

# 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 3 / 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

## CONTENTS

### Машиностроение и машиноведение

### Mechanical Engineering and Engineering Science

- Качанов И. В., Филипчик А. В., Ковалевич В. С.,  
Шаталов И. М., Недвецкий С. В.**  
Качество металлической поверхности  
после гидроабразивной очистки  
от коррозионных отложений . . . . . 185
- Devoino O. G., Gorbunov A. V., Lapkovsky A. S.,  
Lutsko N. I., Shpakevitch D. A., Gorbunova V. A.,  
Koval V. A.**  
Data Sets Formation on the Physical Properties  
of Oxide Scale Components for Theoretical  
Assessment of Efficiency Parameters of Laser  
Cleaning of Carbon Steels and Related Processes  
(**Девойно О. Г., Горбунов А. В.,  
Лапковский А. С., Луцко Н. И.,  
Шпакевич Д. А., Горбунова В. А., Коваль В. А.**  
Формирование базы данных по физическим  
свойствам компонентов оксидной окалины  
для теоретической оценки эффективности  
лазерной очистки углеродистых сталей  
и родственных технологий) . . . . . 192

- Kachanov I. V., Filipchik A. V., Kovalevich V. S.,  
Shatalov I. M., Nedvetsky S. V.**  
Quality of Metal Surface  
After Hydroabrasive Cleaning  
from Corrosive Deposits . . . . . 185
- Devoino O. G., Gorbunov A. V., Lapkovsky A. S.,  
Lutsko N. I., Shpakevitch D. A., Gorbunova V. A.,  
Koval V. A.**  
Data Sets Formation on the Physical Properties  
of Oxide Scale Components for Theoretical  
Assessment of Efficiency Parameters of Laser  
Cleaning of Carbon Steels and Related Processes . . . . . 192

**Королёв А. Ю.**  
Имплантаты на основе металлических материалов:  
обзор материалов и конструкций ..... 204

**Строительство**

**Leonovich S. N., Sadovskaya E. A.**  
Strength Indicators of Fiber Reinforced Concrete  
with Carbon Nanomaterials  
(**Леонович С. Н., Садовская Е. А.**  
Прочностные показатели фибробетона  
с углеродными наноматериалами) ..... 219

**Ливанский Д. Г.**  
Локальная система отопления для повышения  
комфорта зрителей на трибунах крытого  
ледового катка ..... 225

**Афанасенко А. А.**  
Оптимизация зернового состава  
асфальтобетонных смесей с целью обеспечения  
максимальной плотности ..... 235

**Гуринович В. Ю., Поздняков Д. А.,  
Юхневский П. И.**  
Планирование производственных мощностей  
предприятий индустриального домостроения  
в условиях изменения спроса на продукцию ..... 242

**Транспорт**

**Жданович Ч. И.**  
Бесступенчатая двухпоточная  
гидрообъемно-механическая трансмиссия  
гусеничного трактора ..... 251

**Экономика**

**Синицкая О. А., Дойлидо Т. А., Месник Д. Н.**  
Структурные преобразования затрат  
на перевозки пассажиров городским  
электрическим транспортом ..... 261

**Korolyov, A. Yu.**  
Metal-Based Implants: Review of Materials  
and Designs ..... 204

**Civil and Industrial Engineering**

**Leonovich S. N., Sadovskaya E. A.**  
Strength Indicators of Fiber Reinforced Concrete  
with Carbon Nanomaterials ..... 219

**Livanskiy D. G.**  
Local Heating System to Increase  
the Comfort of Spectators in the Stands  
of the Indoor Ice Rink ..... 225

**Afanasenka A. A.**  
Optimization of Aggregate Composition  
of Asphalt Concrete Mixtures  
to Ensure Maximum Density ..... 235

**Gurinovich V. Yu., Pozdnyakov D. A.,  
Yukhnevskiy P. I.**  
Planning of Production Capacities of Precast  
Construction Plants under Conditions of Changes  
in Demand for Products ..... 242

**Transport**

**Zhdanovich Ch. I.**  
Continuously Variable Two-Flow  
Hydrostatic-Mechanical Transmission  
of Crawler Tractor ..... 251

**Power Engineering**

**Sinitskaya V. A., Doilido T. A., Mesnik D. N.**  
Structural Transformations  
of Passenger Transportation Costs  
by Urban Electric Transport ..... 261

**Главный редактор**  
**Борис Михайлович Хрусталев**

**Редакционная коллегия**

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

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

**Editorial Board**

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

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

Ответственный секретарь редакционной коллегии  
В. Г. Горбаш

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

Executive Secretary of Editorial Board  
V. G. Gorbash

**Ведущий 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 31.05.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 10,75. Уч.-изд. л. 9,46. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 3820000006896 от 03.03.2014.  
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2024

**Lead Science Editor**

V. N. Guryanichyк

**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/10.21122/2227-1031-2024-23-3-185-191>

УДК 62-757.73

## Качество металлической поверхности после гидроабразивной очистки от коррозионных отложений

Докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. А. В. Филипчик<sup>2)</sup>,  
инженеры В. С. Ковалевич<sup>3)</sup>, И. М. Шаталов<sup>1)</sup>, С. В. Недвецкий<sup>4)</sup>

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

<sup>2)</sup>Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова  
Белорусского государственного университета (Минск, Республика Беларусь),

<sup>3)</sup>ОАО «Белсудопроект» (Гомель, Республика Беларусь),

<sup>4)</sup>Институт переподготовки и повышения квалификации ГУО «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси»  
(д. Светлая Роща, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Приводится краткий аналитический обзор существующих гидравлических способов и методов, используемых для удаления коррозионных отложений, образующихся на металлических поверхностях. Описывается эффективный способ очистки – гидроабразивная очистка с использованием в своем составе бентонитовой глины, кальцинированной соды и полиакриламида, которые позволяют не только повысить качество очищаемой поверхности, но и сформировать на ней коррозионно-защитное пленочное покрытие. Приводятся результаты экспериментальных исследований по изучению влияния параметров технологии гидроабразивной очистки на обрабатываемую поверхность образцов, изготовленных из сталей Ст3, Ст20 и Ст45. Показано, что изменение параметров гидроабразивной обработки (скорости струи, расстояния до обрабатываемой поверхности, времени) позволяет достичь шероховатости металлоизделий в диапазоне от 3,2 до 12,5 мкм. Установлено, что применение новой технологии гидроабразивной обработки приводит к получению очищенных от коррозионных отложений металлических поверхностей с минимальной шероховатостью до 0,01 мкм. Также показано, что при концентрации бентонитовой глины 2–4 % можно достичь шероховатости поверхностей в диапазоне 20–30 мкм, что является оптимальным для технологического процесса газопламенного напыления. При концентрации бентонитовой глины 0,5–2 % можно достичь шероховатости поверхностей в диапазоне 30–50 мкм, что является оптимальным для последующего процесса покраски. Кроме того, при проведении гидроабразивной очистки на обработанных металлических поверхностях формируется долговременное антикоррозионное покрытие, которое сохраняет свои свойства в течение длительного времени (до 1 года).

**Ключевые слова:** коррозия, материал, очистка, металл, машины, механизмы, технология, машиностроение, струя, шероховатость, покрытие, бентонитовая глина

**Для цитирования:** Качество металлической поверхности после гидроабразивной очистки от коррозионных отложений / И. В. Качанов [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 3. С. 185–191. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-185-191>

### Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 249-56-77  
hidrokaf@bntu.by

### Address for correspondence

Kachanov Igor V.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 249-56-77  
hidrokaf@bntu.by

## Quality of Metal Surface After Hydroabrasive Cleaning from Corrosive Deposits

I. V. Kachanov<sup>1)</sup>, A. V. Filipchik<sup>2)</sup>, V. S. Kovalevich<sup>3)</sup>, I. M. Shatalov<sup>1)</sup>, S. V. Nedvetsky<sup>4)</sup>

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

<sup>2)</sup>International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>3)</sup>JSC «Belsudoproekt» (Gomel, Republic of Belarus),

<sup>4)</sup>Institute for Retraining and Advanced Training of the State Educational Institution University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, (v. Svetlaya Roshcha, Republic of Belarus)

**Abstract.** A brief analytical review of existing hydraulic methods and techniques used to remove corrosive deposits formed on metal surfaces is provided. An effective cleaning method is described – hydro-abrasive cleaning (HAC) using bentonite clay, soda ash and polyacrylamide in its composition, which can not only improve the quality of the surface being cleaned, but also form a corrosion-protective film coating on it. The results of experimental research to study the influence of hydro-abrasive cleaning technology parameters on the processed surface of samples made from steels Ст3 (St3), Ст20 (St20) and Ст45 (St45) are presented. It has been shown that changing the parameters of hydro-abrasive cleaning (jet speed, distance to the treated surface, time) makes it possible to achieve a roughness of metal products ranging from 3.2  $\mu\text{m}$  to 12.5  $\mu\text{m}$ . It has been established that the use of a new technology of hydro-abrasive cleaning (HAC) results in the removal of corrosive deposits from metal surfaces with a minimum roughness of up to 0.01 microns. It has also been shown that with a bentonite clay content of 2–4 %, it is possible to achieve surface roughness in the range of 20–30  $\mu\text{m}$ , which is optimal for the flame spraying process. With a bentonite clay content of 0.5–2 %, a surface roughness of 30–50  $\mu\text{m}$  can be achieved, which is optimal for the subsequent painting process. In addition, when carrying out hydro-abrasive cleaning (HAC) on the treated metal surfaces, a long-term anti-corrosion coating is formed, which retains its properties for a long time (up to 1 year).

**Keywords:** corrosion, material, cleaning, metal, machines, mechanisms, technology, mechanical engineering, jet, roughness, coating, bentonite clay

**For citation:** Kachanov I. V., Filipchik A. V., Kovalevich V. S., Shatalov I. M., Nedvetsky S. V. (2024) Quality of Metal Surface After Hydroabrasive Cleaning from Corrosive Deposits. *Science and Technique*. 23 (3), 185–191. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-185-191> (in Russian)

### Введение

Машиностроительное производство характеризуется существенной зависимостью от иностранных материальных ресурсов и энергоносителей, поставляемых по мировым ценам. При работе в таких условиях эффективность производства может быть достигнута за счет оптимального использования энерго- и ресурсосберегающих технологий.

Определяющее значение в достижении высокой эффективности технологического процесса производства деталей машин и механизмов имеют результаты качественной очистки металлов от продуктов коррозии с помощью гидроабразивных операций, а также получения необходимых параметров шероховатости для последующих производственных операций [1–5].

Предпочтительным для оценки качества поверхности является параметр шероховатости  $Ra$ , который характеризует среднеарифметическое отклонение профиля.

Согласно инструкции по визуально-измерительной проверке РД 03-606-03, поверхность

металлоизделия должна быть очищена от продуктов коррозии и загрязнений, при этом шероховатость поверхностей деталей сварных соединений, а также плоскость разделки кромок деталей не должна достигать  $Ra = 12,5$  мкм. При проведении последующих методов неразрушающего контроля шероховатость поверхностей металлоизделий должна составлять не более:

- при капиллярном контроле  $Ra = 3,2$  мкм;
- при магнитопопорошковом контроле  $Ra = 10$  мкм;
- при ультразвуковом контроле  $Ra = 6,3$  мкм.

При газопламенном напылении металлическая поверхность должна быть очищена от коррозии, брызг металла и загрязнений и иметь шероховатость по параметру  $Ra = 20–30$  мкм для лучшей адгезии наносимого покрытия с металлической основой [6].

Для обеспечения эффективной адгезии слоев краски к очищенной поверхности металлоизделий в процессе окраски применяется технология, которая требует достижения определенного показателя шероховатости  $Ra$ , находящегося в диапазоне от 30 до 50 мкм.

Этот диапазон шероховатости обеспечивает оптимальные условия для прочного сцепления красочных материалов с поверхностью и, следовательно, повышает долговечность покрытия. При правильной регулировке режимов сушки после окраски достигается долговечное покрытие металлических изделий [7].

При показателях параметра шероховатости  $Ra = 0,16-0,01$  мкм полированной поверхности происходит повышение коррозионной стойкости [8] производственных деталей, что способствует увеличению межоперационного технологического периода.

Необходимо отметить, что под воздействием атмосферной коррозии детали, очищенные по технологии ГАО, могут подвергаться повторной коррозии при нахождении в производственных условиях (межоперационный период более 8 ч).

Технологии струйной обработки сжатым воздухом, предназначенные для очистки металлоизделий от коррозии (пескоструйные, дробеструйные и т. д.), в которых применяется абразивный материал (различные металлические дробы, песок, сухой лёд и т. д.), имеют ряд существенных недостатков:

- процесс удаления коррозии сопровождается интенсивным выделением пыли, что требует применения специализированных средств защиты для персонала;
- частицы абразивного материала остаются на обработанной поверхности, что неблагоприятно сказывается на последующих эксплуатационных характеристиках деталей;
- применение шаржирования, при котором металлическая поверхность очищается с использованием дробы, требует дополнительных энергетических затрат для их удаления;
- не соответствуют технологическим требованиям по повторному образованию коррозионных отложений;
- увеличение температуры в зоне обработки.

Для удаления коррозионных отложений с металлических поверхностей используются гидравлические методы, исключаящие содержание пыли в воздухе и температуры в области обработки. Гидравлические методы очистки металлических поверхностей от коррозии могут классифицироваться на: гидродинамический, кавитационный (очистка струей жидкости с использованием эффекта кавитации) и гидроабразивный [1–3].

*Гидродинамический способ* очистки металлических поверхностей от коррозии предусматривает использование струй воды различных параметров давлений [1]:

- низкого (до 1 МПа);
- среднего (1–5 МПа);
- высокого (5–60 МПа).

Использование метода гидродинамической очистки помогает избежать повреждений на очищаемых металлоизделиях. В процессе очистки получается очищенная поверхность более высокого качества, чем при механической обработке с помощью фрезеровки или шарошек [1].

К недостаткам гидродинамической очистки можно отнести:

- гидродинамические установки имеют значительную стоимость;
- гидродинамические методы очистки потребляют большое количество энергии для обеспечения процесса очистки;
- применение гидродинамических методов очистки может приводить к повышенному износу устройств, ответственных за формирование струи;
- возникает проблема отсутствия защиты от повторного образования коррозии на очищенной поверхности, для предотвращения повторной коррозии необходимо применять дополнительные методы защиты, такие как нанесение защитных покрытий или антикоррозионных составов, чтобы сохранить и продлить эффективность очистки.

*Кавитационный способ* очистки использует энергию схлопывания парогазового пузырька при контакте с очищаемой поверхностью. В результате этого процесса происходит местное ослабление прочности материала, что позволяет гидродинамической силе струи разрушить и удалить загрязнения [1].

Недостатки кавитационного способа очистки:

- после очистки поверхностей с использованием кавитационного метода существует риск быстрого возникновения повторной коррозии;
- требуется обязательное пассивирование поверхности обработанного металлоизделия;
- возникает проблема повышенного износа устройств, отвечающих за формирование струи.

Гидроабразивная обработка (ГАО) – это эффективный способ очистки металлоизделий от коррозионных отложений. Данная технология является перспективной для очистки от нагара, окисных пленок и других загрязнений с деталей машин и механизмов. В процессе гидроабразивной обработки такие частицы, как песок, гранит или стекло, применяются в струйном потоке для повышения эффективности очистки [1].

При гидроабразивной обработке на поверхности обрабатываемой детали образуется жидкостная пленка, которая заполняет ее неровности. При ударе абразивных частиц по выступающим неровностям, эти частицы не преодолевают сопротивления жидкостной пленки и воздействуют только на выступы. Частицы, попадающие во впадины, должны преодолеть сопротивление жидкостной пленки, и их воздействие на очищаемую поверхность ограничено. В результате этого процесса постепенно снижается шероховатость обрабатываемой поверхности, что способствует получению поверхности с более низкими параметрами шероховатости [1, 3].

Гидроабразивный способ очистки имеет следующие преимущества:

- очистка поверхностей от коррозии отличается отсутствием образования пыли в процессе обработки;
- решает проблему ухудшения прочностных характеристик обрабатываемой поверхности путем эффективного отвода теплоты за счет использования воды в процессе очистки.
- позволяет формировать поверхность с необходимыми характеристиками рельефа (шероховатость);
- обработка поверхностей от коррозионных отложений обеспечивает продление срока службы абразивного материала в 2–3 раза по сравнению с пескоструйной обработкой благодаря амортизирующему действию рабочей жидкости.

Но, конечно, нельзя не отметить и недостатки, возникающие при таком способе очистки изделия. В процессе гидроабразивной очистки не решается проблема противокоррозионной защиты. Это может привести к существенному сокращению временного интервала между операциями из-за риска повторной коррозии очищенной поверхности.

## Основная часть

На кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ предложен новый метод борьбы с коррозионными отложениями на металлических поверхностях, основанный на анализе преимуществ и недостатков современных технологий ГАО. Этот метод использует в своем составе: бентонитовую глину, кальцинированную соду и полиакриламид, которые позволяют не только очистить поверхности, но и формировать защитное пленочное покрытие. Важно отметить, что данная разработка обладает технической новизной и имеет соответствующие патенты [9, 10].

Отсутствие исследований, касающихся влияния концентрации компонентов в составе рабочей жидкости на параметры шероховатости металлоизделия и процессы формирования защитных пленочных покрытий на обработанной поверхности, обеспечивает основу для более детального исследования данного вопроса.

Для оценки воздействия различных режимов гидроабразивной обработки на параметры шероховатости металлоизделия, которое было предварительно очищено от коррозионных отложений, проводились лабораторные исследования на образцах из сталей Ст3, Ст20 и Ст45 (образцы толщиной  $S = 4$  мм с размерами  $100 \times 100$  мм). В процессе обработки использовалась струя рабочей жидкости со следующими концентрациями компонентов: 3 % бентонита ( $K_b$ ), 5–10 % полиакриламида ( $K_p$ ), 2 % кальцинированной соды ( $K_{kc}$ ), остальное – вода.

В Государственном научном учреждении «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа» (Минск) проведены исследования морфологических характеристик. Определение шероховатости поверхности производилось с использованием профилометра-профилографа модели 252 тип А1. Для анализа морфологии покрытий был применен сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) модели Cam Scan от Oxford Instruments (Великобритания). Микроскоп функционировал в режиме отраженных электронов при напряжении ускорения 20 кВ и масштабировании в диапазоне 50–5000 крат.

На рис. 1 изображено влияние расстояния  $L$  между торцом сопла и обрабатываемой поверхностью на шероховатость поверхности  $Ra$  при заданной скорости струи  $v_{стр} = 200$  м/с и выходном диаметре сопла  $d_k = 1$  мм.

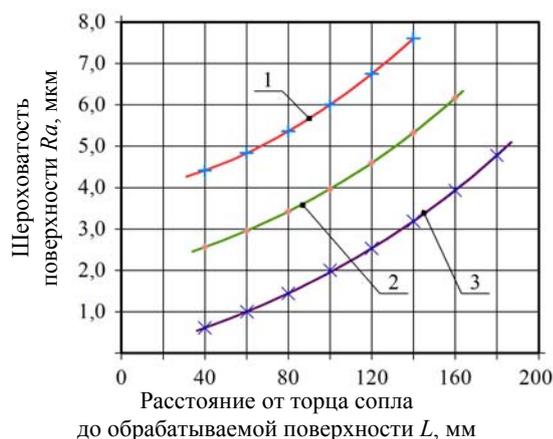


Рис. 1. Зависимость шероховатости обрабатываемой поверхности от расстояния между торцом сопла и обрабатываемой поверхностью:  
1 – Сталь 45; 2 – Сталь 20; 3 – Сталь 3

Fig. 1. Dependence of roughness of the processed surface on the distance between the nozzle end and the processed surface:  
1 – Steel 45; 2 – Steel 20; 3 – Steel 3

На рис. 2 представлено влияние различных параметров скорости струи  $v_{стр}$  на шероховатость обрабатываемой поверхности  $Ra$  при выходном диаметре сопла  $d_k = 1$  мм.

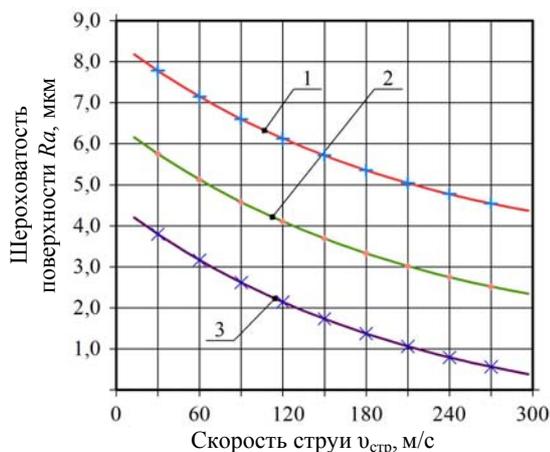


Рис. 2. Зависимость параметров шероховатости обрабатываемого металлоизделия от значений скорости струи компонентов рабочей жидкости:  
1 – Сталь 45; 2 – Сталь 20; 3 – Сталь 3

Fig. 2. Dependence of roughness parameters of the processed metal product on the jet speed values of the working fluid elements:  
1 – Steel 45; 2 – Steel 20; 3 – Steel 3

Рис. 3 демонстрирует зависимость шероховатости металлоизделия  $Ra$  от времени обработки при следующих условиях:  $v_{стр} = 250$  м/с,  $d_k = 1$  мм,  $L = 50$  мм.

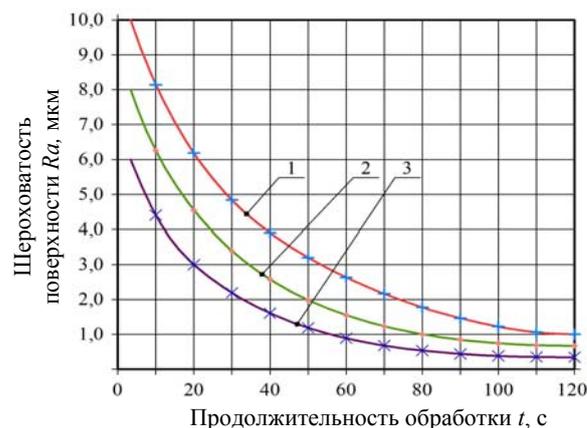


Рис. 3. Зависимость шероховатости обрабатываемой поверхности от продолжительности обработки:  
1 – Сталь 45; 2 – Сталь 20; 3 – Сталь 3

Fig. 3. Dependence of roughness of the processed surface on the processing duration:  
1 – Steel 45; 2 – Steel 20; 3 – Steel 3

Эффект увеличения концентрации бентонита на шероховатость  $Ra$  металлоизделия при  $v_{стр} = 200$  м/с,  $d_k = 1$  мм,  $L = 200$  мм иллюстрирует рис. 4.

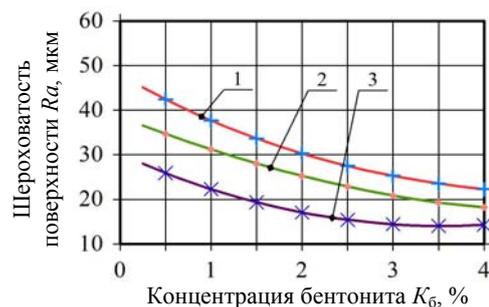


Рис. 4. Зависимость шероховатости обрабатываемого металлоизделия от увеличения концентрации бентонита в составе компонентов рабочей жидкости:  
1 – Сталь 45; 2 – Сталь 20; 3 – Сталь 3

Fig. 4. Dependence of roughness of the metal product being processed on an increase in the concentration of bentonite in the components of the working fluid:  
1 – Steel 45; 2 – Steel 20; 3 – Steel 3

Фотографии участков поверхности, на которых изучалась морфология пленочных покрытий, представлены на рис. 5а, б. После обработки образцы были высушены на открытом воздухе при температуре  $T = 20$  °С в течение 20–24 ч.

Исходя из анализа рис. 5а видно, что на обработанных стальных образцах формируется плотное покрытие, состоящее из отдельных чешуек. Расположенные на рис. 5б участки, обозначенные как позиции 1–4, представляют наглядные результаты процесса очистки.

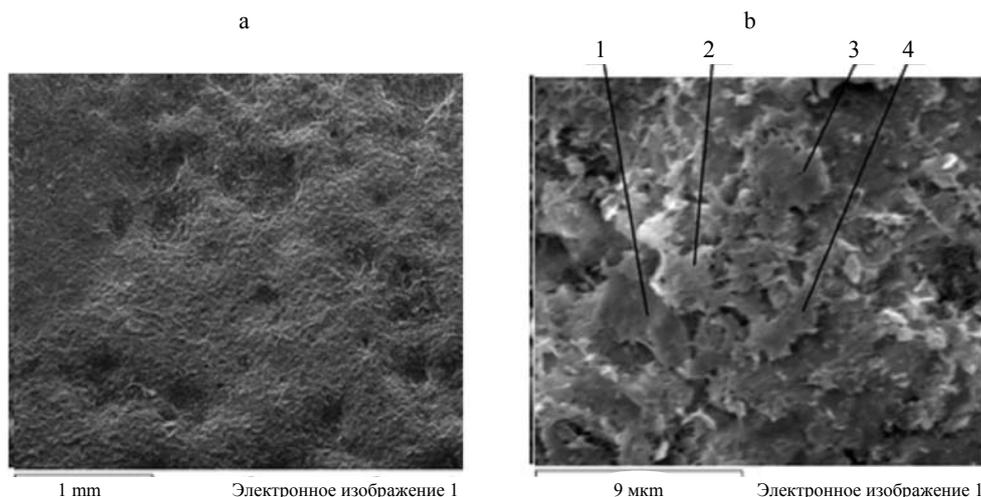


Рис. 5. Внешний вид защитного пленочного покрытия, создаваемого на поверхности образцов после гидроабразивной очистки с использованием в качестве одного из компонентов бентонитовой глины: 1, 2, 3, 4 – чешуйки, основная структурная составляющая сформированного защитного покрытия; а – увеличение  $\times 40$ ; б – увеличение  $\times 5000$ ; материал – Ст3;  $K_6 = 3\%$ ,  $K_{II} = 10^{-5}\%$ ,  $K_{к.с} = 2\%$ , остальное – вода,  $v_{стр} = 185$  м/с

Fig. 5. Outward appearance of the protective film coating, which is created on the surface of the samples following hydro-abrasive cleaning utilizing bentonite clay as one of the components: 1, 2, 3, 4 – scales – the main structural component of the formed protective coating; а – magnification  $\times 40$ ; б – magnification  $\times 5000$ ; material – Steel 3;  $K_{6(b)} = 3\%$ ,  $K_{II(p)} = 10^{-5}\%$ ,  $K_{к.с(k.s.)} = 2\%$ , the rest is water,  $v_{стр(str)} = 185$  m/s

### Результаты исследования и их обсуждение

Полученные в ходе лабораторных испытаний результаты (рис. 1–3) свидетельствуют о том, что изменение параметров гидроабразивной обработки ( $v_{стр}$ ,  $L$ ,  $t$ ) позволяет достичь шероховатости металлоизделий в диапазоне  $Ra = 3,2$ – $12,5$  мкм для проводимых впоследствии операций сварочного производства.

Изменяя концентрацию бентонита в составе компонентов рабочей жидкости ( $K_6 = 2$ – $4\%$ ), а также при заданных значениях  $v_{стр} = 200$  м/с,  $d_k = 1$  мм и  $L = 200$  мм можно достичь требуемой шероховатости поверхностей в диапазоне  $Ra = 20$ – $30$  мкм. Это является оптимальным для технологического процесса газопламенного напыления, как показано на рис. 4 (кривая 1).

При увеличении концентрации бентонита в составе компонентов рабочей жидкости ( $K_6$  от  $0,5$  до  $2\%$ ) и при заданных значениях  $v_{стр} = 200$  м/с,  $d_k = 1$  мм и  $L = 200$  мм можно достичь требуемой шероховатости поверхностей в диапазоне  $Ra = 30$ – $50$  мкм. Это является оптимальным для последующего процесса покраски, как показано на рис. 4 (кривая 1).

Применение новой технологии гидроабразивной обработки приводит к получению очищенных от коррозионных отложений металлических поверхностей с минимальной шероховатостью  $Ra = 0,16$ – $0,01$  мкм, как показано на рис. 1–3. Это имеет положительное влияние на коррозионную стойкость деталей. Кроме того, при проведении ГАО формируется долговременное антикоррозионное покрытие (показано на рис. 5), которое сохраняет свои свойства в течение 1 года.

### ВЫВОДЫ

1. На основе проведенных экспериментальных исследований разработана новая энергосберегающая технология гидроабразивной обработки, которая позволяет эффективно очищать металлические поверхности от коррозионных отложений и одновременно формировать коррозионно-защитное пленочное покрытие.

