проект, цель которого заключалась в определении для каждого административного округа (АО) и в целом по городу наиболее опасных для здоровья населения ТЭЦ, а для наиболее опасных ТЭЦ – ориентировочной зоны их воздействия с точностью до района. Одна из ключевых задач, стоящих перед разработчиками, – дать количественную характеристику максимальной опасности, создаваемой каждой ТЭЦ.

Источниками информации стали максимальные и среднегодовые (плановые и реальные) выбросы по нескольким загрязняющим веществам, а также параметры труб (высота, диаметр, температура и объем выбрасываемого воздуха).

В результате обработки и анализа данных получены: ранжировка ТЭЦ по совокупной опасности по каждому АО и в среднем по городу с точки зрения максимальной потенциальной опасности, которую создает данная ТЭЦ для данной территории; ранжировка АО по совокупной опасности, создаваемой разными ТЭЦ; более детализированная информация об опасности, измеряемой через концентрацию, индивидуальный риск или популяционный риск, которая дана в разбивке по загрязнителям, территориям и ТЭЦ. Полученная сводная информация экологического риска ТЭЦ может быть использована как органами государственного управления, так и населением для идентификации потенциальных экологических угроз и принятия мер, направленных на их снижение [10].

Таким образом, определение точек риска – это достаточно распространенный инструмент по управлению рисками предприятий, в том числе и для предприятий энергетики. Так как для стабильной работы ТЭЦ наибольшее значение имеет производственный процесс, а следовательно, и учет производственно-технического риска, то выявление точек риска на ТЭЦ проведено, в первую очередь, для этого риска. Для исследования выбрана одна из действующих теплоэлектроцентралей Республики Беларусь. Проведенный анализ показал, что главные точки производственно-технического риска на теплоэлектростанции находятся в основном на крупном электротехническом оборудовании: котле, главном паропроводе и турбине. Обозначим элементы оборудования и возможные виды отказов или поломок, а также последствия этих отказов или поломок (табл. 1).

Отметим выявленные в ходе исследования точки производственно-технического риска на схеме теплоэлектростанции (рис. 4).

На рис. 4 видно, что точки производственно-технического риска располагаются не только на основном оборудовании, но также и в пункте подготовки топлива. Поэтому ответственными за производственно-технический риск должны быть назначены начальники топливного, электрического и котлотурбинного цехов. Подобный анализ по определению точек риска был проведен и для остальных видов риска теплоэлектростанции.

Таблица 1

Возможные виды отказов или поломок на основных типах оборудования тепловых электростанций
Possible types of failures or breakdowns on the main types of thermal power plant equipment

Тип оборудования	Элемент оборудования и возможные виды отказов или поломок	Последствие отказов или поломок
Котел	Присосы воздуха	Снижение коэффициента полезного действия (КПД)
	Горелки	Химический и физический недожог топлива, что приводит к снижению КПД
	Обмуровка котла	Повышенная теплоотдача в окружающую среду
Главный паропровод	Арматура в опорно-подвесной системе	Вибрация и микроудары приводят к нарушению в паропроводе
Паровая турбина	Присосы воздуха в вакуумную систему	Снижение КПД
	Эрозионный износ проточной части высокого давления турбины	Снижение КПД
	Качество питательной воды и перегретого пара	Заносы в части высокого давления паровой турбины (ЦВД) и, как следствие, увеличение расхода циркуляционной воды и электроэнергии на собственные нужды
Подогреватели высокого и низкого давления	Разрывы трубной системы	Снижение КПД турбины
Маслонаполненное оборудование	Отключение при повышенных или пониженных температурах наружного воздуха	Перебои в энергоснабжении потребителей