2. Применение различных параметров очистки ( $v_{стр}$ ,  $L$ ,  $t$ ,  $K_6$ ) в рамках новой технологии гидроабразивной обработки позволяет получать поверхности с необходимыми значениями шероховатости, что является важным для последующих технологических операций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. 167 с.
  2. Гидроабразивная технология очистки металлических поверхностей гребных винтов от коррозии / И. В. Качанов [и др.] // Вестник БарГУ. Сер. технических наук. 2021. Вып. 10. С. 51–60.
  3. Практическое применение гидроабразивной очистки металлических поверхностей от коррозии при эксплуатации пожарной аварийно-спасательной техники / А. В. Филипчик [и др.] // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы: сб. материалов V Международ. заочной науч.-практ. конф., Светлая Роща, 25 июня 2021. Светлая Роща: филиал ИПП УГЗ МЧС Беларуси, 2021. С. 102–104.
  4. Практическое применение гидроабразивной очистки металлических поверхностей от коррозии / И. В. Качанов [и др.] // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: сб. материалов республиканской науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2021. С. 104–108.
  5. Агасарян, Р. Р. Струйно-абразивная обработка металлов / Р. Р. Агасарян, Р. Т. Дохинян. Ереван: АтрНИИТИ, 1990. 51 с.
  6. Ярошевич, В. К. Коленчатые валы автомобильных двигателей / В. К. Ярошевич, М. А. Белоцерковский, Е. Л. Савич. Минск: БНТУ, 2004. 176 с.
  7. Искра, Е. В. Справочник по окраске судов и металлических конструкций / Е. В. Искра, Е. П. Куцевалова. Л.: Судостроение, 1980. 263 с.
  8. Маркова, Т. В. Шероховатость поверхности: метод. указания / Т. В. Маркова, И. М. Крыжановская. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 32 с.
  9. Способ создания кавитирующей струи жидкости: пат. ВУ 13312 / И. В. Качанов, В. Н. Яглов, В. К. Недбальский, А. В. Филипчик. Опубл. 30.06.2010.
  10. Способ очистки металлических поверхностей: пат. ВУ 21512 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, А. С. Исаенко. Опубл. 30.12.2017.
- Поступила 07.12.2023  
Подписана к печати 07.02.2024  
Опубликована онлайн 31.05.2024

## REFERENCES

1. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Babich V. E., Zhuk A. N., Ushev S. I. (2016) *Technology of Hydroabrasive Cleaning and Corrosion Protection of Steel Products Using Bentonite Clay*. Minsk, Belarusian National Technical University. 167 (in Russian).
2. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Shatalov I. M., Bulyga D. M., Kovalevich V. S., Nedvetsky S. V., Denisov V. A. (2021) Hydro-Abrasive Technology for Cleaning Metal Surfaces of Propellers from Corrosion. *Vestnik BarGU. Ser. Tekhnicheskie Nauki = BarSU. Herald. Series Engineering*, (10), 51–60 (in Russian).
3. Filipchik A. V., Kovalevich V. S., Bychek A. B., Losich A. I., Bontsevich A. A. (2021) Practical Application of Waterjet Cleaning of Metal Surfaces from Corrosion during the Operation of Fire Rescue Equipment. *Preduprezhdenie i Likvidatsiya Chrezvychaynykh Situatsii: Metody, Tekhnologii, Problemy i Perspektivy: Sb. Materialov V Mezhdunar. Zaochnoi Nauch.-Prakt. Konf., Svetlaya Roshcha, 25 iyunya 2021* [Prevention and Response to Emergency Situations: Methods, Technologies, Problems and Prospects: Collection of Materials of the 5<sup>th</sup> International-Correspondence Scientific and Practical Conference, Svetlaya Roshcha, Branch of the Institute of Retraining and Advanced Qualifications of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of the Republic of Belarus June 25, 2021]. Svetlaya Roshcha, 102–104 (in Russian).
4. Kachanov I. V., Shatalov I. M., Filipchik A. V., Nedvetskii S. V., Kovalevich V. S. (2021) Practical Application of Water Jet Cleaning of Metal Surfaces From Corrosion. *Innovatsionnye Tekhnologii v Vodnom, Kommunal'nom Khozyaistve i Vodnom Transporte: Sb. Materialov Respublikanskoi Nauch.-Tekhn. Konf.* [Innovative Technologies in Water, Municipal Services and Water Transport: Collection of Materials of the Republican Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 104–108 (in Russian).
5. Agasaryan R. R., Dohinyan R. T. (1990) *Jet-Abrasive Processing of Metals*. Yerevan, Publishing House of AtrNIINTI, 1990. 51 p.
6. Yaroshevich V. K., Belotserkovsky M. A., Savich E. L. (2004) *Crankshafts of Automobile Engines*. Minsk, Belarusian National Technical University. 176 (in Russian).
7. Iskra E. V., Kutsevalova E. P. (1980) *Guide to Painting Boats and Metal Structures*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 263 (in Russian).
8. Markova T. V., Kryzhanovskaya I. M. (2006) *Surface Roughness: Methodological Guidelines*. Saint Petersburg, Publishing House of Polytechnical University. 32 (in Russian).
9. Kachanov I. V., Yaglov V. N., Nedbalsky V. K., Filipchik A. V. (2010) *Method for Creating Cavitating Jet of Liquid*. Patent BY 13312 (in Russian).
10. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Filipchik A. V., Isaenko A. S. (2017) *Method for Cleaning Metal Surfaces*. Patent BY 21512 (in Russian).

Received: 07.12.2023

Accepted: 07.02.2024

Published online: 31.05.2024

## Data Sets Formation on the Physical Properties of Oxide Scale Components for Theoretical Assessment of Efficiency Parameters of Laser Cleaning of Carbon Steels and Related Processes

O. G. Devoino<sup>1)</sup>, A. V. Gorbunov<sup>2)</sup>, A. S. Lapkovsky<sup>1)</sup>, N. I. Lutsko<sup>1)</sup>,  
D. A. Shpachkevitch<sup>1)</sup>, V. A. Gorbunova<sup>1)</sup>, V. A. Koval<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Aeronautics Institute of Technology (Sao Jose dos Campos, Brazil)

© Белорусский национальный технический университет, 2024

Belarusian National Technical University, 2024

**Abstract.** There is a need in machine-building industries nowadays to automate technologies, in particular, laser ones, to remove surface oxide layers – mill scale, rust – from steel products/pieces in order to improve the energy effectiveness of processing. Herewith, a theoretical assessment method for the intensity of heating of the oxide layer and the phase transition in it can be used to optimize laser cleaning (LC) of the steel surface. To realize this, it is possible to use some calculation and modeling procedures that require, as a first step, the data collection and verification on the temperature-dependent properties of iron-containing condensed phases, as possible components contained, in particular, in scale, which is typically widespread into various metal products. In this regard, the formation of database for characteristics of oxide scale components by the way of selection of information on thermophysical (including optical) properties of the components mentioned and of steel base, which are required for a reliable calculation of the thermal efficiency parameters of the technology for laser cleaning of carbon steels, as well as such actively developed related technologies as laser cutting, drilling, coating remelting, etc., was chosen as the task of our research. An analytical overview of published experimental data made it possible to systematize information on a number of transport and other physical properties of iron-containing components at ambient pressure, including thermal conductivity ( $\kappa$ ) and diffusivity ( $a$ ), density  $\rho$ , irradiation absorptance and integral emissivity in the temperature range from  $T \approx 298$  K to the melting temperatures of oxide and metal phases and above them. At the same time, a preliminary thermochemical estimation shows (on the calculated data) the existence of such thermodynamically stable forms of the condensed phase in the heating spot of scale layers during its LC at the melting point and above it, as  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$ , and  $\text{Fe}$ , which is consistent with known experimental data. Comparison of the values of  $a$  calculated by us (using the published values of  $\kappa$ ,  $\rho$  and molar heat capacity and using extrapolation in the high-temperature region) for the types of scale components under consideration with a set of experimental values of this parameter in current literature revealed the presence of differences for both oxide and metal phases. These new values make it possible to fill in a gap in the temperature range  $T = 1600\text{--}1800$  K that existed in the data on the thermal diffusivity. The value of  $a = (0.83\text{--}0.92) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  was also calculated for liquid iron oxide for the  $T \approx 1800$  K, which was not measured experimentally, that, obviously, prevented modeling of not only laser surface processing, melting and cleaning of steels, but also calculations in the field of metallurgical and other technologies, which are characterized by the presence of iron oxide melts during heating.

**Keywords:** laser processing, removal of surface oxide layers, mill scale, steel, iron(II) and iron(III) oxides, melting, evaporation, theoretical estimation, efficiency parameters, physical properties, thermal conductivity and diffusivity, absorptance, values comparison.

**For citation:** Devoino O. G., Gorbunov A. V., Lapkovsky A. S., Lutsko N. I., Shpachkevitch D. A., Gorbunova V. A., Koval V. A. (2024) Data Sets Formation on the Physical Properties of Oxide Scale Components for Theoretical Assessment of Efficiency Parameters of Laser Cleaning of Carbon Steels and Related Processes. *Science and Technique*. 23 (3), 192–203. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-192-203>

### Адрес для переписки

Горбунова Вера Алексеевна  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 67,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-92-71  
ecology@bntu.by

### Address for correspondence

Gorbunova Vera A.  
Belarusian National Technical University  
67, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-92-71  
ecology@bntu.by

## Формирование базы данных по физическим свойствам компонентов оксидной окалины для теоретической оценки эффективности лазерной очистки углеродистых сталей и родственных технологий

Докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно<sup>1)</sup>, канд. техн. наук А. В. Горбунов<sup>2)</sup>,  
А. С. Лапковский<sup>1)</sup>, Н. И. Луцко<sup>1)</sup>, Д. А. Шпакевич<sup>1)</sup>, канд. хим. наук, доц. В. А. Горбунова<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. В. А. Коваль<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Технологический институт аэронавтики (Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия)

**Реферат.** В настоящее время в машиностроительных производствах имеется потребность в автоматизации технологий, в частности лазерных, для удаления оксидных слоев – окалины, ржавчины – со стальных изделий с целью улучшения энергоэффективности обработки. При этом можно использовать теоретическую оценку интенсивности нагрева оксидного слоя и фазового перехода в нем для оптимизации лазерной очистки (ЛО) поверхности стали. Для нее требуются специальный сбор и верификация данных по зависящим от температуры свойствам железосодержащих конденсированных фаз как возможных компонентов, содержащихся, в частности, в окалине, распространенной в металлоизделиях. В связи с этим в качестве задачи данной работы было принято формирование базы данных по характеристикам компонентов оксидной окалины путем подбора сведений по физическим свойствам ее компонентов и стальной основы, требующихся для надежного оценивания теплотехнических параметров эффективности технологии лазерной очистки углеродистых сталей, а также активно внедряемых родственных технологий – лазерной резки, сверления, оплавления покрытий и др. Аналитический обзор опубликованных экспериментальных данных позволил систематизировать сведения по ряду переносных и других свойств железосодержащих компонентов при атмосферном давлении в области от 298 К до температур плавления металлических и оксидных фаз и выше них. При этом предварительная расчетная термодинамическая оценка показала существование таких термодинамически стабильных конденсированных фаз в пятне нагрева окалины при ее ЛО в точке плавления и выше, как  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}$ , что согласуется и с известными опытными данными. Сравнение определенных нами (по опубликованным значениям  $\kappa$ ,  $\rho$  и теплоемкости и с применением экстраполяции в высокотемпературной области) значений  $a$  для рассматриваемых видов компонентов окалины с набором имеющихся в современной литературе опытных величин этого параметра выявило наличие отличий как для оксидных, так и металлических фаз. Новые значения заполняют пробел в области температур 1600–1800 К, имевшийся к данному моменту по температуропроводности. Также нами получено значение  $a = (0,83-0,92) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  для расплава оксида двухвалентного железа при температуре  $T \approx 1800 \text{ К}$ , не определявшееся ранее экспериментально, что мешало проведению корректного численного моделирования как лазерных процессов поверхностной термообработки, плавления и очистки сталей, так и расчетам в области металлургических и иных технологий, для которых характерно наличие зон с железосодержащими расплавами в ходе нагрева.

**Ключевые слова:** лазерная обработка, удаление оксидных слоев, окалина, сталь, оксиды железа, плавление, испарение, теоретическая оценка, физические свойства, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, коэффициент поглощения излучения

**Для цитирования:** Формирование базы данных по физическим свойствам компонентов оксидной окалины для теоретической оценки эффективности лазерной очистки углеродистых сталей и родственных технологий / О. Г. Девойно [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 3. С. 192–203. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-192-203>

### Introduction and research objective

Laser removal of surface layers of rust and scale (i. e. descaling), as a potentially highly effective and environmentally friendly method to clean corroded metal surfaces, has been actively studied in the last decade and is gradually being commercialized in machinery industry, shipbuilding, mining and other industrial sectors [1–6]. It begins to compete with mechanical methods traditional

for metalworking for removing surface rust and scale from metal, primarily steel, billets and parts/products, including obtained by hot rolling, forging, etc. However, so far the effectiveness of a group of laser cleaning (LC) technologies is considered as dependent on the empirical skills of laser equipment operators in recognizing changes in the conditions for removing oxide contaminants associated with unstable cleaning modes and thermal defects of surfaces [1]. At the same time,

factors influencing the mechanism of removal of oxide layers and the quality of removal complicate the monitoring and control of the process in real time during LC operations, especially when they use modern pulsed lasers with a high pulse frequency and improved power [2]. In this regard, experts note that there is currently a noticeable need for automation of technologies for the treatment of billets and products made of steels, in particular carbon ones, from contaminating layers – scale and rust (which are oxide inhomogeneous structures with significant porosity) – to prevent excessive cleaning time, which can give the undesirable effect of partial melting of the steel surface substrate which was already cleaned of oxidic substance and, as a result, negatively affect the energy consumption of the metalworking technological process as a whole [1, 6].

To implement this, it is advisable to use preliminary theoretical assessment (including calculation and modeling) of the intensity of melting and ablation of the oxide layers during heating to find optimal LC regimes of inhomogeneous crystalline structures on surface of structural carbon steels (SCSs). In this case, it is necessary to preliminary form and verify databases/datasets on the properties of Fe-containing condensed phases, as possible components contained, in particular, in mill scale and other scales that are widespread in industrial metal products and parts. A feature of these properties is their variability with changes in temperature, pressure, wavelength of laser irradiation (LI) and some other parameters [1–6, 15–16, 22]. Taking into account the aforementioned, as objective for our study the formation of data sets on the characteristics of the components of oxide scale was chosen, with selecting and comparing available information on thermophysical properties, including transport and optical ones, for its components and steel substrate (at atmospheric pressure, as typical for modern laser processing technologies), required for theoretical assessment and calculation of thermal parameters of laser processes for carbon steels cleaning, as well as for calculations of such commercialized group of related technologies as laser cutting and drilling of steels, remelting of sprayed iron-containing coatings, etc. [1–6, 15–16].

### **Brief characteristics of the analyzed cleaning process for scale layers and some thermochemical properties of thermostable phases in the conditions of typical oxidic scale**

When analyzing and modeling processes for removing (laser or other) layers of mill scale and other scales from steel surface, it is advisable to take into account the features of the layer microstructure. It is known that typical processing scale that occurs on carbon steels (for example, during industrial hot rolling of billets in contact with air) contains up to three oxide sublayers with a composition depending on the conditions of scale formation, i. e. temperature conditions during rolling, etc. [5, 7], and often oxide phases, as a result of thermal diffusion, penetrate each other with the formation of heterogeneous layers of complex composition. In a simplified manner, it is generally accepted that in the scale of a number of steels (including carbon steels with a total iron content not lower than 97 wt.%, for which the fraction of oxides of alloying elements can be neglected) a sublayer of wüstite (FeO, often with cation-deficit crystalline sublattice in the oxide phase, that allows its composition to be more precisely written as  $Fe_{1-x}O$  ( $x \leq 0.06$ )) is in a direct contact with metal substrate surface. The next sublayer contains predominantly the spinel phase of  $Fe_3O_4$  (including Fe(II) and Fe(III) cations). The scale may also contain a third – an outer sublayer based on the hematite  $Fe_2O_3$  (with  $Fe^{+3}$  cations). As has been found, scale formed on steel under heating conditions at temperatures higher than 850 K consists, as a rule, of the three indicated oxide sublayers of varied thickness [7]. According to some published data, the elemental composition of typical oxidic scale on SCSs (which can be approximately considered as a simulator of heated material in the LC-zone on the surface of non-corrosion-resistant metal products/parts) can be taken to approximately correspond to the brutto-formula  $Fe_3O_4$ , although in its phase composition it can contain mixtures of  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ , FeO and Fe [5–6].

According to our preliminary thermochemical estimation (using the thermodynamic approach previously used for high-temperature reactive mixtures, including metal-containing ones [8, 9]), as the thermodynamically stable forms of the condensed phase under laser heating conditions of

typical scale (with a stoichiometry close to Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> oxide) at melting temperatures and above them such substances were recognized as Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (solid) and FeO (liquid) oxides and metallic iron (in solid and liquid forms). This is consistent with known experimental data [5–7, 18–19, 21]. Tab. 1 summarizes some data on the previously published thermochemical properties of condensed components of the scale, which are thermally stable (as the results of our above-mentioned estimation show) under the conditions of approximately calculated reactive mixtures (oxidative and non-oxidative types) based on the oxide scale when heated to the temperatures of melting and boiling points of the scale components.

**Approximate energy balance and equations of oxide layer heating kinetics for theoretical assessment of cleaning regimes with varied laser irradiation power. Selection of data on the physical properties of condensed (solid and liquid) components of oxide scale, their comparison**

Let us write the energy balance equation for the steady process of laser descaling of a metal surface, taking into account heat losses to secondary heating processes (into solid and gaseous

media surrounding the heated layer of oxide material, which is the target layer from the point of view of processing) and using the expression for the resulting total energy consumption for the cleaning process under the influence of irradiation as  $E_w$  (in units of J per 1 kg of heated material, i. e. oxidic scale):

$$E_w = Q_w + E_w(1 - A) + Q_{hl-1} + Q_{hl-2} = \frac{Q_w + Q_{hl-1} + Q_{hl-2}}{A} \tag{1}$$

In the equation (1),  $A$  is radiation absorptance of LI by surface of the material, averaged over the full temperature range of the LC-process. Energy consumption  $Q_w$  (in J/kg) for heating of removed scale layer from the initial temperature (~298 K) to the final one (taken for technological reasons, e.g. as the temperature of the point of complete evaporation of the layer), i. e. energy consumption only to the target process of scale layer heating – can be approximately evaluated by expressions that use the thermal effects of phase transitions and the heat consumption for heating to the temperatures before these transitions.

Table 1

**Thermochemical properties of condensed components of scale (solid (s) and liquid (l)), which are thermodynamically stable in conditions of different reactive mixtures based on scale when heated to the points of complete melting  $T_m$  and boiling (evaporation)  $T_b$  of the components (with equilibrium composition); pressure  $P = 0.1$  MPa**

No	Parameter	Type of thermochemical system		
		Scale in oxidative medium	Scale in non-oxidative medium	Steel*
1	Composition on Fe-containing components (solid) near $T_m$ , K	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s)	Fe (s)	Fe (s) + Fe <sub>3</sub> C (l) impurity
2	Composition on Fe-containing components (a priori liquid) near $T_b$ , K	FeO (l) (or Fe <sub>1-x</sub> O)	Fe (l)	Fe (l) + Fe <sub>3</sub> C (l) impurity
3	$T_m$ , K	1870	1809–1811	~1808 [5] (1500 for Fe <sub>3</sub> C)
4	Theoretical enthalpy of melting (fusion) $\Delta H_m$ (†) [13], MJ/(kg of scale)	0.5843 (in MJ per kg of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> – 0.5960)	0.1754 (in MJ per kg of Fe – 0.2473)	~0.1754 (and in MJ per kg of steel): ~0.2473 (SCS) [13] – 0.270 (◇) [74]
5	$T_b$ , K (on published data)	3687	3133	3133
6	Theoretical enthalpy of vaporization $\Delta H_v$ (††)	3.24 MJ/kg of Fe <sub>0.95</sub> O	6.34 – 6.367 MJ/kg of Fe	6.34 – 6.367 MJ/kg of Fe

\* – unoxidized steel without scale; ‡ – in MJ per 1 kg of initial steel; ◇ – for structural carbon steel (SCS) of S235JR G2 grade (EU standard, it contains 0.063 % C, 0.41 % Mn, 0.13 % Si, 0.34 % Ni, 0.10 % Mo, 98.68 % Fe) [74]; † – for Fe-containing substance, which is thermodynamically stable under the given conditions at its melting point (per kg of initial scale (assuming its simplified composition)); †† – for Fe-containing substance, which is thermodynamically stable under given conditions at its boiling point according to the reference data on evaporation of iron and its oxide (wüstite) [59–61].

Conductive heat losses into the surrounding (quasi-cylindrical scale heating region) layers of materials – scale and steel substrate – are characterized by the following value:

$$Q_{hl-1} = f(a_I, a_{II}, T, t), \quad (2)$$

and the heat losses into the “cold” gas area surrounding the scale heating zone via the convection-radiation mechanism is:

$$Q_{hl-2} = f(\alpha, \varepsilon, T, t), \quad (3)$$

where  $a_I, a_{II}$  are coefficients of thermal diffusivity of materials in the solid state (for the scale and for steel substrate, respectively);  $\alpha$  – coefficient of convective heat transfer from the scale heated surface to the surrounding colder gas;  $\varepsilon$  – integral emissivity of the surface material,  $T$  – determining temperature of the heated surface,  $t$  – average heating time of the LI-spot area (i. e. the full exposure/duration of LI per the

The time spent for the heating, in particular, at the stage of phase transition (melting)  $t_m$ , can be determined from approximate expressions that were used, for example, in [15, 6] (this is kinetic dependence for the minimum time value and one more dependence, which includes theoretical enthalpy of melting  $\Delta H_m$ ). They contain such values as  $\kappa_m, a_m, A_m$  and  $\rho_m$  (i. e. is physical properties of the scale material at the melting temperature  $T_m$ ): thermal conductivity, thermal diffusivity, LI absorptance and density, respectively.

A quite reliable engineering estimation for the intensity of heating under the conditions of laser processing technology can be carried out on the basis of simplified thermal model for regimes with varied irradiation power, by analogy with one previously used in calculations of systems for electron beam and laser melting of inorganic materials [11, 12], as well as the methodology, tested to model laser ablation of organic films [22]. In this case, a standard solution for the problem of heat diffusion in a semi-bounded body (i. e. in the scale in our case) with a second-type boundary condition (considered when modeling local heating of solids [10–12]) can be applied, using some revised thermophysical properties of iron oxides and steel substrate, given below (Tab. 2).

In many practical cases (including laser and electron beam processing of materials), the heat flux to the surface of a semi-bounded solid can be represented as a thin circular heat source with

a uniform distribution of its intensity. In this case, we can consider a non-stationary axisymmetric problem of the influence of a continuous heat flow with constant intensity  $q$ , uniformly distributed within a circular region of radius  $R$  on the body surface. For a boundary-value problem (with mentioned boundary condition) to determine the temperature distribution  $T(r, z, t)$  in a given type of half-space with an unsteady heat field, where the heating occurs from an external heat source constant in time, the following standard statement can be used [10, 11]:

$$a\Delta T = T_A(r \geq 0, z \geq 0, t > 0),$$

$$-\kappa T_z|_{z=0} = qH(t)H(r - R),$$

$$T(r, z, 0) = T(\infty, z, t) = T(r, \infty, t) = T_r(0, z, t) = 0. \quad (4)$$

The analytical solution of a two-dimensional parabolic problem for a non-stationary temperature field in heated half-space (with boundary condition of the second kind), suitable to simulate some solid materials [10], has the following form:

$$Q(\rho, x, \tau) = 0.5 \int_0^\infty (J_0(\lambda)) \left[ (\exp(-\lambda x)) \operatorname{erfc} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{x}{2\tau^{0.5}} - \lambda\tau^{0.5} \right) - (\exp(-\lambda x)) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\tau^{0.5}} + \lambda\tau^{0.5} \right) \right] \frac{d\lambda}{\lambda}. \quad (5)$$

This equation contains the following nomenclature:  $J_0$  and  $J_1$  are Bessel functions (of the real argument) of zero and first order;  $\operatorname{erfc}$  – complementary error function;  $\lambda$  – dummy variable [10]; thermal Fourier number for heat diffusion process  $Fo = \tau = (a \cdot t/R^2)$  [11];  $a$  – coefficient of thermal diffusivity of the material (oxide scale in our case);  $t$  – time;  $R$  – radius of the heating zone (i. e., the LI-spot on the heated surface); dimensionless simplexes for the axial and radial coordinates (i. e., depth  $z$  and radius  $r$  coordinates of the laser beam spot on the surface) of the cylindrical heating region in the material:  $x = z/R$  and  $\rho = r/R$ .

When solving an equation (5), one can find the values of several basic values that characterize the LC-process, including Fourier number for heat diffusion  $\tau^*$  and the corresponding heating time  $t^*$  required to melt the scale layer in the cylindrical zone (under the LI-spot) to complete depth of the layer, and the heat flux  $q^*$  required for the melting.

As mentioned above, to perform this kind of kinetic heating calculations, which make it possible to find the efficiency parameters of LC-pro-

cess, data set on the properties of scale in various forms, depending on temperature and other factors, used in (4), (5) equations, is needed. We carried out a special review of published data on the thermophysical properties (including some transport and optical characteristics) of the phases, which exist in the layers of the metal oxide scale under consideration and at the boundary with them, that necessary both for calculations in laser cleaning technology and in related ones (e.g. cutting, drilling etc.). The results of the review are presented in Table 2.

A comparison of the values of the thermal diffusivity coefficient  $a$  calculated by us (based on the published values of  $\kappa$ ,  $\rho$  and  $c_p$ , using extrapolation to the high-temperature region) for the seven types of scale components under consideration with the experimental values of this parameter available in modern literature (see rows 8 and 9 in the Tab. 2) shows the presence of certain differences for both oxidic and metallic phases, reaching for the solid phases such level as 50% and

even higher. This extrapolation procedure allows us to fill the gap in the region  $T = 1600\text{--}1800$  K, which currently exists in array of published data on the thermal diffusivity  $a$  of iron-containing phases. In addition, such new calculated range of  $a$  as  $0.83 \cdot 10^{-6}$  to  $0.92 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s was obtained for liquid FeO at  $\sim 1800$  K (i. e. averaged value  $a = (0.875 \pm 0.045) \cdot 10^{-6}$ ), which was absent in the literature, and this made it difficult until now to carry out correct modeling not only for laser-thermal processes, but for related metallurgical ones in devices with zones of fused FeO<sub>x</sub> formation. It should be noted that, as we showed above, according to a preliminary thermochemical estimation, the thermodynamically stable forms of condensed phase under laser heating conditions of typical oxidic scale (with a stoichiometry close in Fe : O ratio to the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> oxide) on carbon steels at melting temperatures and above them include only two oxides (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeO) and metallic iron, which is consistent with known experimental data on the Fe-O-system chemistry [7, 18–19, 21, 46, 48].

Table 2

**Thermophysical properties of iron-containing components for calculation of heating kinetics and efficiency parameters for laser cleaning of scale layers on carbon steel surface, given according to the published data [5, 13–58, 62–79] and on our extrapolation of these data to high temperatures; pressure  $P = 0.1$  MPa**

No	Properties	Crystalline solids					Liquid substances
		Iron (Fe)	Steel	Hematite Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Magnetite Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Wüstite Fe <sub>1-x</sub> O ( $x \leq 0,06$ )	FeO melt / iron melt
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Melting point $T_m$ , K (on published data)	1809 [14, 44], 1811 [13]	1808 [5] (Q345 SCS #)	1812 [13] – 1838 [5]	1870 [5, 13]	1642 [17]; 1644 [18, 19]	←
2	Boiling point $T_b$ , K (on published data)	3133 [14]	3023 [5] (Q345)	2973 [5]	2896 [13], 3273 [5]	3687 [20–21]	←
3	Boiling point $T_{b-c}$ , K (on calculated thermodynamic data for systems with different gases)	2460÷3300	–	–	–	3200÷3400	←
4	Thermal conductivity $\kappa$ , W/(m·K)	78.48 [22] and 78.0 [24] (at 293 K); 35.0 (our extrapolation (extr.) of [24] data to the $T_m \approx 1810$ K); 8.0 (for Fe <sub>3</sub> C) [55, 56]	$\sim 52.0$ [5] (Q345), 49.8 [15, 16] (AISI 1095), 56.0 [80] (for low-carbon steels); 30.24 (for SCS at 1623 K) [70]; 27.3 (at the range of 1073–1473 K) and 37.5 (at $T \leq 1073$ K) for SCS [29]	4.0 [5], 0.58 [58]; 3.3 (our extr. of [24] data to the $T_m \approx 1810$ K)	Decrease from 3.5 to 1.7 (in the range of 300÷676 K) [51], 2.0 [5]; 3.0 (our extr. of [24] data to the $T_m \approx 1870$ K)	Rise from 1.8 to 2.5 (in the range of 300÷1164 K) [41] (FeO); 4.3 (our extr. of [24] data to the $T_m \approx 1640$ K)	4.0 (it is extrapolation of author of [27] to the $T = 1823$ K) / 33.3÷34.4 (at $T = 1818\text{--}1868$ K) [49] and 37.0–38.0 (at $\sim 1830$ K) [81], 39.1±2.5 (at $T = 1794\text{--}2050$ K) [79], from 40.0 to 60.0 (calculation for the range of $T$ from 2250 to $\sim 3700$ K) [83]; 36.5 (for SCS) [74, 75]

1	2	3	4	5	6	7	8
5	Density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	7874 (at 293 K) [13]; 7500 (estimation for $\delta$ -Fe for the range 1644 K < T < 1809 K) [46]	7860 (at 300 K) [5] (for Q345 SCS) and [57] (for SCS with the carbon fraction of 0.08÷0.17 %)	4900 [57] and 5260 [58] (at 300 K); 4950 (our extr. of [23] data to the $T_m \approx 1810$ K)	5190 [51] и 5000 [57] (при 300 K); 4850 (our extr. of [23] data to the $T_m \approx 1870$ K); for Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> melt – 4380÷3715 (at T from 1870 to 2900 K) [71]	5850÷ 6050 [41] (300 K, FeO); 5300 (our extr. of [23] data to the $T_m \approx 1640$ K); 5587 (for FeO at T < 1644 K) [48]	~4600 (extrapolation to 1773 K) [28]; ~5079 (estimation of [46]); 4520÷ 3390 (at T from 1650 to 3400 K) [71] / 7015 (estimation for T > 1809 K) [46]; 7030 (T ≈ 1810 K) and ~5974 (T ≈ 3000 K) [63]; 7023÷6208 (for the range T = 1810 ÷ 3133 K) [71]
6	Molar heat capacity $c_p$ , J/(mol·K)	25.1 (for the $\alpha$ - $\delta$ -phase [13–14]) and 26.5 (for the $\gamma$ -phase [14]) (at 300 K); 42.6 and 39.0 (at 1800 K for the $\alpha$ - $\delta$ -phase and $\gamma$ -phase) [14]	440÷760 J/(kg·K) (for the range of 293÷873 K) and 650 J/(kg·K) at 1473 K [29]; ~920 J/(kg·K) (at ~1800 K for Q345 SCS) [5]	104.2 (at 300 K); 145.8 (at 1800 K) [14]	147.7 (at 300 K); 200.8 (at 1800 K) [14]	49.97 (at T = 300 K); 64.03 (at T = 1600 K) [14]	68.20 (at T = 1650–5000 K) for FeO [14] / 46.02 (at T = 1809–3100 K) [14]; 45.4±3.2 (at T = 1848–1992 K) [79] and 45.1±3 (at $T_m \approx 1810$ K) [82]
7	Molar mass $\mu$ (on [14]), kg/mol	0.055845	~0.055	0.159688	0.231533	0.071844 (FeO); 0.068889 (Fe <sub>0.947</sub> O [42, 24])	0.071844 (FeO); 0.068886 (Fe <sub>0.947</sub> O [42]) / 0.055845
8	Thermal diffusivity $a$ (♦), m <sup>2</sup> /s (*10 <sup>6</sup> )	23.0 (at 300 K) [43], 22.06 (at 293 K) [22]	at 300 K – 19.0 (AISI 1010 SCS with 0.1 % C) [45] and 14,9÷15,1 (SCS with 0.17 % carbon fraction) [57]; at 300 K: 12.2, and at 1676 K: 6.02 (SCS with 0.135 % carbon fraction) [50]	at 293 K ~0.70 and at 1273 K – ~0.20 (sintered samples with 20 % porosity) [54, 57]	Decrease from 1.1 to 0.41 (for the range of 300÷676 K) [51]; at 293 K ~0.3÷0.42 and at 1273 K – ~0.40 (sintered samples with 30 % porosity) [54]	~0,3 – 1.4 (at ~300–500 K) [53–54] (at porosity of 42 % [54]); the rise from 0.37 to 0.58 (in the range of 300–1164 K) [41] (FeO); ~0.3 (1023 K) [51]; ~0.48 (300–870 K) – Fe <sub>0,91</sub> O [68]	– / 6.0÷6.5 (at 1818–1900 K) [49]
9	Calculated (by us) thermal diffusivity $a$ (♦), m <sup>2</sup> /s (*10 <sup>6</sup> ), based on the given (in this Table) values of $\kappa$ , $\rho$ and $c_p$ , presented in the references	at T = 300 K: 21.0–22.1; ~6.12 (at ~1800 K on the extrapolation data)	~7.19 (at ~1800 K for Q345 SCS)	~0.73 (at 1800 K – on the extrapolation data)	1.06 (at 300 K); ~0.713 (at 1800 K – on the extrapolation data)	0.42 (at 300 K); ~0.873 (at 1600 K on the extrapolation data)	0.92÷0.83 (at ~1800 K for FeO(l)) / ~5.76 (at ~1810 K) ÷ ~6.9 (at ~1850–2000 K), with use of values of $\kappa$ and $c_p$ from [79])

Continuation of the Table 2

1	2	3	4	5	6	7	8
10	Absorptance ( $\delta$ ) $A$ at wavelength of LI $\lambda = 1064$ nm (or 1053 nm [30] (at $T \approx 300$ K))	0.36–0.363 [22]; 0.31–0.38 ( $T \approx 300$ K) nd ~0.32 ( $T \approx 1800$ K) [65]; 0.39 (for $T \approx 1800$ K) [63]	0.35 ( $\diamond$ ) [5], 0.46 [15–16] (AISI 1095 †), 0.52 [30] (CR4 ‡) and 0.30 [34] (AISI 1006 ††); 0.30–0.36 ( $T \approx 300$ K) and 0.31–0.32 ( $T \approx 1270$ K) for steel of 35NCD16 grade (* ) [65]; 0.35–0.38 (at $T \approx 1809$ –3000 K) for SCS [64]	0.60 ( $\diamond$ ) [5]; 0.69 [30, 32]	0.53 ( $\diamond$ ) [5]; 0.80–0.83 [30, 33]	0.81 [30, 31]	For the oxide melt – from 0.56÷0.64 (at $T = 1840$ –1900 K) to 0.66÷0.71 (at $T = 2100$ –2300 K) (and the drop of $A$ in the range of $T > 2300$ K) [76] / 0.31 [62]; ~0.45÷0.49 [63]
11	Absorptance ( $\delta$ ) $A$ at wavelength of LI $\lambda = 527$ nm [30] (at $T \approx 300$ K)	~0.42 ( $T \approx 300$ K) and ~0.44 ( $T \approx 1800$ K) [65]	0.67 [30] (CR4 steel)	0.97 [30, 32]	0.83 [30, 33]	0.80 [30, 31]	– / 0.48 [62]
12	Reflectance ( $\delta$ ) $R$ at wavelength of LI $\lambda = 1064$ nm (or 1053 nm [30] (at $T \approx 300$ K))	0.637–0.64 [22]; 0.69–0.62 ( $T \approx 300$ K) and ~0.68 (at $T \approx 1800$ K) [65]; 0.61 (at $T \approx 1800$ K) [63]	0.65 [5], 0.54 [15, 16] (AISI 1095), 0.48 [30] (CR4) and 0.70 [34] (AISI 1006); 0.64–0.70 ( $T \approx 300$ K) and 0.68–0.69 ( $T \approx 1270$ K) for the 35NCD16 steel [65]; 0.65–0.62 ( $T \approx 1809$ –3000 K) for the SCS [64]	0.31 [30, 32]	0.17–0.20 [30, 33]	0.19 [30, 31]	for the oxide melt – from 0.36÷0.44 (at 1840–1900 K) to 0.29÷0.43 (at 2100–2300 K) [76] / ~0.69 [62]; ~0.51÷0.55 [63]
13	Reflectance ( $\delta$ ) $R$ at wavelength of LI $\lambda = 527$ nm [30] (at $T \approx 300$ K)	~0.58 ( $T \approx 300$ K) and ~0.56 ( $T \approx 1800$ K) [65]	0.33 [30] (CR4)	0.03 [30, 52]	0.17 [30, 33]	0.20 [30, 31]	– / 0.52 [62]
14	Integral emissivity (IE) $\epsilon$	0.35–0.36 (at $T = 1672$ –1811 K) [52] (for the $\lambda = 650$ nm); 0.61 (at 1050 K) [37, 38]; ~0.35 (at ~300 K) [78]	0.35, 0.60 and 0.62 (at the values of $T = 348$ K, 1773 K and 3133 K, respectively) [34] (for AISI 1006); 0.61 (at 1050 K) [38]; ~0.45 (at $T \geq 1270$ K) for $\lambda = 1000$ –1500 nm for the SCS [74]	0.626 (at 300 K) [69]; 0.75–0.85 (at 850–1300 K) [37, 39]; rise from 0.57 to 0.74 (for the range of 1100–1400 K) for powder samples [59]; 0.75–0.87 (at 740 K) and 0.64–0.83 (1220 K) – for	~0.61 (at 1050 K) [37, 38]; 0.85–0.89 (at 773÷1473 K) for ~( $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeO}$ ) [36, 67]	~0.61 (at 1050 K) [37, 38], 0.70 (at $T \geq 1000$ K) [35]	IE at $\lambda = 600$ –1064 nm for the oxide melt: ~0.70 (at $T > 2000$ K) [73, 77], / 0.35 (at 1810 K) [37, 40] and 0.314 (at $T_m \approx 1810$ K) [82]; normal spectral emissivity – 0.3–0.44 (at 1810–1970 K) [47] (for the $\lambda = 650$ nm), 0.362 (at 1811 K)

1	2	3	4	5	6	7	8
				powder samples [66]			for the $\lambda = 684$ nm) and 0.38 (2300 K for the $\lambda = 684$ nm) [52]; IE for $\lambda = 650-850$ nm for the melt of S235 SCS (§) 0.35÷ 0.095 (at the range of 1810÷2100 K) [72]

§ – as a rule, in the direction of irradiation normal to the surface; ♦ – values are given for materials assuming their near-zero porosity; ◇ – values of *A*-parameter in [5] are taken for the conditions of LI-absorption with a wavelength  $\lambda = 1064$  nm [26]; † – structural carbon steel (SCS) of AISI 1095 – composed of 98.4–98.8 % Fe, 0.3–0.5 % Mn and 0.9–1.03 % C (analogues in the Russian Federation (RF) and CIS – Y8 and Y10 steels); †† – AISI 1006 SCS – composed of 99.4–99.7 % Fe, 0.25–0.4 % Mn and 0.08 % C (analogue in the RF – 05кп steel); ‡ – CR4 SCS – composed of 99 % Fe, 0.6 % Mn and 0.1% C (analogue in the RF – 08Ю steel); # – Q345 SCS (standard of China, it contains 0.21 % C, 0.96 % Mn, 0.12 % Si and up to 98.5 % Fe) – analogues in the RF – 09Г2, 09Г2С, 10Г2Б; \* – low-alloyed structural steel of 35NCD16 grade (French standard, it contains up to 0.4 % C, up to 0.6 % Mn, up to 0.4% Si, up to 2.0 % Cr, up to 4.2 % Ni, up to 0.6 % Mo) – analogue in the RF – 40X2H4MA grade; ‡ – S235 SCS (EU standard, it contains up to 0.20 % C, up to 1.40 % Mn and up to 98 % Fe; analogue in the RF is the steel of Cr3cn grade).

CONCLUSIONS

1. In order to form the data sets on a number of industrially significant characteristics of oxide scale components, a detailed review and selection of published experimental information were carried out on the group of physical properties (including transport and optical) of iron oxides and steel base (at a pressure of 0.1 MPa), required for theoretical assessment of thermal technical parameters of the efficiency of laser cleaning technology for carbon steels, as well as related technologies, using calculation methods. Information on the properties of iron-containing components, including density, coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity (*a*), optical absorbance and emissivity in the temperature range from *T* = 298 K to the melting points of oxide and metal phases and above them, was systematized. According to a preliminary estimation, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeO, and metallic iron belong to the thermodynamically stable condensed phases under conditions of laser heating of a typical mill scale (with integral stoichiometry close to Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> oxide) at melting temperatures and above them, which is consistent with empirical data.

2. Comparison of the values of the coefficient *a* for thermodynamically stable scale components, which were calculated using currently known values values of  $\kappa$ ,  $\rho$  and heat capacity and using additional extrapolation of properties to the high-

temperature range, with a set of experimental values of this *a* parameter available in the literature showed certain differences for both oxide and metallic phases. These values make it possible to fill in the existing gap in the *T* = 1600–1800 K region in the data set on thermal diffusivity of the phases. A calculated value  $a = (0.83-0.92) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  was obtained for Fe(II) oxide for temperature above the melting boundary *T* ≈ 1800 K, which was not measured before, which limited the opportunities not only for modeling surface laser heat treatment and cleaning of steels, but also made it difficult to calculate the kinetic data in the field of metallurgical and related processes and apparatuses in which some zones exist with iron oxide melts during the heating of steel, cast iron and their partial oxidation products.

REFERENCES

- Xie X., Huang Q., Long J., Ren Q., Hu W., Liu S. (2020) A New Monitoring Method for Metal Rust Removal States in Pulsed Laser Derusting Via Acoustic Emission Techniques. *Journal of Materials Processing Technology*, 275, 116321. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116321>.
- Sofronov V.L., Kartashov E.Yu., Tkachuk S.A., Pak A.D., Tinin V.V., Galata A.A. (2022) Research on Laser Deactivation Cleaning of Metal Surfaces Contaminated with Radioactive Materials. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets En-*

- gineering, 333 (11), 171–182 (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3734>.
3. Ma M., Wang L., Li J., Jia X., Wang X., Ren Y., Zhou Y. (2020) Investigation of the Surface Integrity of Q345 Steel After Nd:YAG Laser Cleaning of Oxidized Mining Parts. *Coatings*, 10 (8), 716. <https://doi.org/10.3390/coatings10080716>.
  4. Deschênes J. M., Fraser A. (2020). Empirical Study of Laser Cleaning of Rust, Paint, and Mill Scale from Steel Surface. Lee J., Wagstaff S., Lambotte G., Allamore A., Tesfaye F. (eds) *Materials Processing Fundamentals 2020. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36556-1\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36556-1_17).
  5. Ren Y., Wang L., Ma M., Cheng W., Li B., Lou Y., Li J., Ma X. (2022) Stepwise Removal Process Analysis Based on Layered Corrosion Oxides. *Materials*, 15 (21), 7559. <https://doi.org/10.3390/ma15217559>.
  6. Zhou Z., Sun W., Wu J., Chen H., Zhang F., Wang S. (2023) The Fundamental Mechanisms of Laser Cleaning Technology and Its Typical Applications in Industry. *Processes*, 11 (5), 1445. <https://doi.org/10.3390/pr11051445>.
  7. Avdeev Ya. G., Gorichev I. G., Luchkin A. Yu. (2012) Effect of IFKhAN-92 Inhibitor on Scale Removal during Sulfuric Acid Pickling of Steel. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 1 (1), 26–37. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2012-1-1-026-037>.
  8. Mourao R., Marquesi A. R., Gorbunov A. V., Filho G. P., Halinouski A. A., Otani C. (2015). Thermochemical Assessment of Gasification Process Efficiency of Biofuels Industry Waste with Different Plasma Oxidants. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43 (10), 3760–3767. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2416129>.
  9. Gorbunov A. V., Devoino O. G., Gorbunova V. A., Yatskevitch O. K., Koval V. A. (2021) Thermodynamic Estimation of the Parameters for C-H-O-N-Me-Systems as Operating Fluid Simulants for New Processes of Powder Thermal Spraying and Spheroidizing. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 20 (5), 390–398. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-390-398>.
  10. Carslaw H. S., Jaeger J. C. (1986) *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press. 2<sup>nd</sup> ed. 520.
  11. Pinsker V. A. (2006). Unsteady-State Temperature Field in a Semi-Infinite Body Heated by a Disk Surface Heat Source. *High Temperature*, 44 (1), 129–138. <https://doi.org/10.1007/s10740-006-0015-1>.
  12. Pinsker V. A. (2008) Quasi-Static Thermoelastic Stresses in a Half-Space Heated by a Circular Surface Heat Source. *VI Minskii Mezhdunarodnyi Forum po Teplo-i Massoobmenu, 19–23 Maya 2008 g.: Tezisy Dokladov i Soobshchenii. T. 2* [VI Minsk Medunarodny Forum for Heat and Mass, 19–23 May 2008: These are the Documents and the Information]. Minsk, HMTI of NAS of Belarus. 10 pp. (in Russian).
  13. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 95<sup>th</sup> ed.; Haynes W. M. (Editor); CRC Press, USA, 2014–2015, 2704 p. ISBN-10: 1482208679, ISBN-13: 978-1482208672.
  14. *Gas Phase Thermochemistry Data*. Available at: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74828&Units=SI&Mask=1#Thermo-Gas>.
  15. Okumu H. W. (2022) Cleaning of Metal Surfaces by Laser Irradiation; Mathematical Modeling and Experimental Analysis. *Tesis de Maestría en Ciencias*. Centro de Investigaciones en Óptica, León, Guanajuato, Mexico. 91.
  16. Kermanpur A., Mahmoudi Sh., Hajipour A. (2008). Numerical Simulation of Metal Flow and Solidification in the Multi-Cavity Casting Moulds of Automotive Components. *Journal of Materials Processing Technology*, 206 (1–3), 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.004>.
  17. Schneider S. (1963) *Compilation of the Melting Points of the Metal Oxides*. National Bureau of Standards Monograph 68. Gaithersburg, MD. <https://doi.org/10.6028/NBS.MONO.68>.
  18. Chen Z., Qu Y., Zeilstra C., Van Der Stel J., Sietsma J., Yang Y. (2019) Prediction of Density and Volume Variation of Hematite Ore Particles during In-Flight Melting and Reduction. *Journal of Iron and Steel Research International*, 26, 1285–1294. <https://doi.org/10.1007/s42243-019-00265-3>.
  19. Qu Y., Yang Y., Zou Z., Zeilstra C., Meijer K., Boom R. (2014). Thermal Decomposition Behaviour of Fine Iron Ore Particles. *ISIJ International*, 54 (10), 2196–2205. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2196>.
  20. *Iron (II) Oxide*. Available at: [https://ceramica.fandom.com/wiki/Iron\(II\)\\_oxide](https://ceramica.fandom.com/wiki/Iron(II)_oxide).
  21. Cotton F. A., Wilkinson G., Murillo C. A., Bochmann M. (1999). *Advanced Inorganic Chemistry*. 6th Ed. New York, Wiley-Interscience.
  22. Zou W.F., Xie Y.M., Xiao X., Zeng X.Z., Luo Y. (2014). Application of Thermal Stress Model to Paint Removal by Q-Switched Nd:YAG Laser. *Chinese Physics B*, 23 (7), 074205. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/23/7/074205>.
  23. Beygelzimer E., Beygelzimer Y. (2021) Generalized Estimates for the Density of Oxide Scale in the Range From 0 C to 1300 C [Preprints]. *Arxiv*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2110.09791>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.09791>.
  24. Beygelzimer E., Beygelzimer Y. (2021) Thermal Conductivity of Oxide Scale and its Components in the Range from 0 °C to 1300 °C: Generalized Estimates with Account for Movability of Phase Transitions [Preprints]. *Arxiv*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2110.11632>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.11632>.
  25. Beygelzimer E., Beygelzimer Y. (2021) Heat Capacity of Oxide Scale in the Range from 0 C to 1300 C: Generalized Estimates with Account for Movability of Phase Transitions. [Preprints]. *Arxiv*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2110.11101>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.11101>.
  26. *Max Metal Surface Cleaning Tyre Mold Portable 200w Pulse Laser Cleaning Machine*. Available at: [https://www.alibaba.com/product-detail/Max-Metal-Surface-Cleaning-Tyre-Mold\\_1600762853557.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Max-Metal-Surface-Cleaning-Tyre-Mold_1600762853557.html).
  27. Vil'danov S. K. (2021) Calculation of Viscosity and Thermal Conductivity at a High Temperature for Glasses Based on the SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R<sub>2</sub>O System (R = Na, K) and Doped with CaO, MgO, and FeO. *Glass Physics and Chemistry*, 47, 235–244. <https://doi.org/10.1134/S1087659621030135>.
  28. Hara S., Irie K., Gaskell D. R., Ogino K. (1988) Densities of Melts in the FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO and FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2CaO•SiO<sub>2</sub> Systems. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 29 (12), 977–989. Available at: [https://www.jstage.jp/article/matertrans1960/29/12/29\\_12\\_977/\\_pdf/char/en](https://www.jstage.jp/article/matertrans1960/29/12/29_12_977/_pdf/char/en).
  29. Li G., Wang P. (2013) Properties of Steel at Elevated Temperatures. *Advanced Analysis and Design for Fire Safety of Steel Structures. Advanced Topics in Science*

- and Technology in China. Springer, Berlin, Heidelberg, 37–65. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34393-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34393-3_3).
30. Bergström D., Powell J., Kaplan A.F.H. (2007). The Absorbance of Steels to Nd:YLF and Nd:YAG Laser Light at Room Temperature. *Applied Surface Science*, 253 (11), 5017–5028. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.11.018>.
  31. Henning T., Mutschke H. (1997) Low-Temperature Infrared Properties of Cosmic Dust Analogues. *Astronomy and Astrophysics*, 327, 743–754.
  32. Marusak L.A., Messier R., White W. B. (1980). Optical Absorption Spectrum of Hematite,  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  Near IR to UV. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 41 (9), 981–984. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(80\)90105-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(80)90105-5).
  33. Schlegel A., Alvarado S.F., Wachter P. (1979) Optical Properties of Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 12 (6), 1157–1164. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/12/6/027>.
  34. Frewin M. R. (1997) *Experimental and Theoretical Investigation of Tandem Laser Welding. Doctor of Philosophy Thesis*. Department of Materials Engineering, University of Wollongong, Australia. 179. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/37028176.pdf>.
  35. Mich J., Braig D., Gustmann T., Hasse C., Scholtissek A. (2023) A Comparison of Mechanistic Models for the Combustion of Iron Microparticles and Their Application to Polydisperse Iron-Air Suspensions. *Combustion and Flame*, 256, 112949. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.112949>.
  36. Mi X. C., Fujinawa A., Bergthorson J. M. (2022) A Quantitative Analysis of the Ignition Characteristics of Fine Iron Particles. *Combustion and Flame*, 240, 112011. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112011>
  37. Jones J. M., Mason P. E., Williams A. (2019). A Compilation of Data on the Radiant Emissivity of Some Materials at High Temperatures. *Journal of the Energy Institute*, 92 (3), 523–534. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.04.006>.
  38. Touloukian Y. S., DeWitt D. P. (1970) *Thermal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys*. Vol. 7. New York, IFI/Plenum Press.
  39. Touloukian Y.S., DeWitt D.P. (1971) *Thermal Radiative Properties. Non-Metallic Solids*. Vol. 8. New York, IFI/Plenum Press.
  40. Ratanapuech P., Bautista R. G. (1981) Normal Spectral Emissivities of Liquid Iron, Liquid Nickel and Liquid Iron-Nickel Alloys. *High Temperature Science*, 14 (4), 269–283.
  41. Li M., Endo R., Akoshima M., Susa M. (2017). Temperature Dependence of Thermal Diffusivity and Conductivity of FeO Scale Produced on Iron by Thermal Oxidation. *ISIJ International*, 57 (12), 2097–2106. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-301>.
  42. *Iron Oxide (Wustite)  $\text{Fe}_{0.947}\text{O}$  (c, l; wustite)*. Available at: [https://www.chem.msu.su/Zn/Fe/print-Fe0.947O\\_c.html](https://www.chem.msu.su/Zn/Fe/print-Fe0.947O_c.html) (in Russian).
  43. Wilson J. (August 2007) *Materials Data*. Available at: <http://www.electronics-cooling.com/2007/08/thermal-diffusivity/>.
  44. Gaskell D. R., Laughlin D. E. (2017) *Introduction to the Thermodynamics of Materials*. 6th Ed. Boca Raton, USA, CRC Press. 714. <https://doi.org/10.1201/9781315119038>.
  45. Lienhard J. H. IV, Lienhard J. H. V. (2019) *A Heat Transfer Textbook*. 5th ed. Dover Publications. 715.
  46. Grinchuk P. S., Dmitriev S. I., Khina B. B. (2012). Modeling of the Reduction of Iron Oxide by Methane-Conversion Products in a Plasma Jet. II. Heat and Mass Transfer. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 85 (2), 265–273. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0649-2>.
  47. Susa M., Endo R. K. (2009) Emissivities of High Temperature Metallic Melts. Fukuyama H, Waseda Y. (eds.) *High Temperature Measurements of Materials*. Berlin, Springer, 111–129. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85918-5>.
  48. Chen R. Y., Yeun W. Y. D. (2003) Review of the High-temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen. *Oxidation of Metals*, 59 (5–6), 433–468. <https://doi.org/10.1023/A:1023685905159>.
  49. Nishi T., Shibata H., Waseda Y., Ohta H. (2003). Thermal Conductivities of Molten Iron, Cobalt, and Nickel by Laser Flash Method. *Metallurgical & Materials Transactions – A*, 34 (12), 2801–2807. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0181-2>.
  50. Nishi T., Shibata H., Tsutsumi K., Ohta H., Waseda Y. (2002). Measurement of Thermal Diffusivity of Steels at Elevated Temperature by a Laser Flash Method. *ISIJ International*, 42 (5), 498–503. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.498>.
  51. Li M., Akoshima M., Endo R., Ueda M., Tanei H., Susa M. (2022) Thermal Diffusivity and Conductivity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Scale Provided by Oxidation of Iron. *ISIJ International*, 62 (1), 275–277. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-326>.
  52. Pottlacher G., Boboridis K., Cagran C., Hüpf T., Seifert A., Wilthan B. (2013) Normal Spectral Emissivity Near 680 nm at Melting and in the Liquid Phase for 18 Metallic Elements. *AIP Conference Proceedings*, 1552 (1), 704–709. <https://doi.org/10.1063/1.4819628>.
  53. Endo R., Hayashi H., Li M., Akoshima M., Okada H., Tanei H., Hayashi M., Susa M. (2020) Determination of Thermal Diffusivity/conductivity of Oxide Scale Formed on Steel Plate by Laser Flash Method through Thermal Effusivity Measurement by Transient Hot-strip Method. *ISIJ International*, 60 (12), 2773–2779. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-163>.
  54. Akiyama T., Ohta H., Takahashi R., Waseda Y., Yagi J. (1992). Measurement and Modeling of Thermal Conductivity for Dense Iron Oxide and Porous Iron Ore Agglomerates in Stepwise Reduction. *ISIJ International*, 32 (7), 829–837. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.829>.
  55. Chen J. K., Chen S. F. (2011) On Thermal Conductivity of an in-situ metal matrix Composite–cast Iron / In: Cuppoletti J. (ed.) *Metal, Ceramic and Polymeric Composites for Various Uses. Intech Open*. Taiwan, 211–224. <https://doi.org/10.5772/21537>.
  56. Helsing J., Grimvall G. (1991). Thermal Conductivity of cast Iron: Models and Analysis of Experiments. *Journal of Applied Physics*, 70 (3), 1198–1206. <https://doi.org/10.1063/1.349573>.
  57. Endo R., Yagi T., Ueda M., Susa M. (2014). Thermal Diffusivity Measurement of Oxide Scale Formed on Steel during Hot-rolling Process. *ISIJ International*, 54 (9), 2084–2088. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2084>.
  58. Masdeu F., Carmona C., Horrach G., Muñoz J. (2021) Effect of Iron (III) Oxide Powder on Thermal Conductivity and Diffusivity of Lime Mortar. *Materials*, 14 (4), 998. <https://doi.org/10.3390/ma14040998>.

59. Samsonov G. V. (1982). *The Oxide Handbook*. 2<sup>nd</sup> ed. New York and London, IFI/Plenum. 463. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1613-9>.
60. Sipkens T. A. Hadwin P. J. Grauer S. J., Daun K. J. (2018). Predicting the Heat of Vaporization of Iron at High Temperatures Using Time-Resolved Laser-Induced Incandescence and Bayesian Model Selection. *Journal of Applied Physics*, 123 (9), 095103. <https://doi.org/10.1063/1.5016341>.
61. Heat of Fusion and Vaporization. *Chemistry 301. Data base of Texas University*. Available at: <https://ch301.cm.utexas.edu/data/section2.php?target=heat-transition.php>.
62. Kaplan A. F. H. (2014). Laser Absorptivity on Wavy Molten Metal Surfaces: Categorization of Different Metals and Wavelengths. *Journal of Laser Applications*, 26 (1), 012007. <https://doi.org/10.2351/1.4833936>.
63. Mahrle A., Beyer E. (2009). Theoretical Aspects of Fibre Laser Cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42 (17), 175507. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/17/175507>.
64. Volpp J. (2023). Laser Beam Absorption Measurement at Molten Metal Surfaces. *Measurement*, 209, 112524. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112524>.
65. Dausinger F., Shen J. (1993). Energy Coupling Efficiency in Laser Surface Treatment. *ISIJ International*, 33 (9), 925–933. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.925>.
66. Gorewoda J., Scherer V. (2016). The Influence of Carbonate Decomposition on Normal Spectral Radiative Emittance in the Context of Oxy-Fuel Combustion. *Energy & Fuels*, 30 (11), 9752–9760. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b0139.8>.
67. Burgess G. K., Foote P. D. (1916) The Emissivity of Metals and Oxides. IV. Iron Oxide. *Bulletin of the Bureau of Standards*, 12 (1), 83–89. <https://doi.org/10.6028/bulletin.273>.
68. Yang Y., Watanabe H., Akoshima M., Hayashi M., Susa M., Tanei H., Okada H., Endo R. (2021) Determination of Thermal Diffusivity and Its Temperature Dependence of Fe<sub>1-x</sub>O Scale at High Temperature by Electrical-Optical Hybrid Pulse-Heating Method. *ISIJ International*, 61 (1), 26–32. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2019-635>.
69. Gahmousse A., Ferria K., Rubio J., Cornejo N., Tamayo A. (2020). Influence of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the Structure and Near-infrared Emissivity of Aluminosilicate Glass Coatings. *Applied Physics A*, 126 (9), 732. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03921-8>.
70. Timoshpolsky V. I., Samoilovich Yu. A., Trusova I. A., Khopova O. G. (2001) Calculation Analysis of the Occurrence of “Dark Spots” During Thermal Interaction of heated wares with Supporting Devices of Reheating/ Continuous Furnaces. *Metallurgiya: Respublikanskiy Mezhdvdomstvennyy Sbornik Nauchnykh Trudov* [Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Scientific Works]. Minsk, Vysshaya Shkola Publ., Iss. 25, 12–23 (in Russian).
71. van Gool C. E. A. G., Thijs L. C., Ramaekers W. J. S., van Oijen J. A., de Goey P. (2023). Particle Equilibrium Composition Model for Iron Dust Combustion. *Applications in Energy and Combustion Science*, 13, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2023.100115>.
72. Schöpp H; Sperl A; Kozakov R; Gött G; Uhrlandt D; Wilhelm G (2012). Temperature and Emissivity Determination of Liquid Steel S235. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45 (23), 235203. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/23/235203>.
73. Muller M., El-Rabii H., Fabbro R. (2015). Liquid Phase Combustion of Iron in an Oxygen Atmosphere. *Journal of Materials Science*, 50 (9), 3337–3350. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-8872-9>.
74. Teulet P., Girard L., Razafinimanana M., Gleizes A., Bertrand P., Camy-Peyret F., Baillet E., Richard F. (2006) Experimental Study of an Oxygen Plasma Cutting Torch: II. Arc–Material Interaction, Energy Transfer and Anode Attachment. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39 (8), 1557–1573. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/8/01>.
75. Zaitsev A. V., Ermolaev G. V., Polyanskiy T. A., Gurin A. M. (2018). Calculation of Intrinsic Absorption Coefficient in High Power Laser Material Processing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1109, 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1109/1/012011>.
76. Seibold G., Dausinger F., Hügel H. (2000) Absorptivity of Nd: YAG-Laser Radiation on Iron and Steel Depending on Temperature and Surface Conditions. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 89, 125–132. <https://doi.org/10.2351/1.5059485>.
77. Muller M., El-Rabii H., Fabbro R., Coste F., Rostaing J.-C., Ridlova M., Colson A., Barthelemy H. (2016) Detailed Investigation of the Sequence of Mechanisms Participating in Metals Ignition in Oxygen Using Laser Heating and In Situ, Real-Time Diagnostics. *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres*. Vol. 14. ASTM International, 308–325. <https://doi.org/10.1520/STP159620150065>.
78. Krishnan S., Yugawa K., Nordine P. (1997). Optical Properties of Liquid Nickel and Iron. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 55 (13), 8201–8206. <https://doi.org/10.1103/physrevb.55.8201>.
79. Sugie K., Kobatake H., Uchikoshi M., Isshiki M., Sugioka K.-I., Tsukada T., Fukuyama H. (2011) Noncontact Laser Modulation Calorimetry for High-Purity Liquid Iron. *Japanese Journal of Applied Physics*. 50, 11RD04. <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.11RD04>.
80. Makovsky V. A., Lavrentik I. I. (1977) *Heating Furnace Control Algorithms*. Moscow, Metallurgiya Publ. 183 (in Russian).
81. Watanabe M., Adachi M., Uchikoshi M., Fukuyama H. (2019). Thermal Conductivities of Fe-Ni Melts Measured by Non-Contact Laser Modulation Calorimetry. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50, 3295–3300. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05250-9>.
82. Lee G. W., Jeon S., Kang D. H. (2013). Crystal–Liquid Interfacial Free Energy of Supercooled Liquid Fe Using a Containerless Technique. *Crystal Growth & Design*, 13 (4), 1786–1792. <https://doi.org/10.1021/cg4001889>.
83. Korell J. A., French M., Steinle-Neumann G., Redmer R. (2019). Paramagnetic-to-Diamagnetic Transition in Dense Liquid Iron and Its Influence on Electronic Transport Properties. *Physical Review Letters*, 122 (8), 086601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.086601>.