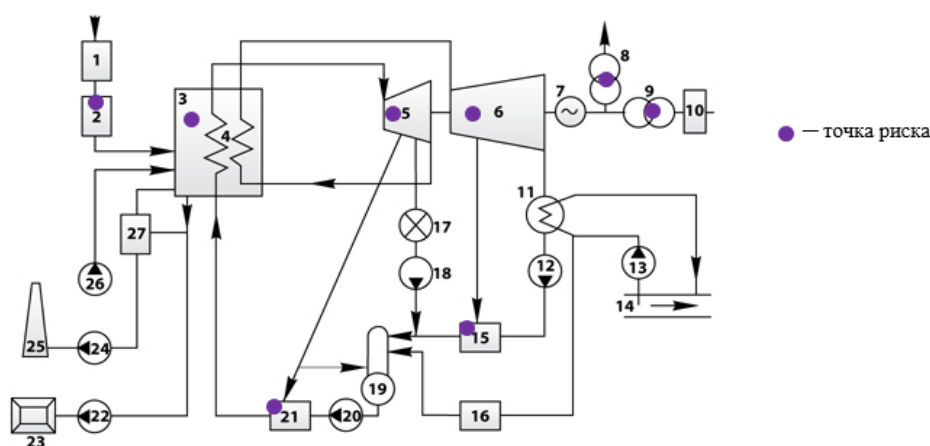


Рис. 4. Точки производственно-технического риска на тепловых электростанциях: 1 – топливное хозяйство; 2 – подготовка топлива; 3 – котел; 4 – промежуточный пароперегреватель; 5 – часть высокого давления паровой турбины; 6 – часть низкого давления паровой турбины; 7 – электрический генератор; 8 – трансформатор собственных нужд; 9 – трансформатор связи; 10 – главное распределительное устройство; 11 – конденсатор; 12 – конденсатный насос; 13 – циркуляционный насос; 14 – источник водоснабжения (например, река); 15 – подогреватель низкого давления; 16 – водоподготовительная установка; 17 – потребитель тепловой энергии; 18 – насос обратного конденсата; 19 – деаэрактор; 20 – питательный насос; 21 – подогреватель высокого давления; 22 – шлакозолоудаление; 23 – золоотвал; 24 – дымосос; 25 – дымовая труба; 26 – дутьевой вентилятор; 27 – золоуловитель

Fig. 4. Points of production and technical risk at thermal power plants: 1 – fuel handling facilities; 2 – fuel preparation; 3 – boiler; 4 – intermediate superheater; 5 – steam turbine high pressure part; 6 – steam turbine low pressure part; 7 – electric generator; 8 – auxiliary transformer; 9 – communication transformer; 10 – main switchgear; 11 – capacitor; 12 – condensate pump; 13 – circulation pump; 14 – source of water supply (for example, river); 15 – low pressure heater; 16 – water treatment plant; 17 – thermal energy consumer; 18 – return condensate pump; 19 – deaerator; 20 – feed pump; 21 – high pressure heater; 22 – slag and ash removal; 23 – ash dump; 24 – smoke exhaust; 25 – chimney; 26 – blower fan; 27 – ash catcher

ВЫВОДЫ

1. Управление рисками на энергетических предприятиях должно быть построено на основе системного подхода. Для этого прежде всего должны быть построены модель управления рисками и алгоритм ее реализации.

2. Одним из инструментов для определения ответственных за риски может стать определе-

ние точек риска на предприятии. Этот метод поможет наглядно определить «узкие» места в производстве и управлении предприятием и закрепить риски за теми специалистами, которые могут эффективно проводить мониторинг и принимать управленческие решения в отношении анализируемых рисков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тымуль, Е. И. Особенности формирования системы управления рисками на предприятиях энергетики / Е. И. Тымуль // Современное состояние экономических систем: управление, развитие, безопасность: сб. науч. трудов III Междунар. науч.-практ. конф., Тверь, 20 дек. 2022 г. Тверь: Тверской гос. техн. ун-т, 2023. С. 20–24.
2. Манцерова, Т. Ф. Возможные сценарии управления рисками промышленных предприятий / Т. Ф. Манцерова, Е. И. Тымуль // Экономическая наука сегодня: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С. Ю. Солодовников (председатель редкол.) [и др.]. Минск, 2015. Вып. 4. С. 124–131.
3. Тымуль, Е. И. Отраслевая специфика рисков в энергетике / Е. И. Тымуль // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых и инженерных подходов: сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию Белорус. нац. техн. ун-та, Минск, 29 окт. 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С. Ю. Солодовников (председатель) [и др.]. Минск, 2016. С. 504–507.
4. Тымуль, Е. И. Специфика бизнес-процессов для предприятий энергетики / Е. И. Тымуль // Экономическая наука сегодня: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С. Ю. Солодовников (председатель) [и др.]. Минск, 2018. Вып. 8. С. 322–328.
5. Тымуль, Е. И. Формирование системы управления рисками электростанций Республики Беларусь / Е. И. Тымуль // Новая экономика. 2021. № 2. С. 146–152.
6. Тымуль, Е. И. Основные этапы процесса управления рисками с учетом технологических особенностей производства / Е. И. Тымуль // Экономическая наука сегодня: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С. Ю. Солодовников (председатель) [и др.]. Минск, 2017. Вып. 6. С. 269–275.
7. Исследование моделей и методов анализа рисков в управлении качеством [Электронный ресурс]: лабораторный практикум по дисциплине «Системы поддержки принятия решений в процессах управления качеством» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; авт.-сост. Л. Р. Черняховская, С. В. Сильнова, Г. И. Рыжов. Уфа: УГАТУ, 2021. Режим доступа: https://ugatu.ru/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-80.pdf.
8. В каких казахстанских городах ТЭЦ в зоне риска [Электронный ресурс] // TengriNews. 2022. Режим доступа: https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/v-kakih-kazahstanskih-gorodah-tets-v-zoneriska-486484/. Дата доступа: 09.01.2024.
9. «На что охотимся?»: как проект по управлению рисками развивает методы производственной безопасности [Электронный ресурс] // ООО «Сибирская генерирующая компания». 2023. Режим доступа: <https://sibgenco.online/news/element/na-chto-okhotimsya-kak-proekt-po-upravleniyu-riskami-razvivaet-metody-proizvodstvennoj-bezopasnosti/>. Дата доступа: 09.01.2024.
10. Ранжировка ТЭЦ Москвы по опасности, создаваемой для районов города [Электронный ресурс] // Институт космических исследований – Режим доступа: <http://www.iki.rssi.ru/ehips/Moscow/MoscowStep1.htm>. Дата доступа: 09.01.2024.