Received: 11.09.2023

Accepted: 03.01.2024

Published online: 31.05.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-204-218>

УДК 615.47/616-77

## Имплантаты на основе металлических материалов: обзор материалов и конструкций

Канд. техн. наук, доц. А. Ю. Королёв<sup>1)</sup>

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

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

**Реферат.** Назначением имплантатов является замена, восстановление, поддержание или улучшение функциональности различных тканей и органов человеческого тела. Их применение в современной медицине позволило значительно улучшить способы лечения, повысить качество и продолжительность жизни пациентов. Предпочтительными, с точки зрения возможности придания требуемых механических свойств, относительно небольшой стоимости материала и низких затрат на производство, являются металлические имплантаты. Металлы и их сплавы при производстве имплантатов превосходят керамические и полимерные материалы по комплексу таких свойств, как предел прочности, предел выносливости, износостойкость, твердость, упругость, вязкость, эффект памяти формы. В работе представлен обзор конструкций современных имплантатов различного назначения и металлических материалов, используемых для их производства. Анализ литературных источников показал, что современные имплантаты из металлических материалов представляют широкую номенклатуру и имеют существенные отличия по форме и размерам. Часть из них характеризуется малым сечением и жесткостью, при этом обладает упругими свойствами. Другие изделия являются несущими, в ряде случаев – массивными конструкциями. Согласно предложенной классификации по назначению металлические имплантаты разделяют на: зубные, черепные, челюстно-лицевые, позвоночные, травматологические, сердечно-сосудистые и эндопротезы суставов. Выполнен анализ преимуществ и недостатков основных металлических материалов, используемых при производстве имплантатов (коррозионностойкая сталь, титан и титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы и нитинол). Установлено, что все применяемые в настоящее время биосовместимые металлические материалы не являются полностью инертными по отношению к организму. Каждый материал в любом случае вызывает некоторую реакцию окружающих тканей. Наибольшую биосовместимость и коррозионную стойкость в организме обеспечивает технический титан, который, однако, обладает низкими прочностными характеристиками.

**Ключевые слова:** имплантат, коррозионная стойкость, биосовместимость, прочность, титан, коррозионностойкая сталь, кобальт-хромовый сплав, нитинол

**Для цитирования:** Королёв, А. Ю. Имплантаты на основе металлических материалов: обзор материалов и конструкций / А. Ю. Королёв // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 3. С. 204–218. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-204-218>

## Metal-Based Implants: Review of Materials and Designs

A. Yu. Korolyov<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** The purpose of implants is to replace, restore, maintain or improve the functionality of various tissues and organs of the human body. Their use in modern medicine has significantly improved treatment methods and increased the quality and life expectancy of patients. The most preferable from the point of view of the possibility of imparting the required mechanical properties, the relatively low cost of the material and low production costs are metal implants. Metals and their alloys in

---

### Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 24,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 374-25-98  
a.korolyov@bntu.by

### Address for correspondence

Korolyov Aleksandr Yu.  
Belarusian National Technical University  
24, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 375 17 374-25-98  
a.korolyov@bntu.by

the production of implants are superior to ceramic and polymer materials in a range of properties such as tensile strength, endurance limit, wear resistance, hardness, elasticity, viscosity, shape memory effect. The paper provides an overview of the designs of modern implants for various purposes and the metal materials used for their production. An analysis of literature sources has shown that modern implants made of metal materials represent a wide range and have significant differences in shape and size. Some of them are characterized by a small cross-section and rigidity, while possessing elastic properties. Other products are load-bearing, in some cases massive, structures. According to the proposed classification, according to their purpose, metal implants are divided into: dental, cranial, maxillofacial, vertebral, traumatological, cardiovascular and joint endoprostheses. An analysis of the advantages and disadvantages of the main metal materials used in the production of implants (corrosion-resistant steel, titanium and titanium alloys, cobalt-chromium alloys and nitinol) has been performed. It has been established that all currently used biocompatible metal materials are not completely inert towards the body. Each material in any case causes some reaction in the surrounding tissues. The greatest biocompatibility and corrosion resistance in the body is provided by technical titanium, which, however, has low strength characteristics.

**Key words:** implant, corrosion resistance, biocompatibility, strength, titanium, corrosion-resistant steel, cobalt-chromium alloy, nitinol

**For citation:** Korolyov, A. Yu. (2024) Metal-Based Implants: Review of Materials and Designs. *Science and Technique*. 23 (3). 204–218. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-204-218> (in Russian)

## Введение

За последние десятилетия медицинские имплантаты стали неотъемлемой частью современной медицины. Их назначением является замена, восстановление, поддержание или улучшение функциональности различных тканей и органов человеческого тела. Применение современных имплантатов позволило значительно улучшить способы лечения различных заболеваний, повысить качество и продолжительность жизни пациентов.

Увеличение числа пациентов с хроническими заболеваниями и старение населения, которые отмечаются в последнее время, являются причинами интенсивного роста потребности в медицинских имплантатах [1]. Согласно исследованию [2], в 2020 г. спрос на медицинские имплантаты в мире оценивался в объеме 87,6 млрд дол. США, а согласно прогнозам, в период с 2021 по 2028 г. среднегодовой темп роста составит 7,8 % [3]. Кроме старения населения и влияния хронических заболеваний, другими причинами роста рынка являются новые разработки в области материалов и покрытий для производства имплантатов, создание новых и совершенствование существующих конструкций имплантатов, а также тенденция к увеличению расходов на здравоохранение [4].

В качестве материалов для изготовления современных медицинских имплантатов используются металлы и их сплавы, керамика, полимеры и композиты [5]. Предпочтительными, с точки зрения возможности придания тре-

буемых механических свойств, относительно небольшой стоимости материала и низких затрат на производство, являются металлические имплантаты [6]. Металлы и их сплавы превосходят керамические и полимерные материалы по комплексу таких свойств, как предел прочности, предел выносливости, износостойкость, твердость, упругость, вязкость, эффект памяти формы. Выбор подходящего металлического материала с учетом назначения изделия позволяет достигнуть как высоких механических характеристик, так и биосовместимости. Поэтому в настоящее время около 60 % всех имплантатов во всем мире изготавливают из металлических материалов [7].

Выбор материала для имплантата обусловливается особенностями его функционирования, которые, в свою очередь, определяют требования к механическим характеристикам и свойствам поверхности. В зависимости от назначения имплантата применяемый для его производства материал должен иметь высокие пределы прочности и выносливости, твердость, износостойкость, низкий модуль упругости. При этом основными критериями выбора материала для производства всех имплантатов являются его биологическая совместимость и коррозионная стойкость на протяжении всего периода эксплуатации в организме человека.

Биологическая совместимость подразумевает отсутствие токсического, иммуногенного действия, канцерогенного эффекта и генных мутаций. Кроме того, биосовместимые материалы не должны вызывать развитие инфекци-

онных заболеваний, местной воспалительной реакции, нарушать функцию тканей, обеспечивая при этом сохранность работоспособности имплантата. Таким образом к биосовместимым относятся материалы, которые могут безопасно взаимодействовать с биологическими системами организма человека, не вызывая побочных реакций [8].

### Конструкции современных имплантатов из металлических материалов

Классификация основных медицинских имплантатов из металлических материалов с указанием областей их использования в организме человека представлена на рис. 1.

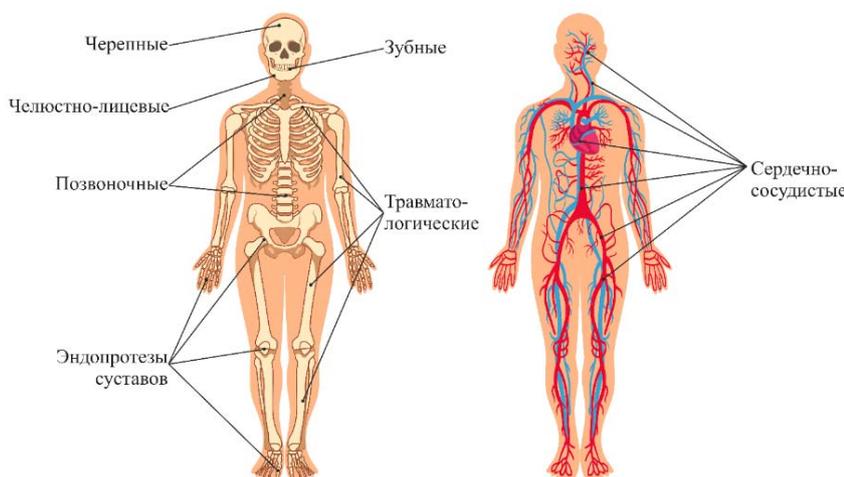


Рис. 1. Классификация металлических имплантатов  
Fig. 1. Classification of metal implants

Согласно классификации, по назначению металлические имплантаты разделяются на: зубные, черепные (краниопластины), челюстно-лицевые, позвоночные, травматологические, сердечно-сосудистые и эндопротезы суставов. По данным [4], на мировом рынке металлических медицинских изделий доминирует категория эндопротезов суставов, второе и третье места занимают сердечно-сосудистые и зубные имплантаты.

Зубные имплантаты являются составной частью современных зубных протезов. Их применение обеспечивает как восстановление функций естественного зуба, так и его внешнюю имитацию. Зубной протез представляет собой составную конструкцию, кроме самого

имплантата включающую также абатмент и коронку (рис. 2). Имплантат полностью погружается в кость, коронка располагается над десной, а абатмент соединяет их между собой [9].



Рис. 2. Конструкция зубного имплантата  
Fig. 2. Dental implant design

Современные зубные имплантаты, представленные на рынке, изготавливаются из металлических материалов с последующим нанесением биосовместимых покрытий для улучшения процесса заживления и остеоинтеграции. Надежная механическая и биологическая фиксация достигается за счет конструктивных особенностей имплантатов, а также остеоинтеграции костной ткани в биосовместимое покрытие. По форме исполнения зубные имплантаты разделяются на винтовые, цилиндрические и конические с пористой поверхностью, пластинчатые (рис. 3). Наибольшую распространенность на сегодня имеют винтовые виды имплантов и имплантаты с пористой поверхностью, которые обеспечивают хорошую остеоинтеграцию и полное восстановление функций зуба [9].



Рис. 3. Виды современных зубных имплантатов:  
а – винтовой; б – с пористой поверхностью,  
с – пластинчатый

Fig. 3. Types of modern dental implants: a – screw;  
b – with a porous surface, c – lamellar

Черепные имплантаты (краниопластины) предназначены для закрытия дефектов черепной кости и мозговой оболочки, которые образовались из-за травмы или хирургического вмешательства. В настоящее время в медицинской практике широко используются металлические черепные имплантаты различных конструкций: пластины быстрой фиксации, пластины резьбовой фиксации и индивидуальные краниопластины (рис. 4). Первые два вида пластин применяются для фиксации костных лоскутов (участков черепа), вырезаемых при выполнении хирургических вмешательств на мозге (рис. 4а, б). При черепно-мозговой травме, сопровождающейся масштабным разрушением костей черепа, необходимо заместить поврежденный костный участок для обеспечения физической защиты мозга. В таких случаях используются индивидуальные черепные пластины, которые, кроме того, дополнительно обеспечивают эстетическую функцию (рис. 4с) [10].



Рис. 4. Виды металлических черепных имплантатов:  
 а – пластины быстрой фиксации BBRAUN;  
 б – пластины резьбовой фиксации BBRAUN;  
 с – индивидуальная краниопластина

Fig. 4. Types of metal cranial implants:  
 a – BBRAUN quick fixation plates;  
 b – BBRAUN threaded fixation plates;  
 c – individual cranial plate

Челюстно-лицевые имплантаты предназначены для лечения травм костей челюстно-лице-

вого скелета, корректировки врожденных и приобретенных дефектов лицевых костей и челюстей (рис. 5). Такие изделия используются для соединения и фиксации двух или более отломков костей и также выполнения функции каркаса. Эти имплантаты представляют собой пластины сложной конфигурации, закрепляемые в костной ткани с помощью винтов [11].

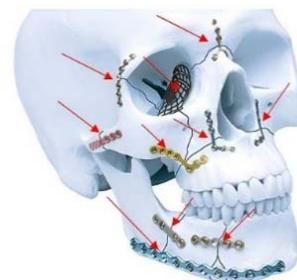


Рис. 5. Челюстно-лицевые имплантаты  
 Fig. 5. Maxillofacial implants

Позвоночные имплантаты применяются при разрушениях дисков позвоночника (грыже), смещениях позвонков, сужениях позвоночного канала, травмах. Имплантаты этого типа служат в качестве стабилизаторов, корректоров направления и высоты позвоночника, заместителей отдельных элементов позвоночного столба, нуждающихся в удалении и замене. Современная классификация позвоночных имплантатов включает различные виды и модификации, представляющие собой жесткие (неподвижные) и динамичные (подвижные) конструкции в виде пластин, скоб, пружин, эндопротезов дисков и позвонков, кейджей, цилиндров, имплантационные системы с винтовой фиксацией (рис. 6) [12, 13].

Эндопротезы используются для замены травмированных или патологически измененных естественных суставов с целью восстановления подвижности и качества жизни пациента. К наиболее распространенным изделиям этой группы имплантатов относятся эндопротезы тазобедренного и коленного суставов (рис. 7). Также в медицинской практике широко используются эндопротезы плечевого сустава, голеностопного сустава и эндопротезы суставов пальцев рук и ног.

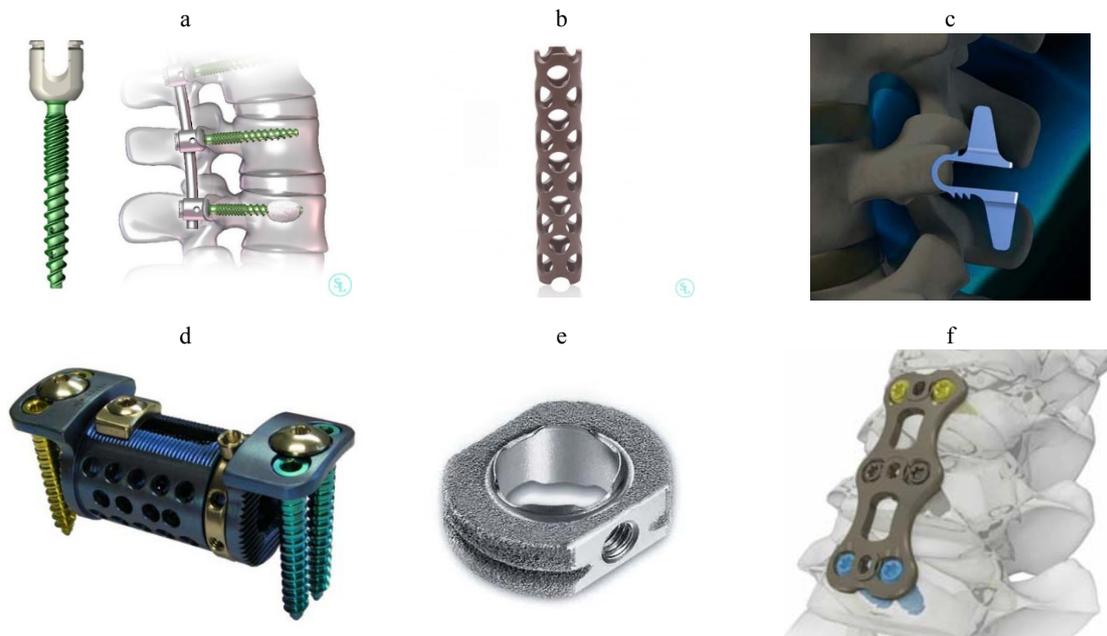


Рис. 6. Основные виды металлических позвоночных имплантатов: а – имплантационная система с винтовой фиксацией DePuy; б – имплантат с сетчатой структурой; с – имплантат Coflex; д – телозаменяющий телескопический имплантат ООО «Медбиотех»; е – кейдж BBRAUN; ф – пластина шейная

Fig. 6. Main types of metal spinal implants: a – implantation system with screw fixation DePuy; б – implant with a mesh structure; с – Coflex implant; д – body-replacement telescopic implant of Medbiotech LLC; е – BBRAUN cage; ф – neck plate



Рис. 7. Конструкции эндопротезов коленного (а) и тазобедренного (б) суставов

Fig. 7. Designs of knee (а) and hip (b) joint endoprostheses

Травматологические имплантаты применяются для восстановления костей после переломов (рис. 8). Такие имплантаты обеспечивают фиксацию отломков в необходимом положении с сохранением функциональности восстанавливаемого сегмента и стабилизацию зоны перелома до полного сращения кости. Остеосинтез разделяется на наружный (чрес-

костный), когда хирургическое вмешательство в зону перелома не осуществляется, и погружной (внутренний), осуществляемый с открытым доступом. При наружном остеосинтезе применяют аппараты внешней фиксации, а в качестве фиксаторов используются чрескожные винты и спицы. При погружном остеосинтезе для фиксации используются металлические пластины, которые крепят к костям винтами [14].



Рис. 8. Имплантаты для травматологии

Fig. 8. Implants for traumatology

Наиболее распространенными сердечно-сосудистыми имплантатами являются стенты, стент-графты, искусственные клапаны сердца и кардиостимуляторы (рис. 9). Стенты используются для восстановления нормального кровотока при критических последствиях сужения сосуда. Они вводятся в пораженный сосуд под рентгеноскопическим контролем, что делает процедуру лечения минимально инвазивной по сравнению с открытой кардиохирургией. Стент представляет собой упругую полую цилиндрическую конструкцию, состоящую из ряда балок и соединительных элементов. Применяются стенты для восстановления кровотока в подвздошных, бедренных, сонных брахицефальных, коронарных сосудах, сосудах головного мозга [15].

Стент-графты используются для укрепления ослабленной сосудистой стенки с целью предотвращения разрыва аневризмы (растяжения) аорты. Конструкция состоит из полиэфирной трубки, армированной металлическим каркасом. Имплантация стент-графтов выпол-

няется эндоваскулярно. Установленный стент-графт перекрывает полость аневризмы и проводит кровь без контакта с расширенной полостью аорты. В результате со временем артерия тромбируется и уменьшается в размерах [16].

Фильтр-ловушка для тромбов (кава-фильтр) – имплантат, предназначенный для предотвращения развития у пациентов с высоким риском тромбоэмболии легочной артерии. После имплантации через него происходит фильтрация крови, собираемой по венозной системе от нижних конечностей и органов таза [17].

Искусственный клапан сердца имплантируется при патологии естественного. Конструкции искусственных клапанов сердца разделяются на биологические и механические. Биологический клапан сердца представляет собой металлический каркас с затвором, изготовленным из неживых тканей животного [18]. В механическом клапане запирающий элемент выполнен в виде двух створок, закрепленных на металлическом каркасе.



Рис. 9. Конструкции сердечно-сосудистых имплантатов: а – коронарный стент; б – аортальный стент-графт; с – фильтр-ловушка; д – биологический клапан сердца; е – механический клапан сердца

Fig. 9. Designs of cardiovascular implants: а – coronary stent; б – aortic stent graft; с – filter trap; д – biological heart valve; е – mechanical heart valve

### Металлические материалы, применяемые при производстве имплантатов

В настоящее время основными металлическими материалами, используемыми при производстве имплантатов, являются коррозионно-стойкая сталь, титан и титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы и никелид титана (нитинол). Реже используются тантал, магниевые сплавы и драгоценные металлы (серебро, золото, платина, палладий) [19].

**Коррозионно-стойкие стали.** Для изготовления имплантатов, длительно функционирующих в организме, используется сталь 316L, обладающая более высокой устойчивостью к питтинговой и щелевой коррозии по сравнению с другими аустенитными коррозионно-стойкими сталями за счет легирования молибденом [20, 21]. Положительное действие молибдена связано с повышением стойкости пассивной пленки к разрушению, увеличением репассивационных характеристик или снижением скорости активного растворения открытого металла внутри питтинга, что связывают с образованием ионов  $Mo_4^{2-}$ , адсорбирующихся на поверхности металла и являющихся ингибиторами коррозии. Согласно [20], молибден позволяет сместить потенциал питтингообразования сталей аустенитного класса в положительную область даже при более низком содержании хрома. Кроме того, молибден способствует снижению числа питтингов. Имплантаты из стали 316L используются в травматологии для имплантации с целью фиксации костных отломков, в стоматологии, офтальмологии, а также при изготовлении стентов как с покрытиями, так и без покрытий [22].

Аустенитные коррозионно-стойкие стали достаточно хорошо поддаются обработке давлением. Содержащийся в них никель обеспечивает высокую пластичность и вязкость. В процессе холодной пластической деформации происходит упрочнение, что вызывает эффект наклепа. В деформированном состоянии аустенитные коррозионно-стойкие стали имеют высокий предел прочности (до 1400–1700 МПа). Повышения пластичности, снижения твердости и предела прочности этих сталей добиваются закалкой в воде при температуре 1050–1100 °С

без дальнейшего отпуска. При нагреве происходит растворение карбидов хрома в аустените. При этом обеспечивается предел прочности 540–580 МПа, предел текучести 190–196 МПа и относительное удлинение 38–50 %. В таком состоянии аустенитные стали имеют также повышенную коррозионную стойкость [23].

Основной проблемой при использовании коррозионно-стойких сталей для производства имплантатов является их возможное аллергическое действие на ткани. Кроме аллергической реакции токсичное и канцерогенное влияние на организм оказывает эмиссия никеля [8]. Для устранения этого недостатка разработаны безникелевые аустенитные коррозионно-стойкие стали, легированные марганцем и азотом. Такие стали имеют следующий состав: углерод – 0,08 %, азот – 0,9 %, марганец – 21–24 %, хром – 19–23 %, молибден – 0,15–1,5 %. По сравнению со сталью 316L безникелевые стали отличаются также более высоким содержанием хрома и углерода. Они имеют устойчивую аустенитную структуру и высокую коррозионную стойкость [24]. При этом анализ литературы показывает, что до настоящего времени безникелевые аустенитные стали не получили широкого распространения при производстве имплантатов.

**Титан и титановые сплавы** (Ti – 6Al – 4V, Ti – 6Al – 7Nb, Ti – 5Al – 6Nb, Ti – 15Mo – 5Zr – 3Al, Ti – 13Nb – 13Zr) широко используются при изготовлении имплантатов благодаря своей высокой устойчивости к коррозии, отсутствию известных канцерогенных рисков и высокой степени биосовместимости. Достоверных данных, подтверждающих выраженную реактивность тканей человека на титан, в настоящее время нет. Титан инертен к окружающим тканям, продукты его коррозии не токсичны, кроме того, они не распространяются по всему организму, концентрируясь вблизи имплантата [8].

Титан и титановые сплавы имеют более низкий модуль упругости (105–110 ГПа) по сравнению с коррозионно-стойкой сталью и сплавами на основе кобальта, что обеспечивает лучшую механическую совместимость имплантатов с костью, модуль упругости которой составляет менее 30 ГПа. Упругие деформации системы кость – имплантат приводят к мень-

шим нагрузкам на ткань в два раза и, следовательно, резко уменьшают вероятность некроза и разрушения кости [25].

Технический титан разделяется на четыре основные группы: Grade 1 (аналог марки BT1-00 по ГОСТ), Grade 2 (аналог марки BT1-0 по ГОСТ), Grade 3, Grade 4, которые классифицируются по коррозионной стойкости, пластичности и прочности. Разновидностью титана Grade 1 является титан Grade 1 ELI, который характеризуется меньшим количеством примесей. Титан Grade 1 ELI имеет максимальную коррозионную стойкость, максимальную пластичность и самый низкий предел прочности, в то время как титан Grade 4 обладает максимальной прочностью при умеренной пластичности. Технический титан относится к сплавам нормальной прочности с  $\alpha$ -структурой. Предел прочности составляет  $\sigma_b = 200\text{--}550$  МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2} = 170\text{--}483$  МПа, относительное удлинение  $\delta = 15\text{--}24$  % [26]. Технический титан не упрочняется термической обработкой, хорошо обрабатывается давлением в холодном и горячем состояниях, плохо обрабатывается резанием – налипает на инструмент, что приводит к его быстрому износу [27]. Полирование поверхности изделий из технического титана и титановых сплавов выполняются с применением механических и электрохимических методов [28].

Технический титан применяется при изготовлении электродов кардиостимуляторов, корпусов искусственных клапанов сердца, зубных, челюстно-лицевых и черепных имплантов, винтов для остеосинтеза [18].

Наиболее часто применяемым при производстве имплантатов материалом на основе титана является сплав Ti – 6Al – 4V (аналог сплава BT6 согласно классификации ГОСТ). На него приходится около 50 % общего объема производства [29]. Сплав Ti – 6Al – 4V относится к группе высокопрочных и является самым распространенным упрочняемым титановым сплавом ( $\alpha + \beta$ )-класса. Сплав упрочняется с помощью термической обработки – закалки и старения. При этом достигается предел прочности до 1080 МПа [30]. Сплав применяется в конструкциях имплантатов, требующих высоких прочностных характеристик при малом весе (высокая удельная прочность), достаточной коррозионной стойкости

и биосовместимости [29]. Алюминий в составе сплава значительно упрочняет  $\alpha$ -фазу, а ванадий, выступающий в качестве  $\beta$ -стабилизатора, обеспечивает упрочнение в меньшей степени по сравнению с другими возможными легирующими элементами, но при этом и меньше снижает пластичность. Сплав Ti – 6Al – 4V обладает высокой стойкостью к коррозии и хорошей технологичностью – подвергается ковке и термообработке, обрабатывается резанием лучше технического титана [31].

Из сплава Ti – 6Al – 4V изготавливаются такие имплантаты, как эндопротезы тазобедренного сустава, эндопротезы коленного сустава, пластины и винты для остеосинтеза, позвоночные имплантаты [29].

Основным недостатком сплава Ti – 6Al – 4V является возможное негативное влияние микропримесей и легирующих элементов на ткани организма. Например, железо и хлор, легирующие компоненты титановых сплавов, такие как ванадий и алюминий, не только не способствуют биосовместимости, но и, накапливаясь в тканях, могут оказывать токсическое воздействие на организм больного и вызвать нестабильность компонентов имплантата. Отдельные соединения алюминия, хотя и малотоксичны, но могут привести к фиброзу, анемии, местно-раздражающей реакции и нарушению нервной функции. Ванадий относится к токсическим элементам с разнообразным патологическим воздействием на организм. При попадании в организм ванадий накапливается в печени, почках и костях [32].

С целью снижения негативного эффекта при длительной эксплуатации имплантатов из сплава Ti – 6Al – 4V был разработан сплав Ti – 6Al – 7Nb, не уступающий по физико-механическим свойствам Ti – 6Al – 4V. Главным отличием между этими двумя малолегируемыми титановыми сплавами является то, что Ti – 6Al – 7Nb в полной мере соответствует всем принципам безопасных материалов, применяемых в медицине. Сплав имеет более высокую коррозионную стойкость и биотолерантность по сравнению со сплавами Ti – 6Al – 4V [33].

Общим недостатком материалов на основе титана являются низкие триботехнические характеристики. Титан и титановые сплавы обладают высоким коэффициентом трения,

их изнашивание имеет абразивный характер [34, 35].

**Кобальт-хромовые сплавы** широко используются в настоящее время в качестве материала для изготовления компонентов эндопротезов суставов, сердечно-сосудистых и стоматологических имплантатов. Они обладают высокими прочностными характеристиками, высокой износостойкостью и устойчивостью в коррозионных средах. Их износостойкость особенно высока по сравнению с другими биосовместимыми металлическими материалами. Кроме того, кобальт-хромовые сплавы обладают удовлетворительной биосовместимостью и обычно не вызывают аллергических реакций в организме [36].

Согласно стандартам ISO, существуют четыре типа кобальт-хромовых сплавов, которые рекомендуются для применения при производстве имплантатов (CoCrMo, CoCrWNi, CoNiCrMo, CoNiCrMoFe). Их основу составляет кобальт, а также хром, вводимый для придания сплаву твердости и повышения коррозионной стойкости. При содержании хрома выше 30 % в сплаве образуется хрупкая фаза, что ухудшает механические свойства и литейные качества сплава. Никель повышает пластичность, вязкость, ковкость сплава, улучшая тем самым его технологические свойства. Молибден имеет большое значение для повышения прочности сплава за счет придания ему мелкозернистости. Марганец увеличивает прочность, качество литья, понижает температуру плавления, способствует удалению токсичных сернистых соединений из сплава [37].

Изделия из кобальт-хромовых сплавов изготавливаются методом литья (литейный сплав CoCrMo согласно ISO 5832-4),ковки и штамповки (сплавы CoCrWNi, CoNiCrMo, CoNiCrMoFe и деформируемый сплав CoCrMo согласно ISO 5832-12), а также методом порошковой металлургии. Изделия, получаемые методом литья, характеризуются малой ползучестью и высокой прочностью, в то время как изделия, получаемые ковкой, имеют высокий предел прочности, высокую усталостную прочность и вязкость [38].

Литой и деформируемый сплавы CoCrMo (ISO 5832-4 и ISO 5832-12) используются при изготовлении компонентов тазобедренных, ко-

ленных и плечевых суставов, для изготовления металлических каркасов съемных зубных протезов. Сплавы CoCrWNi (ISO 5832-5), CoNiCrMo (ISO 5832-5) и CoCrFeNiMo (ISO 5832-5) применяются для изделий, получаемых ковкой, при изготовлении которых требуются большие деформации. Из сплава CoCrWNi изготавливают фиксирующую проволоку, стенты, каркасы клапанов сердца. Сплав CoNiCrMo используют для направляющих проводников, пружин, зондов, катетеров, коронарных стентов. Сплав CoCrFeNiMo применяется при производстве хирургических зажимов, пружин, баллонорасширяемых стентов, саморасширяющихся стентов [39].

Кобальт-хромовые сплавы плохо поддаются обработке резанием из-за сочетания высокой прочности, вязкости, износостойкости и плохой теплопроводности [40]. Полирование поверхности изделий из кобальт-хромовых сплавов обеспечивается абразивной механической обработкой, алмазным выглаживанием или электрохимической обработкой [41, 42].

Высокая коррозионная стойкость кобальт-хромовых сплавов обусловлена большим содержанием хрома, никеля и молибдена. Эти компоненты сплава повышают пассивацию, стойкость к питтинговой и щелевой коррозии в хлоридсодержащей среде. Тонкие оксидные пленки, образующиеся на поверхности сплавов системы кобальт – хром, предотвращают межкристаллитную коррозию и приводят к повышению биосовместимости [43].

Основным недостатком сплавов системы кобальт – хром является использование для легирования металлов, которые могут оказывать аллергическое, токсическое и канцерогенное воздействие на организм [44]. Высвобождение ионов опасных металлов приводит к повреждению таких органов, как печень, почки, клетки крови и легкие. Кроме того, из всех металлических материалов, применяемых при производстве имплантатов, кобальт-хромовые сплавы имеют максимальное значение модуля упругости (230 ГПа [4]), что ограничивает их механическую совместимость с костной тканью. В этой связи в настоящее время кобальт-хромовые сплавы практически не используются при производстве изделий для травматологии.

**Никелид титана (нитинол).** Благодаря высоким прочностным характеристикам, коррозионной стойкости и биосовместимости сплавы на основе никелида титана (нитинол) получили широкое распространение при производстве имплантатов. Сверхупругость и эффект памяти формы (способность восстанавливать свою форму после пластической деформации) являются его важным преимуществом при производстве медицинских изделий. Благодаря эффекту сверхупругости величина относительного удлинения нитинола в области упругой деформации достигает 8 %, что в разы больше, чем при деформации других металлических материалов [45].

Нитинол применяется при изготовлении изделий для травматологии и ортопедии, сердечно-сосудистой хирургии, стоматологии, челюстно-лицевой хирургии, офтальмологии. Например, в сердечно-сосудистой хирургии используются саморасширяющиеся стенты из нитинола, искусственные клапаны сердца, окклюдеры, кава-фильтры, стентграфты [46, 47]. В травматологии и ортопедии применяют позвоночные имплантаты, скобы для фиксации отломков костей [46].

Эффект памяти формы и эффект сверхупругости реализуются в нитиноле благодаря обратимому термоупругому аустенитно-мартенситному превращению, которое возникает при термическом или силовом воздействии и сопровождается изменением механических характеристик. При понижении температуры или приложении нагрузки аустенитная фаза (А) частично или полностью превращается в мартенситную фазу (М). Таким образом реализуется прямое мартенситное  $A \rightarrow M$  превращение. При возврате температуры к исходному значению или прекращению действия нагрузки происходит обратное мартенситное превращение ( $M \rightarrow A$ ). Фазовые превращения между аустенитом и мартенситом характеризуются начальной  $M_n$  и конечной  $M_k$  температурой мартенситного (прямого) превращения, а также начальной  $A_n$  и конечной  $A_k$  температурой аустенитного (обратного) превращения [48].

Температуры фазовых превращений и, следовательно, основные термомеханические свойства нитинола во многом зависят от соотношения содержания никеля и титана,

а также от выполненной термомеханической обработки. Нитинол обычно состоит из примерно 50–52 % ат. никеля (55–57 % мас.) [49]. Например, согласно стандарту ASTM F2063, нитинол для медицинских изделий и имплантатов должен содержать 54,5–57,0 % мас. никеля, остальное – титан. При этом температуры фазовых превращений очень чувствительны к соотношению никеля и титана. Так, согласно [50], при изменении соотношения никеля и титана с 50,75/49,25 до 50,5/49,5 % ат. температура начала обратного превращения  $A_n$  увеличивается от 10 до 35 °С.

Механические характеристики нитинола также зависят от фазового состояния и предварительной обработки. Так, предел прочности  $\sigma_b$  нагартованного материала достигает 1900 МПа, отожженного – 895 МПа. Для отожженного материала предел упругости  $\sigma_{0,2}$  находится в диапазонах: в аустенитном состоянии – 195–690 МПа, в мартенситном состоянии – 70–140 МПа. Относительное удлинение отожженного материала составляет 25–50 % [45].

Нитинол относительно легко поддается обработке давлением в горячем состоянии. Однако его холодная обработка затруднена тем, что из-за высокой упругости увеличивается контакт с деформирующим инструментом, что вызывает чрезмерное трение и износ инструмента. По этим же причинам нитинол очень плохо поддается обработке резанием, к тому же он имеет низкую теплопроводность, что затрудняет отвод теплоты от заготовки. При этом относительно хорошо поддается шлифованию, электроэрозионной обработке и лазерной резке. Для точной лазерной резки, в особенности тонкостенных (до 125 мкм) конструкций или конструкций с тонкими перемычками (до 100 мкм), применяются фемтосекундные лазеры с ультракороткими импульсами [46].

Фиксация необходимой конфигурации изделия из проволоочной или листовой заготовки выполняется путем ее термической обработки. Для этого с помощью оснастки заготовке придают форму готового изделия, а затем в заготовленном состоянии выполняют нагрев с последующим охлаждением. Термообработку проводят в печах с инертной атмосферой при температуре 450–550 °С. Фактическая температура и время выдержки определяются составом

нитинола и требуемыми механическими характеристиками [46].

Нитинол в 0,9%-м растворе хлорида натрия при 37 °С обладает лучшей коррозионной стойкостью, чем кобальт-хромовые сплавы и коррозионностойкие стали. Однако стойкость к коррозии у титановых сплавов выше [51]. Проведенные исследования показали, что нитинол не проявляет цито-, нейро- и генотоксической или аллергической активности. Считается, что контакт никеля с организмом изолирован тонкой пленкой оксида титана. Кроме того, атомы никеля образуют прочную связь с атомами титана, что препятствует выходу ионов никеля в окружающие ткани. Однако из-за значительного содержания никеля в нитиноле существуют риски выделения его ионов в организм. Для решения этой проблемы применяется дополнительное легирование сплава, нанесение защитных покрытий и обработка поверхности, направленная на снижение профиля ее микронеровностей [52].

Нитинол имеет наилучшую механическую совместимость по сравнению с другими металлическими материалами, используемыми для изготовления имплантатов, – более низкий модуль упругости, а также более высокую степень упругой деформации. Модуль упругости в зависимости от фазового состояния составляет 40–75 ГПа [53]. В последнее время для замещения дефектов костных и хрящевых структур опорно-двигательного аппарата применяют пористые имплантаты из никелида титана, получаемые методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [54]. Пористый нитинол имеет значительно меньший модуль упругости по сравнению с монолитным материалом, что повышает механическую совместимость имплантата, изготовленного из него. В исследовании [55] установлено, что при пористости 60 % и среднем размере пор 100–500 мкм среднее значение модуля упругости составляет около 1 ГПа.

## ВЫВОДЫ

1. Современные изделия медицинского назначения из металлических материалов представляют широкую номенклатуру и имеют существенные отличия по форме и размерам. Одни из них характеризуются малым сечением и жесткостью, при этом обладают упругими свойствами. Другие изделия являются несущими,

в ряде случаев массивными конструкциями. Соответственно выбор материала, из которого изготавливается тот или иной имплантат, обуславливается особенностями его функционирования, которые, в свою очередь, определяют требования к механическим характеристикам и к свойствам поверхности.

2. В зависимости от назначения имплантата применяемый для его производства материал должен иметь высокий предел прочности, предел выносливости, твердость, износостойкость, низкий модуль упругости. При этом основными критериями выбора материала для производства всех имплантатов являются его биологическая совместимость и коррозионная стойкость на протяжении всего периода эксплуатации в организме человека. Все применяемые в настоящее время биосовместимые металлические материалы не являются полностью инертными по отношению к организму. Каждый материал обладает определенной реактогенностью – в любом случае вызывает некоторую реакцию окружающих тканей. Наибольшую биосовместимость и коррозионную стойкость в организме обеспечивает технический титан, который, однако, обладает низкими прочностными характеристиками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Thakur, A. Recent Advancements in the Surface Treatments for Enhanced Biocompatibility and Corrosion Resistance of Titanium-Based Biomedical Implants / A. Thakur, A. Kumar // *Applied Chemical Engineering*. 2024. Vol. 7, iss. 1. Art. ID 2042. <https://doi.org/10.24294/ace.v7i1.2042>.
2. Biomaterials in Cardiovascular Research: Applications and Clinical Implications / Jaganathan S.K [et al.] // *Biomed Research International*. 2014. Vol. 2014. Art. ID 459465. <https://doi.org/10.1155/2014/459465>.
3. Mahdavian, A. R. Efficient Separation of Heavy Metal Cations by anchoring Polyacrylic Acid on Superparamagnetic Magnetite Nanoparticles Through Surface Modification / A. R. Mahdavian, M. A. S. Mirrahimi // *Chemical Engineering Journal*. 2010. Vol. 159, iss. 1–3. P. 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.02.041>.
4. Additive Manufacturing of Customized Metallic Orthopedic Implants: Materials, Structures, and Surface Modifications / L. Bai [et al.] // *Metals*. 2019. Vol. 9, iss. 9. P. 1004. <https://doi.org/10.3390/met9091004>.
5. Abraham, A. M. A Review on Application of Biomaterials for Medical and Dental Implants / A. M. Abraham, S. Venkatesan // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2023. Vol. 237, iss. 2. P. 249–273. <https://doi.org/10.1177/14644207221121981>.
6. Zwawi, M. Recent Advances in Bio-Medical Implants; Mechanical Properties, Surface Modifications and Appli-

- cations / M. Zwawi // *Engineering Research Express*. 2022. Vol. 4, No 3. Art. ID 032003 <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac8ae2>.
7. Применение металлических материалов для медицинских имплантатов / А. Г. Илларионов [и др.] // *Вестник Ивановской медицинской академии*. 2017. Т. 22, № 4. С. 46–50.
  8. Рожнова, О. М. Биологическая совместимость медицинских изделий на основе металлов, причины формирования патологической реактивности (обзор иностранной литературы) / О. М. Рожнова, В. В. Павлов, М. А. Садовой // *Бюллетень сибирской медицины*. 2015. № 14 (4). С. 110–118. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2015-4-110-118>.
  9. Rahmanivahid, P. Design Parameters of Dental Implants: A review / P. Rahmanivahid, M. Heidari // *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. 2022. Vol. 38, iss. 1. <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2022.03.002>.
  10. Design and Mechanical Evaluation of a Large Cranial Implant and Fixation Parts / C. N. T. Kim [et. Al.] // *Interdisciplinary Neurosurgery*. 2023. Vol. 31. Article 101676. <https://doi.org/10.1016/j.inat.2022.101676>.
  11. Хирургия челюсти [Электронный ресурс] // ООО «Титанмед». Режим доступа: <https://titanmed.ru/production/maxillofacial-surgery.html>. Дата доступа: 08.02.2024.
  12. Implant Surface Technologies to Promote Spinal Fusion: A Narrative Review / A. Croft [et al.] // *International Journal of Spine Surgery*. 2023. Vol. 17, Iss. S3, P. S35–S43. <https://doi.org/10.14444/8559>.
  13. Операция на позвоночнике с установкой имплантатов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://spine.life.ru/operaciya-na-pozvonochnike-s-ustanovkoj-implantatov>. Дата доступа: 09.02.2024.
  14. Orthopedic Implants and Devices for Bone Fractures and Defects: Past, Present and Perspective / T. Kim [et al.] // *Engineered Regeneration*. 2020. Vol. 1. P. 6–18. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2020.05.003>.
  15. Cardiovascular Stents: A Review of Past, Current, and Emerging Devices / A. S. Udriște [et al.] // *Materials (Basel)*. 2021. Vol. 14. Article № 2498. <https://doi.org/10.3390/ma14102498>.
  16. Endovascular Stent-Graft Treatment for Aorto-esophageal Fistula Induced by an Esophageal Fishbone: Two Cases Report / H. Gong [et al.] // *World Journal of Clinical Cases*. 2022. Vol. 10. P. 2206–2215. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v10.i7.2206>.
  17. ООО «Полимедтех» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://medtech.by/razrabotki/filtry-lovushki-dlya-trombov/>. Дата доступа: 09.02.2024.
  18. The Use of Biological Heart Valves / S. Kueri [et al.] // *Deutsches Ärzteblatt international*. 2019. Vol. 116, iss. 25. P. 423–430. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2019.0423>.
  19. Improving Biocompatibility for Next Generation of Metallic Implants. / A. Bandyopadhyay [et al.] // *Progress in Materials Science*. 2023. Vol. 133. Article № 101053. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101053>.
  20. Kaneko, M. Effects of Molybdenum on the Pitting of Ferritic- and Austenitic-Stainless Steels in Bromide and Chloride Solutions / M. Kaneko, H. S. Isaacs // *Corrosion science*. 2002. № 44. P. 1825–1834.
  21. Электрохимическое полирование матричных стентов из стали 316LVM с использованием микросекундных импульсов / Ю.Г. Алексеев [и др.] // *Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. 2021. Т. 66, № 2. С. 161–168. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-161-168>.
  22. In Silico Evaluation of Additively Manufactured 316L Stainless Steel Stent in a Patient-Specific Coronary Artery / R. He [et al.] // *Medical Engineering & Physics*. 2022. Vol. 109. Article № 103909. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2022.103909>.
  23. Теория и технология волочения. Основы процесса волочения / Б. Н. Марьин [и др.]. 2-е изд., доп. Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2006. 85 с.
  24. Patnaik, L. Status of Nickel Free Stainless Steel in Biomedical Field: A review of Last 10 Years and what Else Can be done / L. Patnaik, S. R. Maity, S. Kumar // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26, part 2. P. 638–643. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.205>.
  25. On the Investigation of Surface Integrity of Ti6Al4V ELI using Si-Mixed Electric Discharge Machining. / M. U. Farooq [et al.] // *Materials*. 2020. Vol. 13, Iss. 7. Article № 1549. <https://doi.org/10.3390/ma13071549>.
  26. Implants for Surgery. Metallic Materials. Part 2: Unalloyed Titanium: ISO 5832-2:2018; publ. 21.03.2018. International Organization for Standardization, 2018. 3 p.
  27. Ильин, А. А. Титановые сплавы: состав, структура, свойства: справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Польшкин. М.: ВИЛС МАТИ, 2009. 519 с.
  28. Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte / Y. Aliakseyeu [et al.] // *Mechanika*. Vol. 27, № 1. P. 88–93. <http://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
  29. Selective Laser Manufacturing of Ti-Based Alloys and Composites: Impact of Process Parameters, Application trends, and Future Prospects / N. Singh [et al.] // *Mater. Today Adv.* 2020. Vol. 8. Article № 100097. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100097>.
  30. Liu, X. Surface Modification of Titanium, Titanium Alloys, and Related Materials for Biomedical Applications / X. Liu, P. K. Chu, C. Ding // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2004. Vol. 47, iss. 3–4. P. 49–121. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.11.001>.
  31. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах / В. В. Савич [и др.]; под науч. ред. В. В. Савича. Минск: Беларус. навука, 2012. 244 с.
  32. Titanium allergy or Not? «Impurity» of Titanium Implant Materials / T. Harloff [et al.] // *Health*. 2010. Vol. 2, iss. 4. P. 306–310. <https://doi.org/10.4236/health.2010.24045>.
  33. Abreu-García, A. Corrosion performance of Ti6Al7Nb alloy in simulated body fluid for implant application characterized using macro- and microelectrochemical techniques / A. Abreu-García, R. M. Souto, J. Izquierdo // *Coatings*. 2023. Vol. 13, No 6. Art. № 1121. <https://doi.org/10.3390/coatings13061121>.
  34. Friction and wear performance of titanium alloys against tungsten carbide under dry sliding and water lubrication / Q. L. Niu [et al.] // *Tribol. Trans.* 2013. Vol. 56, Iss. 1. P. 101–108. <https://doi.org/10.1080/10402004.2012.729296>.
  35. Tribological Behavior of Ti–6Al–4V and Ti–6Al–7Nb Alloys for Total Hip Prosthesis / M. Fellah [et al.] // *Adv. Tribol.* 2014. Vol. 2014. Article ID 451387. <https://doi.org/10.1155/2014/451387>.
  36. Cobalt-chromium alloys in fixed prosthodontics in Sweden / M. Kassapidou [et al.] // *Acta Biomaterialia Odontologica*

- logica Scandinavica. 2017. Vol. 3, iss. 1. P. 53–62. <https://doi.org/10.1080/23337931.2017.1360776>.
37. Скоков, А. Д. Сплавы в ортопедической стоматологии / А. Д. Скоков // Новое в стоматологии. 1998. Т. 1, № 1. С. 28–44.
  38. Processing Development and Properties of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method / W. Vittayakorn [et al.] // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 43, Part. 3. P. 2629–2634. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.627>.
  39. Narushima, T. Co-Cr alloys as Effective Metallic Biomaterials / T. Narushima, K. Ueda, A. Alfirano // Advances in Metallic Biomaterials / eds: M. Niinomi, T. Narushima, M. Nakai. Berlin, Heidelberg, Springer, 2015. P. 157–158. (Springer Series in Biomaterials Science and Engineering, Vol. 3). [https://doi.org/10.1007/978-3-662-46836-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46836-4_7).
  40. Machinability of Cobalt-Based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys – A Review / A. Z. Hainol [et al.] // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 563–570. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.150>.
  41. Hryniewicz, T. Co–Cr Alloy Corrosion Behaviour after Electropolishing and “Magnetoelectropolishing” Treatments / T. Hryniewicz, R. Rokicki, K. Rokosz // Materials Letters. 2008. Vol. 62, iss. 17–18. P. 3073–3076. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.01.130>.
  42. Алексеев, Ю. Г. Электролитно-плазменное полирование кобальт-хромовых сплавов медицинского назначения / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс // Вес. нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2019. Т. 64, № 3. С. 296–303. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>.
  43. Release of Metal Ions From Nano CoCrMo Wear Debris Generated from Tribo-Corrosion Processes in Artificial Hip Implants / W. Yang [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2017. Vol. 68. P. 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.01.041>.
  44. Briffa, J. Heavy Metal Pollution in the Environment and their Toxicological Effects on Humans / J. Briffa, E. Sinagra, R. Blundell // Heliyon. 2020. Vol. 6, Iss. 9. Article № e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>.
  45. Fretting-Corrosion of CoCr-Alloys Against TiAl6V4: The Importance of Molybdenum in Oxidative Biological Environments / M.A. Wimmer [et al.] // Wear. 2021. Article № 203813. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203813>.
  46. Kapoor, D. Nitinol for Medical Applications: a Brief Introduction to the Properties and Processing of Nickel Titanium Shape Memory Alloys and Their use in Stents / D. Kapoor // Johnson Matthey Technology Review. 2017. Vol. 61, iss. 1. P. 66–76. <https://doi.org/10.1595/205651317X694524>.
  47. Electrolytic Plasma Polishing of NiTi Alloy / A. Korylov [et al.] // Mathematical Models in Engineering. 2021. Vol. 7, iss. 4, P. 70–80. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>.
  48. Markopoulos, A. A Review on the Machining of Nickel-Titanium Shape Memory Alloys / A. Markopoulos, I. Pressas, D. Manolakos // Reviews on Advanced Materials Science. 2015. Vol. 42. P. 28–35.
  49. Kocich, R. The Methods of Preparation of Ti-Ni-X Alloys and Their Forming / R. Kocich, I. Szurman, M. Kursa // Shape Memory Alloys-Processing, Characterization and Applications / ed. F. M. B. Fernandes. InTech, 2013. P. 28. <https://doi.org/10.5772/50067>.
  50. Полякова, Г. Н. Термомеханическая обработка сплавов на основе титана и никеля / Г. Н. Полякова, У. Х. Угурчиев, Н. Н. Новикова // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 1. С. 91–95. <https://doi.org/10.31857/S0235711920010113>.
  51. Исследование коррозионной стойкости биоматериалов на основе титана и никелида титана / А. А. Ильин [и др.] // Технология легких сплавов. 2007. № 3. С. 123–130.
  52. Haider, W. Enhanced Biocompatibility of NiTi (Nitinol) via Surface Treatment and Alloying: Dissertation / W. Haider. Florida International University, 2010. 177 p. <https://doi.org/10.25148/etd.FI10041612>.
  53. Manjaiah, M. Review on Non-Conventional Machining of shape Memory Alloys / M. Manjaiah, S. Narendranath, S. Basavarajappa // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. Vol. 24, iss. 1. P. 12–21. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63022-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63022-3).
  54. Improved Mechanical Properties of Porous Nitinol by Aluminum Alloying / A. N. Monogenov [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 918. Article № 165617. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165617>.
  55. Combustion Synthesis Porous Nitinol for Biomedical Applications / H. Aihara [et al.] // International Journal of Biomaterials. 2019. Vol. 2019. Article ID 4307461. P. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2019/4307461>.

Поступила 11.01.2024

Подписана в печать 14.03.2024

Опубликована онлайн 31.05.2024

## REFERENCES

1. Thakur A., Kumar A. (2024) Recent Advancements in the Surface Treatments for enhanced Biocompatibility and Corrosion Resistance of Titanium-Based Biomedical Implants. *Applied Chemical Engineering*, 7 (1), 121. <https://doi.org/10.24294/ace.v7i1.2042>
2. Jaganathan S. K., Supriyanto E., Murugesan S., Balaji A., Asokan M. K. (2014) Biomaterials in Cardiovascular Research: Applications and Clinical Implications. *Biomed Research International*, 2014, 459465. <https://doi.org/10.1155/2014/459465>.
3. Mahdavian A. R., Mirrahimi M. A.-S. (2010) Efficient Separation of Heavy Metal Cations by Anchoring Polyacrylic Acid on Superparamagnetic Magnetite Nanoparticles Through Surface Modification. *Chemical Engineering Journal*, 159 (1–3), 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.02.041>.
4. Bai L., Chen G., Chen X., Sun Y., Zhang J., Cai L., Zhu S., Xie S. Q. (2019). Additive Manufacturing of Customized Metallic Orthopedic Implants: Materials, Structures, and Surface Modifications. *Metals*, 9 (9), 1004. <https://doi.org/10.3390/met9091004>.
5. Abraham A. M., Venkatesan S. (2022). A Review on Application of Biomaterials for Medical and Dental Implants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 237 (2), 249–273. <https://doi.org/10.1177/14644207221121981>.

6. Zwawi M. (2022). Recent Advances in Bio-Medical Implants; Mechanical Properties, Surface Modifications and Applications. *Engineering Research Express*, 4 (3), 032003. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac8ae2>.
7. Illarionov A. G., Grib S. V., Yurovskikh A. S., Volokitina E. A., Gilev M. V., Azorina T. S. (2017) Usage of Metal Materials for Medical Implants. *Vestnik Ivanovskoy Meditsinskoy Akademii = Bulletin of the Ivanovo Medical Academy*, 22 (4), 46–50 (in Russian).
8. Rozhnova O. M., Pavlov V. V., Sadovoy M. A. (2015) Biological Compatibility of Metal-Based Medical Devices, Reasons for the Formation of Pathological Reactivity (Review of Foreign Literature). *Byulleten Sibirskoy Meditsiny = Bulletin of Siberian Medicine*, 14 (4), 110–118 (in Russian). <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2015-4-110-118>.
9. Rahmanivahid P., Heidari M. (2022) Design Parameters of Dental Implants: A Review. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 38 (1). <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2022.03.002>.
10. Kim C. N. T., Binh C. X., Dung V. T., Toan T. V. (2023). Design and Mechanical Evaluation of a Large Cranial Implant and Fixation Parts. *Interdisciplinary Neurosurgery*, 31, 101676. <https://doi.org/10.1016/j.inat.2022.101676>.
11. Jaw Surgery. *Titanmed*. Available at: <https://titanmed.ru/production/maxillofacial-surgery.html> (accessed 08 February 2024) (in Russian).
12. Croft A. J., Chanbour H., Chen J. W., Young M. W., Stephens B. F. (2023). Implant Surface Technologies to Promote Spinal Fusion: A Narrative Review. *International Journal of Spine Surgery*, 17 (S3), S35–S43. <https://doi.org/10.14444/8559>.
13. Spinal surgery with installation of implants. Available at: <https://spinellife.ru/operaciya-na-pozvonochnike-s-ustanovkoy-implantatov> (accessed 09 February 2024) (in Russian).
14. Kim T., See C. W., Li X., Zhu D. (2020). Orthopedic implants and Devices for Bone Fractures and Defects: Past, Present and Perspective. *Engineered Regeneration*, 1, 6–18. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2020.05.003>.
15. Scafa Udriște A., Niculescu A.-G., Grumezescu A. M., Bădilă E. (2021). Cardiovascular Stents: A Review of Past, Current, and Emerging Devices. *Materials*, 14 (10), 2498. <https://doi.org/10.3390/ma14102498>.
16. Gong H., Wei W., Huang Z., Hu Y., Liu X.-L., Hu Z. (2022) Endovascular Stent-Graft Treatment for Aortocephalic Fistula Induced by an Esophageal Fishbone: Two Cases Report. *World Journal of Clinical Cases*, 10 (7), 2206–2215. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v10.i7.2206>.
17. LLC “Polymedtekh”. Available at: <http://medtech.by/razrabotki/filtry-lovushki-dlya-trombov/> (accessed 09 February 2024) (in Russian).
18. Kueri S., Kari F. A., Fuentes R. A., Sievers H.-H., Beyersdorf F., Bothe W. (2019) The Use of Biological Heart Valves: Types of Prosthesis, Durability and Complications. *Deutsches Ärzteblatt International*, 116 (25), 423–430. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2019.0423>.
19. Bandyopadhyay, A., Mitra, I., Goodman, S. B., Kumar, M., & Bose, S. (2023). Improving Biocompatibility for next Generation of Metallic Implants. *Progress in Materials Science*, 133, 101053. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101053>.
20. Kaneko M., Isaacs H. S. (2002) Effects of Molybdenum on the Pitting of Ferritic- and Austenitic-Stainless Steels in Bromide and chloride Solutions. *Corrosion Science*, (44), 1825–1834.
21. Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Budnitsky A. S. (2021). Electrochemical Polishing of Matrix Stents of the 316LVM Steel Using Microsecond Pulses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*, 66 (2), 161–168. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-161-168>.
22. He R., Langi E., Garrard R., Attallah M. M., Silberschmidt V. V., Vogt F., Zhao L. (2022) In Silico Evaluation of Additively Manufactured 316L Stainless Steel Stent in a Patient-Specific Coronary Artery. *Medical Engineering & Physics*, 109, 103909. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2022.103909>.
23. Mar'in S. B., Kurinyi V. V., Tyutina E. A., Volkov K. V., Burkov A. A. (2006) *Theory and Technology of Drawing. Fundamentals of the Drawing Process*. 2<sup>nd</sup> Ed. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-na-Amure State Technical University. 85 (in Russian).
24. Patnaik L., Maity S. R., Kumar S. (2020) Status of Nickel Free Stainless Steel in biomedical Field: A review of Last 10 Years and what else Can be Done. *Materials Today: Proceedings*, 26 (2), 638–643. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.205>.
25. Umar Farooq M., Pervez Mughal M., Ahmed N., Ahmad Mufti N., Al-Ahmari A. M., He Y. (2020) On the Investigation of Surface Integrity of Ti6Al4V ELI Using Si-Mixed Electric Discharge Machining. *Materials*, 13 (7), 1549. <https://doi.org/10.3390/ma13071549>.
26. ISO 5832-2:2018. *Implants for surgery. Metallic materials. Part 2: Unalloyed titanium*. International Organization for Standardization, 2018. 3.
27. Ilyin A. A., Kolachev B. A., Polkin I. S. (2009) *Titanium Alloys: Composition, Structure, Properties*. Moscow: All-Russian Institute of Light Alloys – Moscow State Aviation Technological University. 519 (in Russian).
28. Aliakseyeu Y., Bubulis A., Minchenya V., Korolyov A., Niss V., Kandrotaitė Janutienė R. (2021) Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte. *Mechanics*, 27 (1), 88–93. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
29. Singh N., Hameed P., Ummethala R., Manivasagam G., Prashanth K. G., Eckert J. (2020) Selective Laser Manufacturing of Ti-Based Alloys and Composites: Impact of Process Parameters, Application Trends, and Future Prospects. *Materials Today Advances*, 8, 100097. <https://doi.org/10.1016/j.mtdadv.2020.100097>.
30. Liu X., Chu P., Ding C. (2004) Surface Modification of Titanium, Titanium Alloys, and Related Materials for Biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 47 (3–4), 49–121. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.11.001>.
31. Savich V. V., Saroka D. I., Kiselev M. G., Makarenko M. V. (2012) *Modification of the Surface of Titanium Implants and its Effect on their Physicochemical and Biomechanical Parameters in Biological Environments*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 244 (in Russian).
32. Harloff T., Hönle W., Holzwarth U., Bader R., Thomas P., Schuh A. (2010). Titanium allergy or Not? «Impurity» of Titanium Implant Materials. *Health*, 2 (4), 306–310. <https://doi.org/10.4236/health.2010.24045>.