Поступила 14.11.2023
Подписана к печати 16.01.2024
Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. Tymul E. I. (2023) Features of the Formation of a Risk Management System at Energy Enterprises. *Sovremennoe Sostoyanie Ekonomicheskikh Sistem: Upravlenie, Razvitie, Bezopasnost'*: Sb. Nauch. Trudov III Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Tver', 20 Dek. 2022 g. [Current state of Economic Systems: Management, Development: Collection of Scientific Papers of the 3rd International Scientific and Practical Conference, Tver, December 20, 2022]. Tver, Tver State Technical University, 20–24 (in Russian).
2. Mantserova T. F., Tymul E. I. (2015) Possible Scenarios for Risk Management of Industrial Enterprises. *Ekonomicheskaya Nauka Segodnya: Sb. Nauch. St.* [Economic Science Today: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, Is. 4, 124–131 (in Russian).
3. Tymul E. I. (2016) Industry Specific Risks in the Energy Sector. *Modernizatsiya Khozyaistvennogo Mekhanizma Skvoz' Prizmu Ekonomicheskikh, Pravovykh i Inzhenernykh Podkhodov*: Sb. Materialov VII Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Posvyashch. 95-Letiyu Belorus. Nats. Tekhn. Un-ta, Minsk, 29 Okt. 2015 g. [Modernization of the Economic Mechanism Through the Prism of Economic, Legal and Engineering Approaches: Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 95th Anniversary of the Belarusian National Technical University, Minsk, October 29, 2015]. Minsk, Belarusian National Technical University, 504–507 (in Russian).
4. Tymul E. I. (2018) Specifics of Business Processes for Energy Enterprises. *Ekonomicheskaya Nauka Segodnya: Sb. Nauch. St.* [Economic Science today: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, Is. 8, 322–328 (in Russian).
5. Tymul E. I. (2021) Formation of a Risk Management System for Power Plants of the Republic of Belarus. *Novaya Ekonomika* [New Economics], (2), 146–152 (in Russian).
6. Tymul E. I. (2017) The Main Stages of the Risk Management Process Taking Into Account the Technological Features of Production. *Ekonomicheskaya Nauka Segodnya: Sb. Nauch. St.* [Economic Science Today: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, Is. 6, 269–275 (in Russian).
7. Chernyakhovskaya L. R., Silnova S. V., Ryzhov G. I. (2021) *Study of models and Methods of Risk Analysis in Quality Management*. Ufa, Ufa State Aviation Technical University. Available at: https://ugatu.ru/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-80.pdf (in Russian).
8. In which Kazakh Cities are Thermal Power Plants at Risk? (2022). *TengriNews*. Available at: https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/v-kakih-kazahstanskih-gorodah-tets-v-zoneriska-486484/ (accessed 09 January 2024) (in Russian).
9. “What Are we Hunting for?»: How a Risk Management Project Develops Industrial Safety Methods. (2023) *LLC Siberian Generating Company*. Available at: <https://sibgenco.online/news/element/na-chto-okhotimsya-kak-proekt-po-upravleniyu-riskami-razvivaet-metody-proizvodstvennoj-bezopasnosti/> (accessed 09 January 2024) (in Russian).
10. Ranking of Moscow Thermal Power Plants According to the Danger Created for City Districts. *Space Research Institute*. Available at: <http://www.iki.rssi.ru/ehips/Moscow/MoscowStep1.htm> (accessed 09 January 2024) (in Russian).

Received: 14.11.2023
Accepted: 16.01.2024
Published online: 29.03.2024