33. Abreu-García A., Souto R. M., Izquierdo J. (2023) Corrosion performance of Ti6Al7Nb Alloy in Simulated Body Fluid for Implant Application Characterized Using Macro- and Microelectrochemical Techniques. *Coatings*, 13, 1121. <https://doi.org/10.3390/coatings13061121>.
34. Niu Q. L., Zheng X. H., Ming W. W., Chen M. (2013) Friction and Wear Performance of Titanium Alloys against Tungsten Carbide under Dry Sliding and Water Lubrication. *Tribology Transactions*, 56 (1), 101–108. <https://doi.org/10.1080/10402004.2012.729296>.
35. Fellah M., Labaiz M., Assala O., Dekhil L., Taleb A., Rezag H., Iost A. (2014) Tribological Behavior of Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb Alloys for Total Hip Prosthesis. *Advances in Tribology*, 2014, 451387. <https://doi.org/10.1155/2014/451387>.
36. Kassapidou M., Franke Stenport V., Hjalmarsson L., Johansson C. B. (2017) Cobalt-Chromium Alloys in Fixed Prosthodontics in Sweden. *Acta Biomaterialia Odontologica Scandinavica*, 3 (1), 53–62. <https://doi.org/10.1080/23337931.2017.1360776>.
37. Skokov A. D. (1998) Alloys in Orthopedic Dentistry. *Novoye v Stomatologii* [New in Dentistry], 1 (1), 28–44 (in Russian).
38. Vittayakorn W., Poolphol P., Aimprakod K., Maluangnont T. (2021) Processing Development and Properties of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2629–2634. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.627>.
39. Narushima T., Ueda K., Alfirano A. (2015) Co-Cr alloys as Effective Metallic Bio-materials. Niinomi M., Narushima T., Nakai M. (eds.) *Advances in Metallic Biomaterials. Springer Series in Biomaterials Science and Engineering, Vol. 3*. Berlin, Heidelberg, Springer, 157–158. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-46836-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46836-4_7).
40. Zaman H. A., Sharif S., Kim D.-W., Idris M. H., Suhaimi M. A., Tumurkhuyag Z. (2017) Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys – A Review. *Procedia Manufacturing*, 11, 563–570. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.150>.
41. Hryniewicz T., Rokicki R., Rokosz K. (2008) Co-Cr Alloy Corrosion Behaviour After Electropolishing and “Magnetoelectropolishing” Treatments. *Materials Letters*, 62 (17–18), 3073–3076. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.01.130>.
42. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S. (2019) Electrolytic-Plasma Polishing of Cobalt-Chromium Alloys for Medical Products. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*, 64 (3), 296–303 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>.
43. Wang Y., Yan Y., Su Y., Qiao L. (2017) Release of metal ions from nano CoCrMo wear Debris Generated from Tribo-Corrosion Processes in Artificial Hip Implants. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 68, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.01.041>.
44. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. (2020). Heavy Metal Pollution in the Environment and their Toxicological Effects on Humans. *Heliyon*, 6 (9), e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>.
45. Wimmer M. A., Radice S., Janssen D., Fischer A. (2021) Fretting-Corrosion of CoCr-Alloys Against TiAl6V4: The Importance of Molybdenum in Oxidative Biological Environments. *Wear*, 477, 203813. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203813>.
46. Kapoor D. (2017) Nitinol for Medical Applications: a Brief Introduction to the Properties and Processing of Nickel Titanium Shape Memory Alloys and their Use in Stents. *Johnson Matthey Technology Review*, 61 (1), 66–76. <https://doi.org/10.1595/205651317X694524>.
47. Korolyov A., Bubulis A., Vėžys J., Aliakseyeu Y., Minchenya V., Niss V., Markin D. (2021). Electrolytic Plasma Polishing of NiTi alloy. *Mathematical Models in Engineering*, 7 (4), 70–80. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>.
48. Markopoulos A., Pressas I., Manolacos D. (2015) A Review on the Machining of Nickel-Titanium Shape Memory alloys. *Reviews on Advanced Materials Science*, 42, 28–35.
49. Kocich R., Szurman I., Kurska M. (2013) The Methods of Preparation of Ti-Ni-X Alloys and Their Forming. Fernandes F. M. B. (ed.) *Shape Memory Alloys-Processing, Characterization and Applications* InTech, 28. <https://doi.org/10.5772/50067>.
50. Polyakova G. N., Ugurchiev U. Kh., Novikova N. N. (2020) Thermomechanical Processing of Titanium and Nickel Alloys. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 49, 71–74. <https://doi.org/10.3103/s1052618820010112>.
51. Il'in A. A., Gusev D. E., Chernyshova Yu. V., Karpov V. N., Roshchina E. A. (2007) Study of the Corrosion Resistance of Biomaterials Based on Titanium and Titanium Nickelide. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov* [Light Alloy Technology], (3), 123–130 (in Russian).
52. Haider W. (2010) *Enhanced Biocompatibility of NiTi (Nitinol) via Surface Treatment and Alloying* [Dissertation]. Florida International University. 177. <https://doi.org/10.25148/etd.FI10041612>.
53. Manjaiah M., Narendranath S., Basavarajappa S. (2014) Review on Non-Conventional Machining of Shape Memory alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24 (1), 12–21. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(14\)63022-3](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(14)63022-3).
54. Monogenov A. N., Marchenko E. S., Baigonakova G. A., Yasenchuk Y. F., Garin A. S., Volinsky A. A. (2022) Improved Mechanical Properties of Porous Nitinol by Aluminum Alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 918, 165617. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165617>.
55. Aihara H., Zider J., Fanton G., Duerig T. (2019) Combustion Synthesis Porous Nitinol for Biomedical Applications. *International Journal of Biomaterials*, 2019, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2019/4307461>.

Received: 11.01.2024

Accepted: 14.03.2024

Published online: 31.05.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-219-224>

UDC 691.32:69.04:693.554-486:691.327

## Strength Indicators of Fiber Reinforced Concrete with Carbon Nanomaterials

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

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

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

**Abstract.** Concrete composites with low defects, dense and homogeneous, with a high degree of adhesion between the cement matrix and aggregates, as well as a high ratio between static tensile and compressive strengths and plasticity have the best crack resistance characteristics. This ratio increases in the case of the use of fiber-reinforced concrete. Modern research in nanotechnology focuses on the management of matter at the nanoscale level, which makes it possible to create materials with new properties. Due to the high aspect ratio, flexibility, high strength and rigidity, carbon nanotubes (CNTs) exhibit reinforcing properties. Due to their nanoscale features, CNTs interact with a complex network of calcium-silicate-hydrate binder (C – S – H), contribute to a decrease in porosity and compaction of the cement stone structure, increase the shear forces of matrix adhesion in the contact zone. Thus, there are all prerequisites to assert that fiber concrete with a cement matrix modified with carbon nanotubes will have the required high strength characteristics and crack resistance due to multilevel dispersed reinforcement and the efficient operation of fiber in a nanomodified concrete matrix. This article presents the results of testing samples made of cement stone, concrete and fiber concrete with carbon nanotubes. The presence of carbon nanotubes in cement stone contributes to an increase in compressive strength by 11 %, tensile strength during bending by 20 %. The test results of samples made of reinforced fiber concrete modified with nanocarbon materials have shown an increase in tensile strength during bending up to 109 %, tensile strength during splitting up to 82 %, axial tensile strength up to 78 %.

**Keywords:** reinforced fiber concrete, tensile strength, carbon nanotubes

**For citation:** Leonovich S. N., Sadovskaya E. A. (2024) Strength Indicators of Fiber Reinforced Concrete with Carbon Nanomaterials. *Science and Technique*. 23 (3), 219–224. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-219-224>

## Прочностные показатели фибробетона с углеродными наноматериалами

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

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

**Реферат.** Лучшими характеристиками трещиностойкости обладают бетонные композиты с малой дефектностью, плотные и однородные, с высокой степенью адгезии между цементной матрицей и заполнителями, а также высоким

---

### Адрес для переписки

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

### Address for correspondence

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

отношением между статическими прочностями на растяжение и на сжатие и пластичностью. Данное отношение повышается в случае использования фибробетонов. Современные исследования в нанотехнологиях фокусируются на управлении материей на наномасштабном уровне, что позволяет создавать материалы с новыми свойствами. Благодаря высокому соотношению сторон, гибкости, высокой прочности и жесткости углеродные нанотрубки (УНТ) проявляют армирующие свойства. Из-за своих наноразмерных особенностей УНТ взаимодействуют со сложной сеткой кальциево-силикатно-гидратного связующего (C – S – H), способствуют уменьшению пористости и уплотнению структуры цементного камня, увеличению сдвиговых усилий сцепления матрицы в зоне контакта. Таким образом, есть все предпосылки утверждать, что фибробетон с модифицированной углеродными нанотрубками цементной матрицей будет обладать требуемыми высокими прочностными характеристиками и трещиностойкостью за счет многоуровневого дисперсного армирования и эффективной работы фибры в наномодифицированной бетонной матрице. В данной статье представлены результаты испытаний образцов из цементного камня, бетона и фибробетона с углеродными нанотрубками. Наличие углеродных нанотрубок в цементном камне способствует увеличению прочности на сжатие на 11 %, на растяжение при изгибе на 20 %. Результаты испытаний образцов из дисперсно-армированного бетона, модифицированного наноуглеродным материалом, показали прирост прочности: на растяжение при изгибе – до 109 %, на растяжение при раскалывании – до 82 %, на осевое растяжение – до 78 %.

**Ключевые слова:** фибробетон, прочность на растяжение, углеродные нанотрубки

**Для цитирования:** Леонович, С. Н. Прочностные показатели фибробетона с углеродными наноматериалами / С. Н. Леонович, Е. А. Садовская // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 3. С. 219–224. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-219-224>

## Introduction

One of the main disadvantages of concrete, as the most commonly used building material in the world, is the fragility of destruction and low crack resistance. The study of fracture mechanisms is necessary to understand the fracture processes, which makes it possible to identify the parameters of the structure of materials that determine its crack resistance [1]. Crack resistance is an important factor in assessing and regulating the characteristics of concrete, as it helps to maintain the structural integrity of concrete and prevents its destruction. Concrete composites with low defects, dense and homogeneous, with a high degree of adhesion between the cement matrix and aggregates, as well as a high ratio between static tensile and compressive strengths and plasticity have the best crack resistance characteristics [2].

One of the promising ways to increase crack resistance is the introduction of various dispersed fibers. Dispersed fibers, evenly distributed throughout the entire volume of the material, create a spatial framework and contribute to the inhibition of developing cracks under the action of destructive forces.

The expediency of using fiber is due to the following factors: the properties of dispersed reinforced concrete can be similar to the properties of concrete with twice the amount of reinforcement, but at the same time be cheaper; fiber reinforce-

ment allows you to strengthen the corners of structures and adjust the thickness of the element in a larger range, which allows the use of fiber concrete in non-standard structures.

Replacement of cement with various materials, such as fly ash [3, 4], microsilicon [5, 6] cannot improve the microstructure of the cement matrix at the nanoscale, reducing internal defects (pores, cracks). Modern research in nanotechnology focuses on controlling matter at the nanoscale level, which makes it possible to create materials with new properties [7]. Examples of advanced nanomaterials used in the construction industry to improve the properties of building materials include calcium nanocarbonate (nano-CaCO<sub>3</sub>), nanosilicon (nano-SiO<sub>2</sub>) and aluminum oxide nanoparticles (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). One of the most frequent nanomaterials of the new generation is nanocarbon. Due to the high aspect ratio, flexibility, high strength and rigidity, carbon nanotubes (CNTs) exhibit reinforcing properties – they fill nanopores and connect grains of calcium hydrates (nanoarming) [8]. Due to their nanoscale features, CNTs interact with a complex network of calcium-silicate-hydrate binder (C–S–H), contribute to a decrease in porosity and compaction of the cement stone structure, increase the shear forces of matrix adhesion in the contact zone [9]. Thus, there are all prerequisites to assert that fiber concrete with a cement matrix modified with carbon nanotubes will have the required high crack resistance characteristics due to

multilevel dispersed reinforcement [10–13] and the efficient operation of fiber in a nanomodified concrete matrix.

**Laboratory tests**

The following materials were used in the studies presented in this article: portland cement, sand with fineness modulus 1.8–2.0, granite crushed stone with a fraction of 5–10 mm and 5–20 mm, carbon nanotubes (CNTs) – the average diameter of tubes and fibers is 10–40 nm, the average length of tubes and fibers is 0.01–20.0 microns, CP-WBK superplasticizer (SP) in the form of an aqueous solution – polycarboxylate copolymer 39–41 %.

The results of compression and tensile tests [14, 15] for bending cement stone (W/C = 0.21) with carbon nanotubes (0.0004 %) dispersed in a superplasticizer [16] showed an increase in com-

pressive strength by 11 % and bending strength by 20 % (Fig. 1).

Tests on samples of coarse-grained concrete (cement – 445 kg, sand – 820 kg, crushed stone 5–20 – 1035 kg, additive – 0.8 %, W/C = 0.29) the optimal amount of uniformly dispersed CNTs in the superplasticizer in the area of low concentrations equal to 0.00075 % of the cement mass was determined (Fig. 2).

Various types of fibers of domestic production were considered as dispersed reinforcement of the macro level (Fig. 3). Determination of the optimal amount of each type of fiber was carried out by analyzing the results of tensile strength tests and the workability parameter of the resulting fiber mixture (Fig. 4). It was found that the recommended optimal amount of fiber FSC-0.9-50 is 0.75–1.00 % by volume of the mixture, fiber FSA-1.0-60 is 1.0–1.5 %, fiber FPS-0.6-40 is 0.4–0.6 %.

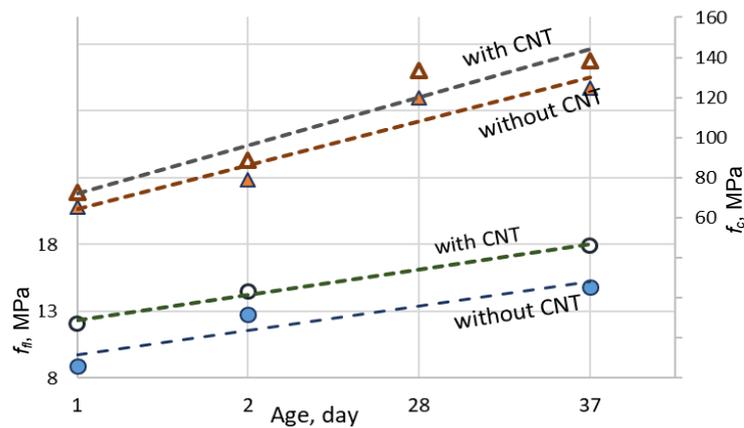


Fig. 1. Kinetics of strength gain of cement stone without CNT and with CNT

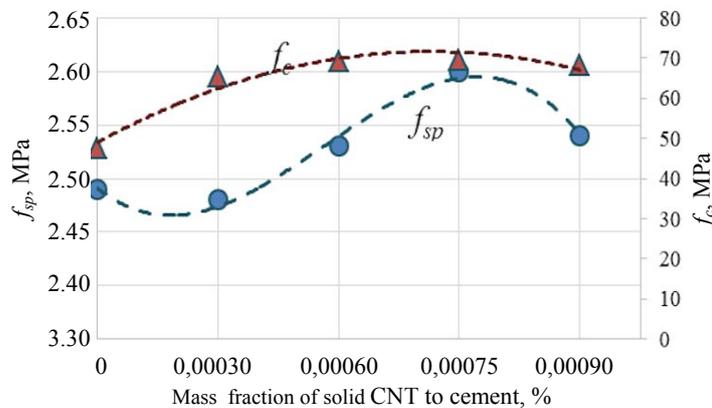


Fig. 2. Strength indicators of nanomodified CNT concrete



Fig. 3. Fiber

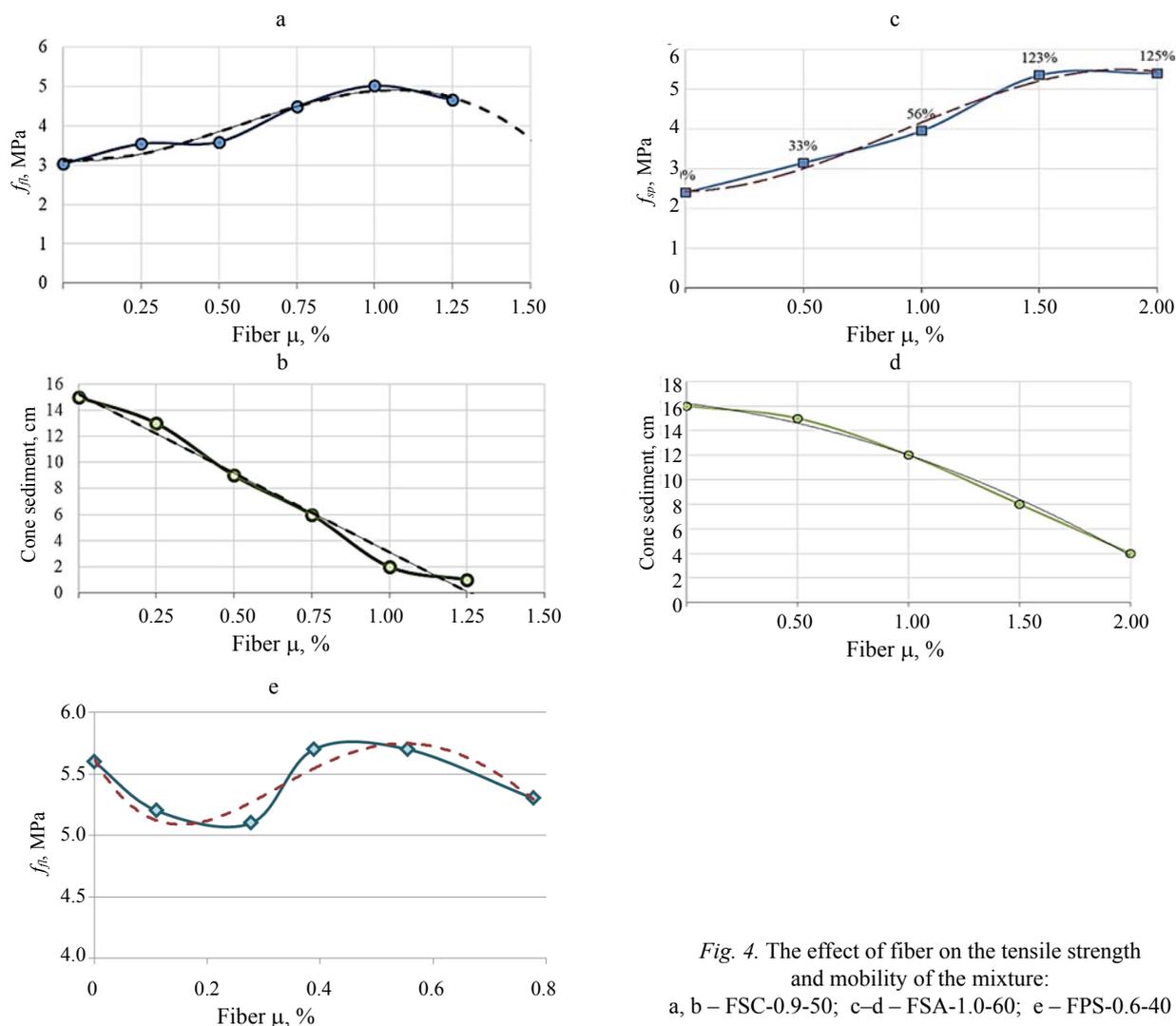


Fig. 4. The effect of fiber on the tensile strength and mobility of the mixture: a, b – FSC-0.9-50; c–d – FSA-1.0-60; e – FPS-0.6-40

In order to create a dispersed reinforced concrete composite with the required crack resistance parameters based on the nanocrete compositions already used in the construction of the Belarusian NPP, while maintaining the required quality parameters to the original ones: compressive strength, water resistance, frost resistance, workability of the mixture (Table 1). Fiber was added to the resulting nanomodified concrete mixtures (concrete ma-

trices): FSC-0.9-50 in an amount of 80 kg (F1), FSA-1.0-60 in an amount of 80 kg (F2), FPS-0.6-40 in an amount of 3.5 kg (F3).

From the obtained fiber-concrete compositions with a nanomodified concrete matrix, test samples were made: cubes with an edge of 100 mm, prisms of 100·100·400 mm, prisms of 70·70·280 mm. The resulting cube samples were tested for compressive strength. The test results are shown in Fig. 5.

Table 1

Nanomodified concrete compositions (nanocrete matrices)

Designation of the composition	Cement, kg	Crushed stone Fr. 5–20, kg	Crushed stone Fr. 5–10, kg	Sand, kg	Chemical additive with CNT (% by weight of binder)	Solid carbon, % by weight of cement	W/C
A	400	1020	–	820	3.2 (0.8)	0.00060	0,40
B	445	1035	–	820	2.22 (0.5)	0.00038	0,40
C	460	–	880	950	3.22 (0.7)	0.00038	0,40
D	485*	–	825	800	4.65 (0.7)	0.00060	0,44

\* Additionally included 40 kg of expanding sulfoaluminate additive (ESAA) according to STB 2092–2010 and 45 kg of condensed silica (MCS-85) according to TU 5743-048-02495332.

Analysis of the results shows that the introduction of fiber reinforcement into the concrete matrix with CNT does not contribute to a significant increase in compressive strength. The maximum increase is observed in the compositions of B-F1 – 22 %, A-F1 – 17 %, B-F2 – 12 %, D-F2 – 10 %.

Samples-prisms of 100·100·400 mm were tested for tension during bending according to a four-point loading scheme. The half-prisms obtained after the tests were tested for tension during splitting [17, 18]. The test results are shown in Fig. 6.

The analysis of the obtained results shows that the increase in tensile strength during bending is

observed in all cases of fiber reinforcement. The highest value in the compositions of A-F2 is 109 %, A-F1 is 104 %, A-F3 is 81 %, B-F2 is 48 %, B-F1 is 38 %, B-F1 is 59 %, B-F2 is 55 % [17]. An increase in tensile strength during splitting is observed in samples reinforced with metal fiber: F1 – 24–82 %, F2 – 35–70 %.

According to the obtained test results of the samples-70·70·280 mm breeze for axial tension (Fig. 7), the greatest increase in strength is observed in the composition with a concrete matrix with the highest strength value: D-F1, D-F2 – 77 %; D-F3 – 35 %.

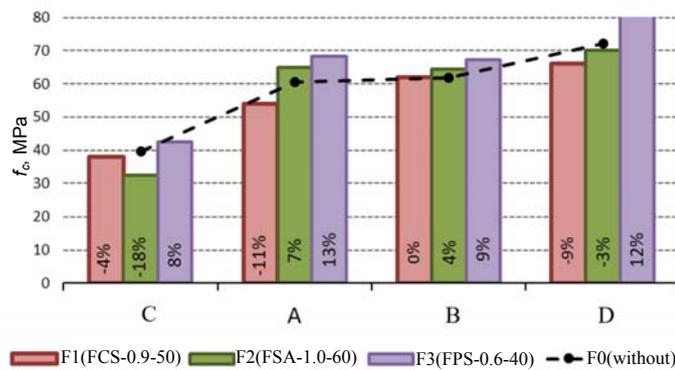


Fig. 5. Compression test results

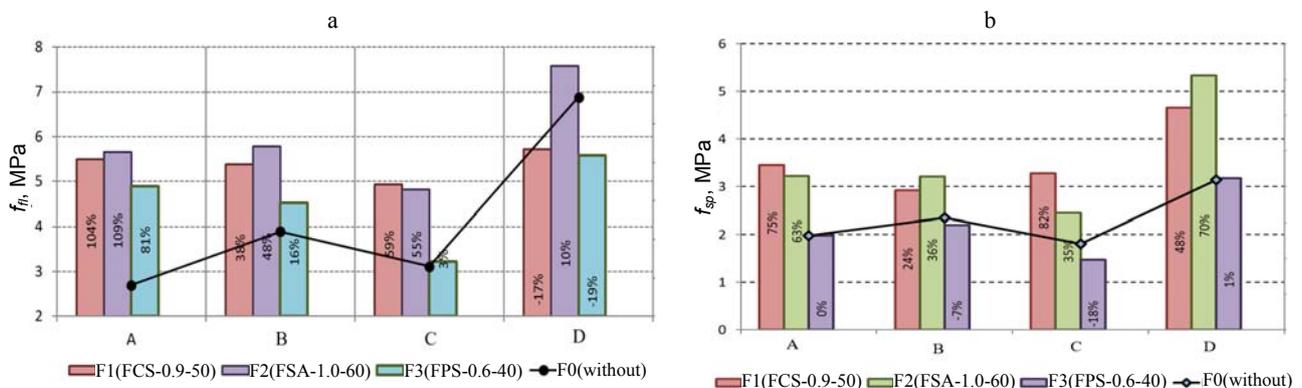


Fig. 6. Results of tensile tests: a – during bending; b – during splitting

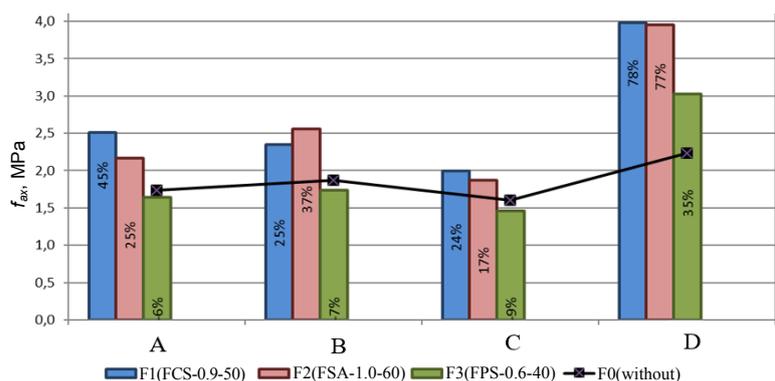


Fig. 7. Results of axial tension tests

## CONCLUSION

The use of dispersed reinforcement at the nanoscale is one of the methods for obtaining high-performance concretes that allow designing elements of buildings and structures with the required strength indicators and at the same time resistant to cracking and durable.

## REFERENCES

- Zaitsev Yu. V., Kovler K. A., Krasnovsky R. O., Krol I. S., Taher M. (1989) Crack Resistance of Concretes with Various Degrees of Heterogeneity of the Structure. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, (11), 25–27 (in Russian).
- Fedyuk R. S., Baranov A. V., Liseitsev Yu. L., Ginevskiy V., Baranov A., Liseitsev Yu. (2019) Increasing the Dynamic Strength of Fiber Concretes. *Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU = FEFU: School of Engineering Bulletin*, (2), 90–99 (in Russian). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-11>.
- Lam M.N.-T., Le D.-H., Jaritngam S. (2018) Compressive Strength and Durability Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Containing Electric Arc Furnace Slag Aggregate and Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 191, 912–922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.080>.
- Yener E., Hınıslıođlu S. (2011) The Effects of Silica Fume and Fly ash on the Scaling Resistance and Flexural Strength of Pavement Concretes. *Road Materials and Pavement Design*, 12 (1), 177–194. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.9690358>.
- Hassani A., Arjmandi M. (2010) Enhancement of Concrete Properties for Pavement Slabs Using Waste Metal Drillings and Silica Fume. *Waste Management & Research*, 28 (1), 56–63. <https://doi.org/10.1177/0734242X09104143>.
- Pranav S., Aggarwal S., Yang E.-H., Sarkar A.K., Singh A.P., Lahoti M. (2020) Alternative Materials for Wearing Course of Concrete Pavements: a Critical Review. *Construction and Building Materials*, 236, 117609 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117609>.
- Zhdanok, S. A., Leonovich S. N., Polonina E. N. (2022) Synergetic Effect of SiO<sub>2</sub> Nanoparticles and Carbon Nanotubes on Concrete Properties. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 66 (1), 109–112. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112> (in Russian).
- Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. (2019) Physicomechanical Characteristics of Concrete Modified by a Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92 (1), 12–18. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01902-0>.
- Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Sadvovskaya E. A., Budrevich N. A. (2021) Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 20 (3), 189–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194>.
- Leonovich S. N., Sadvovskaya E. A. (2022) Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 21 (5), 392–396. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-392-396>.
- Sadvovskaya E. A., Leonovich S. N. (2022) Optimization of Composition of Nanofiber Concrete in Terms of Fracture Toughness by Matrix Modification. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 21 (6), 499–503. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503> (in Russian).
- Sadvovskaya E. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Potapov V. V. (2022) Fracture Toughness of Nanofiber-Reinforced Concrete on Normal Separation and In-Plane Shear. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 95 (4), 945–952. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02551-6>.
- Sadvovskaya E. A., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Polonina E. N. (2020) Tensile Strength of Nanofibrous Concrete. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (4), 1015–1019. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02202-8>.
- Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. (2018) Strength Enhancement of Concrete with a Plasticizer on the Basis of Nano-Structured Carbon. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, (6), 67–72. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-760-6-67-72> (in Russian).
- Khroustalev B. M., Leonovich S. N., Yakovlev G. I., Polianskikh I. S., Lahayne O., Eberhardsteiner J., Skripkiunas G., Pudov I. A., Karpova E. A. (2017) Structural Modification of New Formations in Cement Matrix Using Carbon Nanotube Dispersions and Nanosilica. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 16 (2), 93–103. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-93-103>.
- Zhdanok, S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N. (2022) Influence of Polymer Superplasticizers on Various Types of Carbon Nanomaterials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 95 (1), 163–167. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02464-4>.
- Koleda E. A., Leonovich S. N., Zhdanok S. A. (2018) Results of Tensile Tests of nanofibre Concrete With Complex Fiber Reinforcement. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Materials. Constructions. Technologies»*, (2), 16–23 (in Russian).

Received: 07.08.2023

Accepted: 10.10.2023

Published online: 31.05.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-225-234>

УДК 697.24:725.85/.86:796.9

## Локальная система отопления для повышения комфорта зрителей на трибунах крытого ледового катка

Канд. техн. наук Д. Г. Ливанский<sup>1)</sup>

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

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

**Реферат.** В данной статье рассматриваются примеры применения локальных систем отопления, позволяющие улучшить условия комфорта зрителей, необходимые для полноценного восприятия мероприятий на крытом ледовом катке. Крытые ледовые катки являются популярными местами для проведения спортивных соревнований, концертов и других развлекательных мероприятий. Однако зрители на трибунах крытых ледовых катков во время хоккейного матча или выступления фигуристов часто сталкиваются с проблемой низкой температуры, которая, с одной стороны, необходима для поддержания высокого качества льда, с другой – может быть дискомфортной при длительном пребывании зрителей. В статье рассматриваются особенности процессов тепло- и массообмена на крытых ледовых катках, включающие конвективный и радиационный теплообмен с ледовой поверхностью и влияние конфигурации систем вентиляции на воздушную среду внутри арены. Исследование акцентирует внимание на необходимости математического моделирования для более глубокого понимания физических процессов, происходящих внутри крытых ледовых площадок. Для изучения работы локальных систем отопления используется численное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепло- и массообмена в воздушном пространстве крытого ледового катка. В статье рассмотрено несколько технических решений организации локальных систем отопления. Выделены преимущества и недостатки приведенных технических решений. Комплексный анализ работы локальных систем отопления на крытом ледовом катке является важным вкладом в понимание физических процессов и параметров, влияющих на микроклимат внутри крытых ледовых катков, а также может служить основой для оптимизации таких систем с целью обеспечения комфортных условий для зрителей.

**Ключевые слова:** крытый ледовый каток, теплообмен, локальная система отопления

**Для цитирования:** Ливанский, Д. Г. Локальная система отопления для повышения комфорта зрителей на трибунах крытого ледового катка / Д. Г. Ливанский // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 3. С. 225–234. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-225-234>

## Local Heating System to Improve Comfort of Spectators in the Stands of Indoor Ice Skating Rink

D. G. Livanskiy<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** This paper discusses examples of the use of local heating systems that improve the comfort conditions of spectators, necessary for a full-fledged perception of events at an indoor ice rink. Indoor ice rinks are popular venues for sporting events, concerts and other entertainment events. However, spectators in the stands of indoor ice rinks during a hockey match or a performance of figure skaters often face the problem of low temperature, which, on the one hand, is necessary to maintain high ice quality, but on the other hand, can be uncomfortable with prolonged stay of the audience. The paper examines the features of heat and mass transfer processes on indoor ice rinks, including convective and radiation heat exchange with

### Адрес для переписки

Ливанский Дмитрий Геннадьевич  
Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости, 67/18,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-30-13  
fes@bntu.by

### Address for correspondence

Livanskiy Dmitry G.  
Belarusian National Technical University  
67/18, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Тел.: +375 17 292-30-13  
fes@bntu.by

the ice surface and the influence of the configuration of ventilation systems on the air environment inside the arena. The study on the need for mathematical modeling for a deeper understanding of the physical processes occurring inside indoor ice rinks. To study the operation of local heating systems, a numerical solution of a system of differential equations is used that describes the processes of heat and mass transfer in the air space of an indoor ice rink. The paper discusses several technical solutions for the organization of local heating systems. The advantages and disadvantages of the above technical solutions are highlighted. A comprehensive analysis of the operation of local heating systems at an indoor ice rink is an important contribution to the understanding the physical processes and parameters that affect the microclimate inside indoor ice rinks, and can also serve as the basis for optimizing such systems in order to ensure comfortable conditions for spectators.

**Keywords:** ice rink, heat transfer, local heating system

**For citation:** Livanskiy D. G. (2024) Local Heating System to Increase the Comfort of Spectators in the Stands of the Indoor Ice Rink. *Science and Technique*. 23 (3), 225–234. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-225-234> (in Russian)

## Введение

Крытые ледовые катки являются популярными местами для проведения спортивных соревнований, концертов и других развлекательных мероприятий. Однако зрители на трибунах во время хоккейного матча или выступления фигуристов часто сталкиваются с проблемой низкой температуры, которая, с одной стороны, необходима для поддержания высокого качества льда, с другой – может быть дискомфортной при длительном пребывании зрителей. Это может снижать общий интерес и удовольствие от посещения спортивных мероприятий [1–4].

Улучшение условий нахождения на катке зрителей является важным вопросом для организаторов спортивных и развлекательных мероприятий, поскольку комфортные условия напрямую влияют на удовлетворенность зрителей и их желание посещать спортивные мероприятия в будущем.

Применение локальных систем отопления дает больше возможностей для создания комфортных условий для зрителей по сравнению с централизованными системами. Преимуществами таких систем являются:

- возможность осуществить более эффективный обогрев конкретных зон трибуны, где присутствуют зрители, минимизируя потерю теплоты в других зонах;

- обеспечение более гибкого контроля температуры в каждой зоне в зависимости от времени проведения мероприятия с учетом количества зрителей, находящихся на трибуне;

- снижение энергопотребления на обогрев;

- минимизация негативного воздействия теплого воздуха на качество ледовой поверхности.

Учитывая эти преимущества, разработка и внедрение локальных систем отопления могут

быть более эффективным решением для обеспечения комфорта зрителей на крытых ледовых катках.

В данной статье рассматриваются примеры применения локальных систем отопления, позволяющие улучшить условия комфорта зрителей, необходимые для полноценного восприятия мероприятий на крытом ледовом катке.

## Специфика процессов тепло- и массообмена на крытых ледовых катках

Процессы тепло- и массообмена внутри крытого ледового катка отличаются специфическими особенностями и сложностью. Так, на внешней границе ледовой площадки со значительной по площади ледовой пластиной происходит конвективный и радиационный теплообмен с окружающей лед воздушной средой и строительными конструкциями, а также конденсация водяных паров из воздуха. При заливке льда поверхность формируемой ледовой пластины становится источником влагопоступлений в воздушное пространство арены. На внутренних поверхностях ограждающих конструкций (стены, пол, потолок) формируются температуры в зависимости от внутренних и внешних тепловых воздействий, которые отличаются от температуры воздушной среды и ледовой пластины. Внутренние поверхности ограждающих конструкций участвуют в формировании гравитационных конвективных потоков, а также за счет радиационного теплообмена влияют на температуру поверхности ледовой пластины [1–10].

Системы вентиляции и кондиционирования воздуха внутри крытого ледового катка обеспечивают подачу подготовленного и удаление отработанного воздуха для создания и поддер-

жания требуемых параметров воздушной среды. Расположение во внутреннем пространстве ледового катка приточных и вытяжных диффузоров, т. е. источников и стоков воздушной среды, оказывает существенное воздействие на формирование неизотермических течений в воздушном пространстве арены и определяет перенос воздуха внутри катка. Тепловыделяющее оборудование на ледовых аренах – это осветительная арматура, нагретая внешняя поверхность которой оказывает влияние на температуру воздуха в верхней зоне за счет конвективного переноса воздухом, омываемым поверхности светильника, а также за счет радиационного теплообмена повышает температуру поверхности льда. Зрители и участники соревнований являются источниками теплоты и влаги.

Указанные особенности крытых ледовых катков обуславливают необходимость использования математического моделирования физических процессов тепло- и массообмена, протекающих внутри крытого катка, путем решения трехмерных дифференциальных уравнений переноса в элементарном выделенном объеме [4–8].

Перенос теплоты в элементарном выделенном объеме  $dx \cdot dy \cdot dz$  в основании ледового поля и в воздушном пространстве ледовой арены описывается уравнением [4–8]

$$\rho_i c_i \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{w} \nabla T \right) = \lambda_i \nabla^2 T + q_v. \quad (1)$$

Здесь  $\rho_i$ ,  $c_i$ ,  $\lambda_i$  – соответственно объемная масса ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), удельная теплоемкость ( $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ) и коэффициент теплопроводности ( $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ )  $i$ -го слоя элементарного объема расчетного массива при температуре  $T$ , К;  $\tau$  – время, с;  $\vec{w}$  – вектор скорости прохода воздуха через элементарный объем (в воздушном пространстве арены),  $\text{м}/\text{с}$ ;  $q_v$  – мощность объемного источника (стока) теплоты,  $\text{Вт}/(\text{м}^3)$ .

Транспортный перенос теплоты в воздухе в направлении вектора  $w$  значительно больше, чем перенос теплопроводностью,  $w c_{\rho_b} \gg \lambda_b$  ( $0,2 \cdot 1005 \cdot 1,2 \gg 0,025$ ). Поэтому применительно к воздушному пространству арены, ввиду  $\vec{w} \nabla T \gg \lambda_b \nabla^2 T$ , в уравнении (1) допускается принять  $\lambda_b \nabla^2 T = 0$ . При  $\vec{w} = 0$  выражение (1) является нелинейным уравнением теплопроводности с распределенными теплофизическими коэффициентами и источником теплоты.

Перенос водяных паров в элементарном объеме  $dx \cdot dy \cdot dz$  воздушного пространства ледовой арены описывается уравнением [4–8]

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \vec{w} \nabla \omega = D_{\text{вп}} \nabla^2 \omega + j_v, \quad (2)$$

где  $\omega$  – концентрация водяных паров в объеме  $dx \cdot dy \cdot dz$  воздушного пространства арены,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $D_{\text{вп}}$  – коэффициент диффузии водяных паров в воздухе,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $j_v$  – мощность источника (стока) водяных паров,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ .

Применительно к исследуемым процессам основными источниками водяных паров, поступающих в воздушное пространство арены, являются зрители и участники соревнований. На поверхности ледового поля осуществляется конденсация водяных паров (сток) из воздушного пространства арены, а при заливке или восстановлении льда смоченная поверхность является источником поступления влаги.

Диффузия водяных паров и фильтрация капельной влаги в основании ледового поля, ввиду незначительного их влияния на температурный режим, не учитываются.

По аналогии с уравнением (1) установлено, что  $\vec{w} \nabla \omega \gg D_{\text{вп}} \nabla^2 \omega$ . Поэтому при решении уравнения (2) для условий искусственной конвекции допускается принимать  $D_{\text{вп}} \nabla^2 \omega = 0$ .

Уравнение движения [4–8]

$$\rho_b \frac{d\vec{w}}{d\tau} = \rho_b \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{w}. \quad (3)$$

Уравнение сохранения массы (неразрывности) в элементарном объеме  $dx \cdot dy \cdot dz$  воздушного пространства при  $j_v = 0$

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial \tau} + \nabla (\rho_b \vec{w}) = 0, \quad (4)$$

где  $\rho_b$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g$  – гравитационное ускорение,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $p$  – давление, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па/с.

Уравнение радиационного теплового потока [4–8]

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (I(r, s) s) + (a + \sigma_s) I(r, s) = \\ = a \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \Phi(s \cdot s') d\Omega', \end{aligned} \quad (5)$$

где  $r$  – радиус-вектор;  $s$  – вектор направления излучения;  $s'$  – то же рассеяния;  $a$  – коэффициент поглощения;  $\sigma_s$  – то же рассеяния;

$I$  – полная интенсивность излучения, зависящая от радиус-вектора и направления излучения;  $\Phi$  – фазовая функция, определяющая диаграмму рассеяния;  $\Omega'$  – телесный угол;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)).

Граничные условия для системы кондиционирования воздуха определяются ее конфигурацией, температурой, скоростью и влажностью (или массовой концентрацией) водяного пара на выходе из воздухораспределителей [4–8]:

$$T|_{\text{прит}} = t_{\text{пр}}; \quad w|_{\text{прит}} = w_{\text{пр}}; \quad d|_{\text{прит}} = d_{\text{пр}}. \quad (6)$$

Осветительные приборы как источник теплоты учитываются на основании данных о температуре и площади поверхности приборов освещения и конфигурации осветительной системы [4–8]:

$$T|_{\text{свет}} = t_{\text{свет}}; \quad A|_{\text{свет}} = A_{\text{свет}}. \quad (7)$$

Тепло- и влагопоступления от зрителей и участников соревнований учитываются как равномерно распределенные источники теплоты и влаги по поверхности мест их нахождения:  $q_{\text{л}}$ ,  $m_{\text{л}}$ .

### Описание крытого ледового катка

Текущие условия микроклимата на крытых ледовых катках определяются качеством воздуха внутри помещения. Для комфортного нахождения зрителей на трибунах крытых ледовых катков необходимо учитывать следующие параметры микроклимата [1–4]:

– температуру воздуха. Оптимальная температура для комфорта зрителей обычно находится в диапазоне от 18 до 22 °С, а для спортсменов на ледовой площадке от 6 до 12 °С. Однако, учитывая холод, исходящий от ледовой арены, может потребоваться немного более высокая температура в зоне трибун, что требует более детального анализа;

– влажность воздуха. Идеальный уровень влажности для комфорта человека составляет от 30 до 50 %. Максимальная относительная влажность воздуха внутри ледового катка допускается не более 70 % и должна контролироваться, чтобы предотвратить нежелательную конденсацию и поддерживать качество льда;

– скорость воздушного потока должна быть достаточной для обеспечения хорошего воздухообмена, но не слишком высокой, чтобы избежать сквозняков, которые могут усилить ощущение холода;

– концентрацию углекислого газа. Основным источником возможных проблем с качеством воздуха в закрытых ледовых аренах является выделение углекислого газа при дыхании людей.

Схематическое изображение рассматриваемого крытого ледового катка с трибунами на 700 зрителей изображено на рис. 1.

Геометрия здания была создана на основе архитектурных и строительных чертежей. Ледовая арена имеет размеры в плане 68×39 м. Высота помещения ледовой арены до низа покрытия составляет 13 м. В центре ледовой арены расположена хоккейная площадка международного стандарта 56×26 м. Площадь ледового поля составляет 1392 м<sup>2</sup>. Вокруг ледовой площадки располагаются зрительские трибуны: вдоль длинной стороны катка 285 мест и дополнительные 415 мест вокруг ледовой площадки. Данная ледовая арена оборудуется дополнительными местами для зрителей.

Общая мощность приборов освещения составляет 16 кВт.

Помещение ледового катка обслуживают две системы вентиляции и кондиционирования воздуха: первая – для зоны ледовой площадки; вторая – для трибун, расположенных вдоль длинной стороны катка. Над ледовой площадкой располагаются восемь воздухораспределителей типа BURE-500, расположенных на высоте 10 м, с помощью которых подается предварительно подготовленный приточный воздух в количестве 25000 м<sup>3</sup>/ч (расход воздуха на один воздухораспределитель 3125 м<sup>3</sup>/ч), температура приточного воздуха 10 °С. Отработанный воздух от зоны ледовой площадки удаляется с помощью 30 воздухоприемников типа ССН-825×225, расположенных на высоте 12 м по периметру стен. Трибуны вдоль длинной стороны ледового катка обслуживает вентиляционная установка с помощью 13 воздухораспределителей типа SAP-Z-400, расположенных на высоте 10 м, посредством которых подается предварительно подготовленный приточный воздух в количестве 10000 м<sup>3</sup>/ч (расход воздуха на 1 воздухораспределитель 770 м<sup>3</sup>/ч, температура 22 °С, расход наружного

воздуха в приточной смеси  $5700 \text{ м}^3/\text{ч}$ , в том числе на одного зрителя  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

В результате проведенного математического моделирования получены распределения температуры, влажности, скорости движения воздуха и концентрации  $\text{CO}_2$ . На рис. 2 представлены полученные результаты распределения температуры воздуха в зоне расположения зрителей на трибунах.

Как видно из рис. 2 средняя температура воздуха в зоне расположения зрителей на трибунах составляет около  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Такие низкие температуры воздуха на трибунах вызваны влиянием близкого к ней расположения ледовой площадки.

На рис. 3 представлено распределение температуры во внутреннем пространстве ледовой арены.

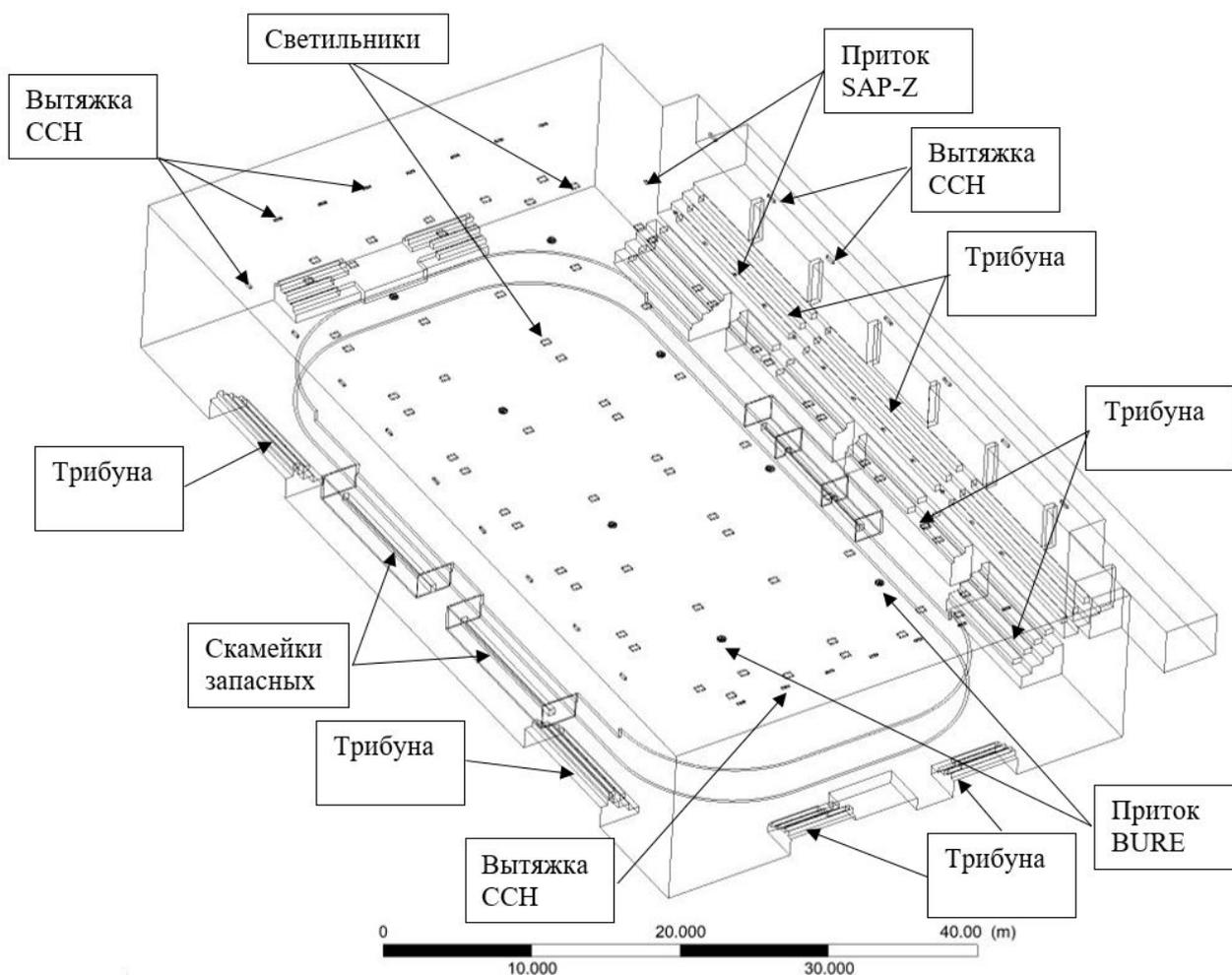


Рис. 1. Расчетная схема крытого ледового катка с трибунами для 700 зрителей:

обозначения: Приток BURE – расположение приточных двухпоточных воздухораспределителей для подачи подготовленного воздуха для спортсменов в зону ледовой площадки; Приток SAP-Z – то же приточных сопловых воздухораспределителей для подачи подготовленного воздуха для зрителей в зону трибун; Вытяжка ССН – то же вытяжных жалюзийных воздухораспределителей для удаления отработанного воздуха из помещения ледового катка; Светильники – то же светильников системы освещения ледового катка; Трибуна – то же мест для зрителей на ледовом катке; Скамейка запасных – расположение запасных игроков во время хоккейного матча

Fig. 1. Design scheme of indoor ice skating rink with stands for 700 spectators:

designations: BURE inflow – location of supply two-stream air distributors for supplying prepared air for athletes to the ice rink area; SAP-Z inflow - location of supply nozzle air distributors for supplying prepared air for spectators to stands area; CCP (SSN) exhaust – location of exhaust louvered air distributors for removing exhaust air from ice rink premises; Lamps – location of luminaires for ice rink lighting system; Grandstand – location of seats for spectators at ice skating rink; Bench - location of substitute players during hockey match

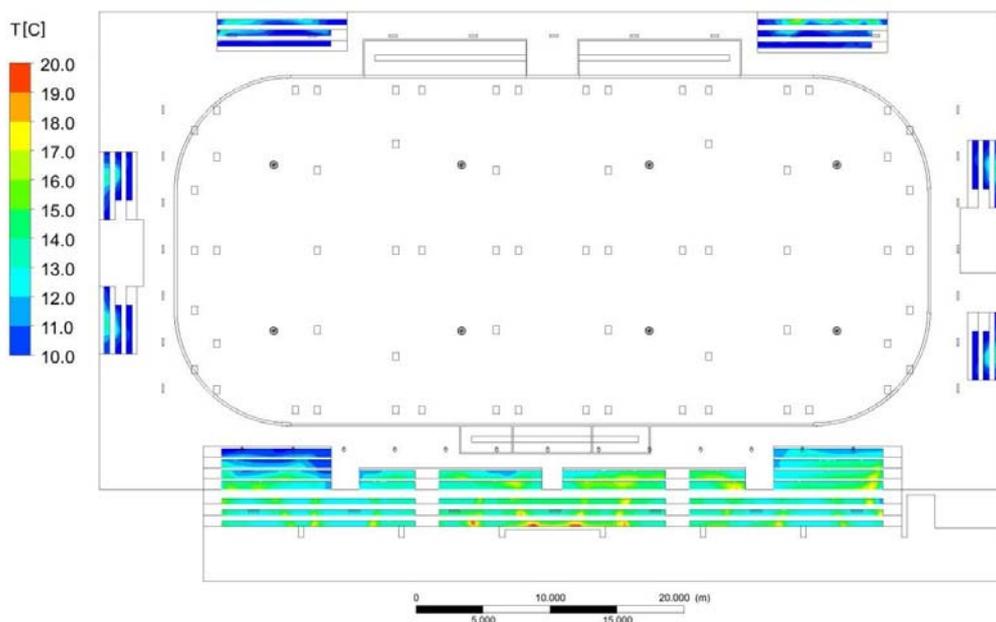


Рис. 2. Распределение температуры в зоне расположения зрителей на трибунах  
 Fig. 2. Temperature distribution in the stands of spectators area

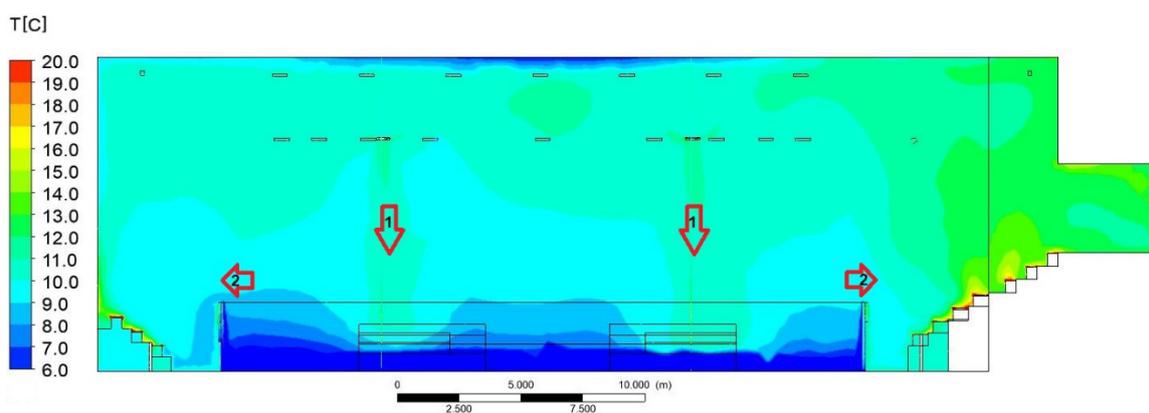


Рис. 3. Распределение температуры во внутреннем пространстве ледовой арены:  
 стрелки: 1 – приточный воздух, подаваемый в зону ледовой площадки через воздухораспределители типа BURE;  
 2 – холодный воздух, перетекаемый с ледовой площадки в зону расположения трибун со зрителями

Fig. 3. Temperature distribution in the internal space of the ice arena:  
 arrows: 1 – supply air supplied to the ice rink area through BURE type air distributors;  
 2 – cold air flowing from ice rink into area of stands with spectators

На рис. 3 (стрелки 1 и 2) хорошо видно, что приточный воздух (стрелка 1) от воздухораспределителей, расположенных на высоте 10 м над поверхностью льда, подаваемый в зону ледовой площадки, выдавливает холодный объем воздуха с ледовой площадки через огражденные борта за ее пределы (стрелка 2). Холодный воздух, переливаясь через ограждение ледовой площадки, попадает на первые несколько рядов трибун со зрителями. В результате этого зрители на нижних рядах находятся в зоне более

низких температур по сравнению с более высоко расположенными рядами.

На нижней части рис. 2 и справа на рис. 3 видно, что с увеличением высоты расположения ряда трибуны наблюдается постепенное возрастание температуры воздуха до 16 °С. Температура воздуха на нижних рядах трибун составляет около 9–10 °С и повышается до 16 °С на верхних рядах. Данное увеличение температуры вызвано подогревом воздуха за счет тепловыделений от зрителей и воздействи-

ем струй подогретого приточного воздуха, подаваемого в зону зрителей. Таким образом холодный воздух на первых нескольких рядах трибун вызывает наибольший дискомфорт у зрителей.

Рассмотрим вариант технического решения повышения температуры воздуха на первых рядах трибун за счет подачи равномерно распределенного подогретого приточного воздуха под сиденья для зрителей.

На рис. 4 представлен фрагмент плана с одной из трибун для зрителей и разрез 1–1 с размещением приточных воздухоораспределителей и вытяжных решеток. В качестве приточного воздухоораспределителя предусматривается воздуховод равномерной раздачи. Объем приточного воздуха определен из расчета подачи свежего воздуха в количестве  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$  на одного

зрителя. Температура подаваемого воздуха принята  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Удаление отработанного воздуха предусматривается с верхней зоны над трибуной с помощью жалюзийных решеток, расположенных на высоте 9 м над уровнем пола. Воздух удаляется в объеме, равном подаче воздуха на данную трибуну.

На рис. 5 приведено распределение температуры по рассматриваемому разрезу 1–1 трибуны для зрителей. Как видно из рис. 5, можно отметить некоторое локальное улучшение температурной обстановки на трибуне, однако количества воздуха в принятом объеме недостаточно для того, чтобы повысить температуру для зрителей на всей трибуне и оградить зрителей от поступления потоков холодного воздуха с ледовой площадки.

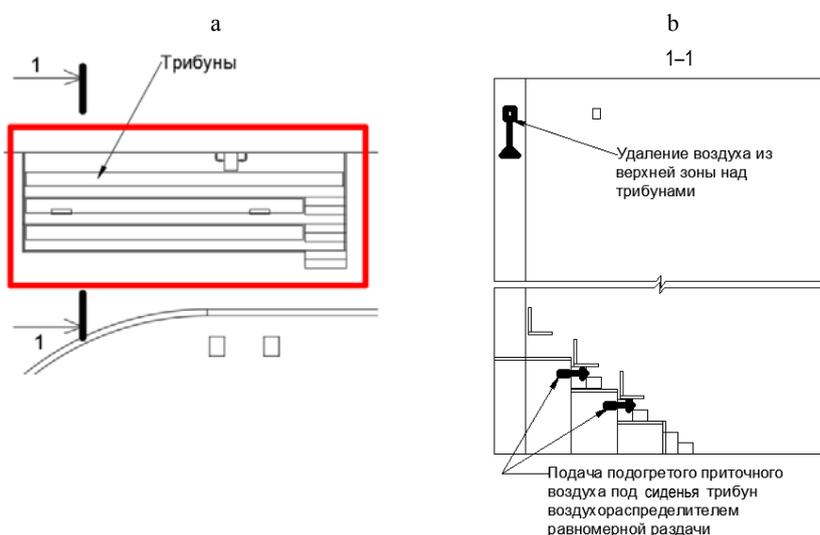


Рис. 4. Фрагмент плана (а) с размещением трибуны для зрителей и разрез 1–1 (б) с размещением приточных воздухоораспределителей и вытяжных решеток (техническое решение 1)

Fig. 4. Fragment of plan (a) with placement of grandstand for spectators and section 1–1 (b) with placement of supply air distributors and exhaust grilles (technical solution 1)

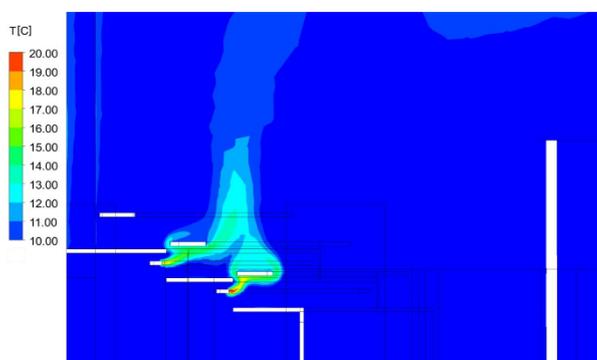


Рис. 5. Распределение температуры по разрезу 1–1 трибуны для зрителей

Fig. 5. Temperature distribution in section 1–1 of spectator stands

На рис. 6 представлен разрез 1–1 со следующим вариантом технического решения повышения температуры воздуха на первых рядах трибуны с установкой компактной отопительно-вентиляционной установки для подогрева воздуха на трибуне. Предполагается, что отопительно-вентиляционная установка забирает холодный воздух с нижней зоны перед трибуной, тем самым снижая негативное влияние на зрителей потоков холодного воздуха, поступающих с ледовой площадки. Подогретый воздух после отопительно-вентиляционной установки с помощью щелевого воздухораспределителя равномерно подается перед трибуной вертикально вверх для создания барьера – воздушно-тепловой завесы. Ожидается, что такая воздушная завеса обеспечит температурное разделение трибуны со зрителями от ледовой площадки.

Как видно из рис. 6б, можно выделить уменьшение объема холодного воздуха в пространстве между первым рядом трибуны и оградительным бортом ледовой площадки (уменьшение области синего цвета, т. е. воздуха с температурой ниже 10 °С). Также стоит отметить факт повышения температуры на первом ряду трибуны и появления очерченной температурной границы между зоной трибуны и пространством перед трибуной со значительно более низкой температурой.

Работа размещенной компактной отопительно-вентиляционной установки в техническом решении 2 позволила уменьшить негатив-

ное влияние на зрителей потоков холодного воздуха, поступающих с ледовой площадки, и как результат, повысить температуру воздуха на трибуне. Однако такое техническое решение создает недостаточное увеличение температуры воздуха на втором и третьем рядах трибуны.

Также стоит отметить повышение температуры не только на трибунах, но и в общем объеме воздушного пространства ледового катка.

Подача подогретого воздуха отопительно-вентиляционной установкой перед трибуной для создания воздушно-тепловой завесы по краям трибун не ограждает всех зрителей от потоков холодного воздуха. Усиление потока воздуха по краям трибун приводит к увеличению требуемой производительности и мощности отопительно-вентиляционной установки.

На рис. 7 представлено техническое решение 3 с размещением компактной отопительно-вентиляционной установки, забирающей воздух перед трибунами и выполняющей функцию обогрева подтрибунного пространства. В данном решении вместо устройства воздушно-тепловой завесы применено светопрозрачное ограждение трибун спереди высотой 600 мм и по бокам высотой 1100 мм.

На рис. 7б видно, что обогрев подтрибунного пространства позволил существенно увеличить температуру воздуха на рядах трибуны и, в свою очередь, также значительно повысить температуру воздуха в общем объеме воздушного пространства ледового катка.

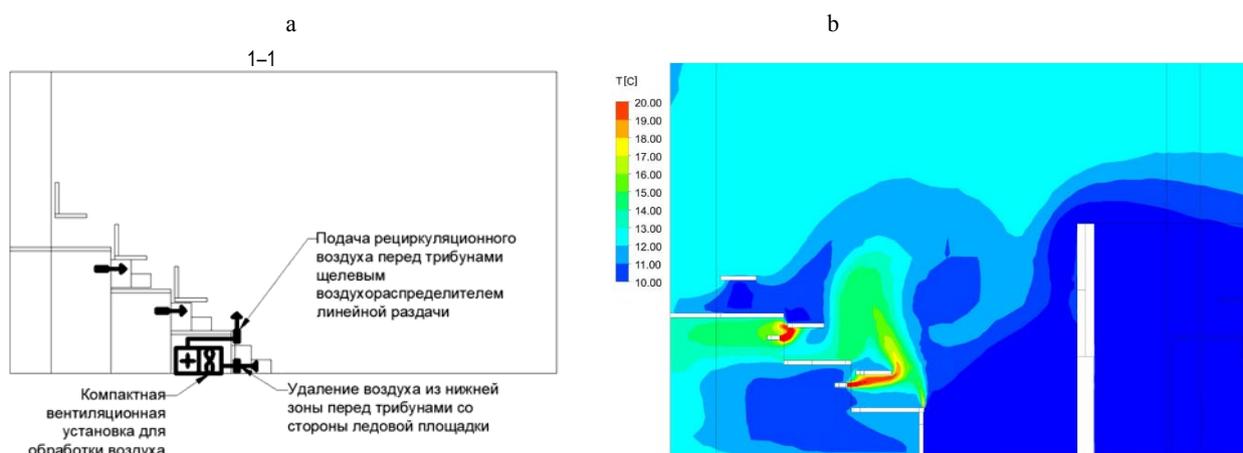


Рис. 6. Разрез 1–1 (а) с размещением компактной отопительно-вентиляционной установки и распределение температуры по разрезу 1–1 (б) трибуны для зрителей (техническое решение 2)

Fig. 6. Section 1–1 (a) with placement of compact heating and ventilation unit and temperature distribution along section 1–1 (b) of spectator stands (technical solution 2)

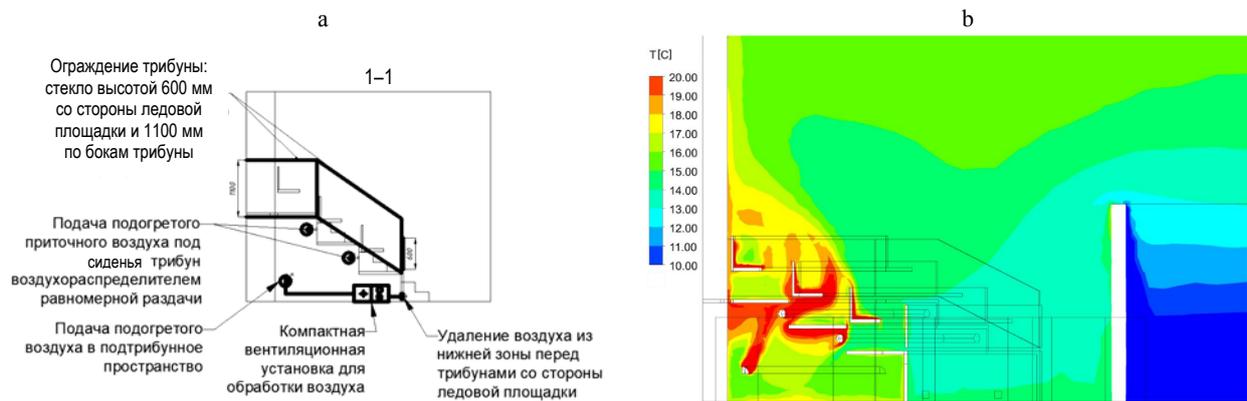


Рис. 7. Разрез 1–1 (а) с размещением компактной отопительно-вентиляционной установки и распределение температуры по разрезу 1–1 (б) трибуны для зрителей (техническое решение 3).

Fig. 7. Section 1–1 (a) with placement of compact heating and ventilation unit and temperature distribution along section 1–1 (b) of spectator stands (technical solution 3)

## ВЫВОДЫ

1. Локальные системы отопления трибун для зрителей имеют хорошие перспективы для развития и внедрения на крытых ледовых катках.

2. Важным аспектом применения локальных систем отопления является минимизация возможного негативного эффекта повышения температуры воздуха на качество льда.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство ИИХФ по ледовым аренам [Электронный ресурс] / International Ice Hockey Federation. 2016. Режим доступа: [https://blob.iihf.com/iihf-media/iihfmvc/media/downloads/projects/ice%20rink%20guide/iihf\\_ice\\_rink\\_guide\\_rus\\_web.pdf](https://blob.iihf.com/iihf-media/iihfmvc/media/downloads/projects/ice%20rink%20guide/iihf_ice_rink_guide_rus_web.pdf). Дата доступа: 21.08.2023.
2. Рекомендации по проектированию инженерного оборудования искусственных катков (хладотехническая часть) / Ленингр. зон. науч.-исслед. и проект. ин-т типового и эксперим. проектирования жилых и обществ. зданий «ЛенЗНИИЭП» Госгражданстроя. Л.: [б. и.], 1972. 100 с.
3. Ice rinks // ASHRAE handbook. Refrigeration / Amer. Soc. of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Eng. Atlanta, 2002. Chap. 34. P. 34.1–34.11.
4. Рекомендации по проектированию конструкций основания ледовых площадок многофункциональных сооружений: Р 03.02.178-2019: [для проектировщиков, инженерно-технических работников и студентов технических вузов] / Министерство архитектуры и строительства, Министерство спорта и туризма Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Многофункциональный культурно-спортивный комплекс «Минск-арена» / сост.: П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский. Минск: БНТУ, 2019. 81 с.
5. Ливанский, Д. Г. Температурно-влажностный режим ледовых площадок многофункциональных сооружений [Электронный ресурс]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Д. Г. Ливанский; Белорусский национальный технический университет. Минск, 2020. Режим доступа: [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/77756/Temperaturno\\_vlazhnostnyj\\_rezhim\\_ledovyh\\_ploshchadok\\_mnogofunkcionalnyh\\_sooruzhenij.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/77756/Temperaturno_vlazhnostnyj_rezhim_ledovyh_ploshchadok_mnogofunkcionalnyh_sooruzhenij.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
6. Дячек, П. И. Температурная неоднородность поверхности ледового поля крытых искусственных катков / П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 2. С. 41–47.
7. Ливанский, Д. Г. Анализ методов расчета и процессов формирования температурного режима основания ледового поля / Д. Г. Ливанский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 6. С. 74–80.
8. Ливанский, Д. Г. Физико-математическая модель процессов формирования ледового поля / Д. Г. Ливанский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 1. С. 69–79.
9. Livanski, D. G. Temperature Mode of an Ice Covering of Sports Construction / D. G. Livanski // Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources: proc. of the VII Minsk Intern. Seminar, Minsk, 8–11 Sept. 2008 / NIS Sci. Assoc. “Heat Pipes” [et al.]; редкол.: Л. Л. Васильев, А. С. Журавлев, Л. В. Драгун. Minsk, 2008. P. 412–418.
10. Ливанский, Д. Г. Математическое моделирование температурного режима ледовых арен / Д. Г. Ливанский // 20-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки 2018» [труды научного конгресса]: в 3 т. / Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т; отв. ред. А. А. Лапшин. Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. Т. 3. С. 420–423

Поступила 10.08.2023

Подписана в печать 11.10.2023

Опубликована онлайн 31.05.2024

## REFERENCES

1. International Ice Hockey Federation (2016) *IIHF Ice Arena Guide*. Available at: [https://blob.iihf.com/iihf-media/iihfmvc/media/downloads/projects/ice%20rink%20guide/iihf\\_ice\\_rink\\_guide\\_rus\\_web.pdf](https://blob.iihf.com/iihf-media/iihfmvc/media/downloads/projects/ice%20rink%20guide/iihf_ice_rink_guide_rus_web.pdf) (accessed 21 August 2023) (in Russian).
2. Leningrad Zonal Research and Design Institute of Typical and Experimental Design of Residential and Public Buildings of State Committee for Civil Engineering and Architecture (1972). *Recommendations for the Design of Engineering Equipment for Artificial Skating Rinks (Refrigeration Part)*. Leningrad. 100 (in Russian).
3. Amer. Soc. of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Eng (2002) Chap. 34. Ice rinks. *ASHRAE Handbook. Refrigeration*. Atlanta, 34.1–34.11.
4. P 03.02.178-2019. *Recommendations for the Design of Basestructures for Ice Rinks of Multifunctional Structures*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2019. 81 (in Russian).
5. Livanskiy D. G. (2020) *Temperature and Humidity Conditions of Ice Rinks of Multifunctional Structures. Dissertation of Candidate of Technical Sciences*. Minsk, 2020. Available at: [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/77756/Temperaturno\\_vlazhnostnyj\\_rezhim\\_ledovyh\\_ploshchadok\\_mnogofunkcionalnyh\\_sooruzhenij.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/77756/Temperaturno_vlazhnostnyj_rezhim_ledovyh_ploshchadok_mnogofunkcionalnyh_sooruzhenij.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
6. Diachek P. I., Livanskiy D. G. (2010) Temperature Non-Uniformity of Ice-Field Surface at Covered Skating-Rinks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 41–47 (in Russian).
7. Livanskiy D. G. (2010) Analysis of Methods for Calculation and Processes Pertaining to Formation of Temperature Regime of Ice Field Foundation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 74–80 (in Russian).
8. Livanskiy D. G. (2011) Physical and Mathematical Model of Ice-Field Formation Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 69–79 (in Russian).
9. Livanskiy D. G. (2008) Temperature Mode of an Ice Covering of Sports Construction. Vasiliev L. L., Zhuravliov A. S., Dragun L. V. (eds). *Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources: Proceedings of the 7<sup>th</sup> Minsk International Seminar, Minsk, September 8–11, 2008*. Minsk, 412–418 (in Russian).
10. Livanskiy D. G. (2018) Mathematical modeling of the Temperature Regime of Ice Arenas. *20-i Mezhdunarodnyi Nauchno-Promyshlennyi Forum «Velikie Reki'2018»: Trudy Nauchnogo Kongressa. T. 3 [20<sup>th</sup> International Scientific and Industrial Forum “Velikie Reki [Great Rivers]-2018”]: Proceedings of Scientific Congress. Vol. 3*. Nizhny Novgorod, NNGASU Publishing House, 420–423 (in Russian).

Received: 10.08.2023

Accepted: 11.10.2023

Published online: 31.05.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241>

УДК 625.851

## Оптимизация зернового состава асфальтобетонных смесей с целью обеспечения максимальной плотности

Науч. сотруд. А. А. Афанасенко<sup>1)</sup>

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

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

**Реферат.** Аспект, затронутый в рамках данной научной статьи, имеет важное значение в области дорожного строительства, нацеленной не только на достижение высокой прочности и устойчивости асфальтобетона, но и на обеспечение оптимальных характеристик его структуры. Основные принципы оптимизации зернового состава базируются на параметрах размеров и формы частиц каменного заполнителя, входящего в состав асфальтобетонных смесей. Глубокий анализ зернового состава способствует достижению оптимального баланса между крупными и мелкими фракциями, что, в свою очередь, обеспечивает устойчивость и долговечность асфальтобетонного покрытия. Максимальная плотность асфальтобетонной смеси играет ключевую роль, влияя на ее физико-механические свойства и способность противостоять агрессивному воздействию окружающей среды и транспортным нагрузкам. Кроме того, плотность смеси существенно влияет на ее стойкость к статическим и динамическим нагрузкам и деформациям, что важно для обеспечения безопасности дорожного движения. Статья представляет собой аналитический обзор основных принципов и методологии определения зернового состава мелкозернистых асфальтобетонных смесей с крупностью зерен до 10 мм с целью достижения их максимальной плотности. Рассмотрены отечественные и зарубежные методики оптимизации параметров проектирования смесей. На основании учета идеальных математических кривых зернового состава установлена основная закономерность для мелкозернистого асфальтобетона, которая имеет схожие параметры с математической кривой Фуллера. Понимание и практическое применение принципов построения зернового состава асфальтобетонных смесей максимальной плотности не только повышает качество дорожного строительства, но и способствует более эффективному использованию ресурсов, обеспечивая устойчивость и долговечность дорожного покрытия. Это приводит к снижению затрат на обслуживание и ремонт дорог, что является важным аспектом в контексте экономической эффективности инфраструктурных проектов. Таким образом, улучшение методов исследования и контроля зернового состава асфальтобетона имеет важное значение для устойчивого развития дорожного строительства.

**Ключевые слова:** асфальтобетон, зерновой состав асфальтобетонной смеси, плотные смеси, кривая гранулометрического состава, коэффициент сбега, диаметр зерен, кривая Фуллера, экспериментальный метод подбора, остаточная пористость, Supergrape

**Для цитирования:** Афанасенко, А. А. Оптимизация зернового состава асфальтобетонных смесей с целью обеспечения максимальной плотности / А. А. Афанасенко // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 3. С. 235–241. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241>

## Optimization of Aggregate Composition of Asphalt Concrete Mixtures to Ensure Maximum Density

A. A. Afanasenka<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** The aspect raised in this scientific paper is of great importance in the field of road construction, aimed not only at achieving high strength and stability of asphalt concrete, but also at ensuring optimal characteristics of its structure.

### Адрес для переписки

Афанасенко Алексей Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 29 338-78-40  
CNIIDSGM@bntu.by

### Address for correspondence

Afanasenka Aliaksei A.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 338-78-40  
CNIIDSGM@bntu.by

The main principles for the optimization of the grain composition are based on the parameters of the size and shape of the stone aggregate particles included in the composition of asphalt concrete mixtures. An in-depth analysis of the grain composition helps to achieve an optimal balance between coarse and fine fractions, which in turn ensures the stability and durability of the asphalt concrete pavement. The maximum density of an asphalt concrete mixture plays a key role, influencing its physical and mechanical properties and ability to withstand aggressive environmental influences and traffic loads. In addition, the density of the mixture significantly affects its resistance to static and dynamic loads and deformations, which is important for ensuring road safety. The paper provides an analytical review of the basic principles and methodology for determining the grain composition of fine-grained asphaltic concrete mixtures with grain sizes up to 10 mm in order to achieve their maximum density. Both domestic and foreign methods for optimizing mixture design parameters are considered. Based on the consideration of ideal mathematical curves the grain composition, the main regularity for fine-grained asphalt concrete has been established, which has similar parameters to the mathematical Fourier curve. Understanding and practical application of the principles of constructing the grain composition of asphalt concrete mixtures of maximum density not only improves the quality of road construction, but also contributes to a more efficient use of resources, ensuring the stability and durability of the pavement. This leads to a reduction in road maintenance and repair costs, which is an important aspect in the context of the economic efficiency of infrastructure projects. Thus, improving the methods for investigating and controlling the grain composition of asphalt concrete is important for the sustainable development of road construction.

**Keywords:** asphalt concrete, grain composition of asphalt concrete mixture, dense mixtures, grain size distribution curve, runaway coefficient, grain diameter, Fuller curve, experimental selection method, residual porosity, Superpave

**For citation:** Afanasenka A. A. (2024) Optimization of Aggregate Composition of Asphalt Concrete Mixtures to Ensure Maximum Density. *Science and Technique*. 23 (3), 235–241. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241> (in Russian)

## Введение

Асфальтобетон представляет собой высокотехнологичный строительный материал, который является одним из наиболее распространенных и широко используемых в устройстве покрытия дорог и улиц населенных пунктов. Этот материал обладает уникальными свойствами, делающими его предпочтительным выбором для создания прочных, долговечных и высококачественных дорожных одежд. Важным аспектом его популярности является не только его прочность, но и возможность адаптации к различным климатическим условиям и транспортным нагрузкам как главного и неотъемлемого компонента дорожного строительства.

В современных подходах к созданию качественных дорожных покрытий подбор состава асфальтобетонных смесей является основополагающей частью процесса производства долговечной и устойчивой дорожной инфраструктуры. Этот процесс приобретает особую актуальность в условиях исключительных требований к высоким стандартам качества. Существует обширный спектр специально разработанных методов и методик для подбора составов асфальтобетонных смесей. Каждый из этих подходов адаптирован к конкретным условиям, включая погодные-климатические факторы и транспортные особенности, что делает их более эффективными в определенных контекстах использования.

Специалисты в области дорожного строительства активно исследуют и разрабатывают все более адаптивные методы подбора составов

асфальтобетонных смесей с целью повышения производительности. От химического анализа компонентов до оптимизации фракционного состава эти подходы направлены на обеспечение оптимальных свойств асфальтобетона для различных условий эксплуатации. Особое внимание уделяется методам, основанным на принципах простоты и понятности. Такие методы приобретают особую значимость в контексте их использования на производственных площадках, где требуются оперативность и эффективность в процессе производства асфальтобетонных смесей и максимальная скорость при корректировке состава.

## Подбор состава плотных смесей

Подбор состава асфальтобетона — это комплексный инженерный процесс, направленный на определение наилучшего соотношения и качества основных компонентов асфальтобетонной смеси, таких как битум, минеральный порошок, песок, щебень и/или гравий. Исключительная важность подбора состава обусловлена не только требованиями к прочности и долговечности асфальтобетона, но и его адаптацией к конкретным условиям эксплуатации, что обеспечивает оптимальное функционирование его на разных типах дорог и в разнообразных климатических условиях.

Проектирование состава асфальтобетонных смесей в странах постсоветского пространства, не исключая и Республику Беларусь [1], осуществляется по методике, основанной на под-

боре кривой гранулометрического состава, входящей в предельные кривые плотных смесей. Основной принцип этого метода, разработанного в СоюзДорНИИ [2], заключается в учете зависимости прочности и других свойств асфальтобетона от плотности минеральной смеси при оптимальном количестве битума. Оптимальное количество битума обычно определяется на основе результатов экспериментов, учитывающих наивысшую прочность образцов и другие показатели их качества, соответствующие требованиям стандарта.

Основные принципы метода опираются на теоретические и экспериментальные исследования профессора В. В. Охотина [3] и профессора Н. Н. Иванова [4]. Считается, что составы с достаточной плотностью включают в себя минеральные смеси, где диаметр частиц ( $d$ ) уменьшается в два раза, а масса соответствующих фракций уменьшается в пределах 0,65–0,9 раза. Величина, определяющая, во сколько раз количество последующей фракции меньше количества предыдущей, называется коэффициентом сбега ( $k$ ).

Таким образом, отношение диаметров частиц ( $d$ ) можно представить в следующем виде:

$$d_2 = \frac{d_1}{2}; d_3 = \frac{d_1}{2^2}; \dots; d_n = \frac{d_1}{2^{n-1}}, \quad (1)$$

где  $d_1$  – размер наибольшего отверстия сита, мм;  $d_n$  – то же наименьшего отверстия сита, мм;  $d_2, d_3, \dots$  – то же промежуточных отверстий сит, мм.

Отношение по массе последующих фракций к предыдущей (коэффициент сбега  $k$ ) можно определить по следующей зависимости:

$$k = \frac{x_2}{x_1} = \frac{x_3}{x_2} = \dots = \frac{x_n}{x_{n-1}}, \quad (2)$$

где  $x_1$  – содержание наибольшей фракции зерен в смеси, %;  $x_n$  – то же наименьшей фракции зерен в смеси, %;  $x_2, x_3, \dots$  – то же промежуточных фракции зерен в смеси, %.

Исследования Н. Н. Иванова [4, 5] показали, что максимальная плотность асфальтобетонной смеси достигается при коэффициенте сбега от 0,80 до 0,81, однако, учитывая трудности, связанные с точным подбором такого состава, предлагалось расширить диапазон значений коэффициента сбега от 0,65 до 0,90. Этот диапазон обеспечил баланс между желаемой высо-

кой плотностью смеси и реальными проблемными моментами, с которыми можно столкнуться при подборе состава. Принятый коэффициент сбега в указанном интервале предоставил инженерам и специалистам оптимальные возможности для адаптации состава асфальтобетона к конкретным условиям производства и требованиям, предъявляемым к дорожному асфальтобетонному покрытию.

Расчетные количества каждой фракции отображаются на графике, где по оси ординат указывают полный проход через сито в процентах, а по оси абсцисс – логарифмы размеров зерен или отверстий сит. На рис. 1 представлен пример кривых гранулометрического состава минеральной части асфальтобетона при различных коэффициентах сбега.

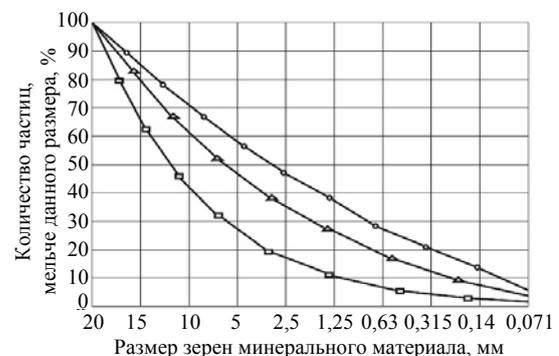


Рис. 1. Гранулометрический состав минеральной части асфальтобетонных смесей с различными коэффициентами сбега

Fig. 1. Granulometric composition of mineral fraction of asphaltic concrete mixes with different flow coefficients

Кривые с коэффициентом сбега менее 0,7 соответствуют смесям с низким содержанием минерального порошка или без него, в то время как кривые с коэффициентом сбега более 0,9 отражают смеси с высоким содержанием минерального порошка. Выбор коэффициента сбега зависит от предпочтительного соотношения минерального порошка и щебня в смеси, а также от требуемой плотности минеральной части смеси, стремясь получить реальную кривую смеси, которая находится между предельными кривыми плотных смесей.

Исходя из теоретических данных определения оптимальной кривой плотных смесей, с учетом зависимостей (1) и (2) построим аналитические кривые зернового состава мелкозернистой асфальтобетонной смеси с максимальным размером зерен 10 мм (рис. 2).

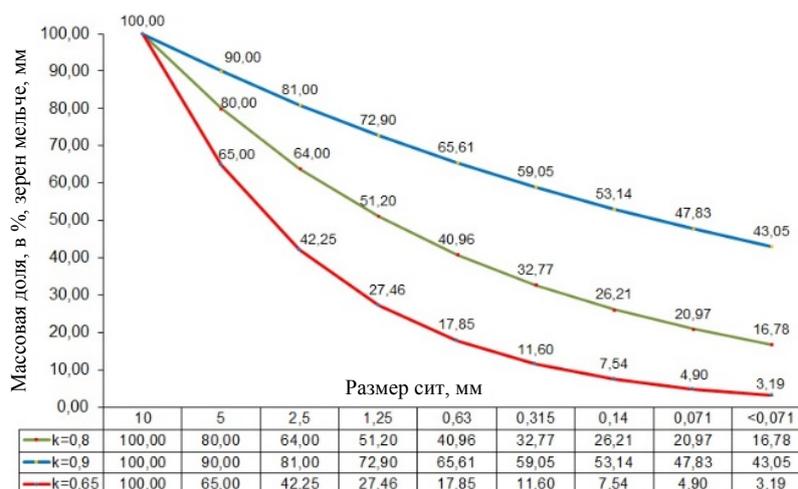


Рис. 2. Аналитические кривые зернового состава мелкозернистой асфальтобетонной смеси с различными значениями коэффициента сбега

Fig. 2. Analytical curves of grain composition of fine-grained asphalt concrete mixtures with different values of flow coefficient

Таким образом, любая мелкозернистая асфальтобетонная смесь с размером зерен не крупнее 10 мм, соответствующая действующим стандартам, должна входить в построенные граничные аналитические кривые, а с целью обеспечения максимальной плотности и, как следствие, необходимости минимального количества вяжущего стремится приблизиться к построенной аналитической кривой с коэффициентом сбега 0,8.

### Оптимизация состава по критерию плотности

До недавнего времени оптимизацию состава смесей для создания верхних слоев дорожных покрытий ассоциировали с увеличением плотности асфальтобетона. В результате этого в области дорожного строительства можно выделить три метода, используемых при оптимизации плотности и формировании зерновых составов минимальной пустотности, исходя из зернового состава крупного заполнителя [6]:

- экспериментальный (немецкий) метод подбора плотных смесей, заключающийся в постепенном заполнении одного материала другим;
- метод кривых, основанный на подборе зернового состава, приближающегося к заранее определенным математически «идеальным» кривым плотных смесей;
- американский метод стандартных смесей, основанный на апробированных составах смесей из конкретных материалов.

Сущность экспериментального метода подбора плотных смесей заключается в постепенном заполнении пор одного материала с более крупными зернами другим более мелким минеральным материалом. Практически подбор смеси осуществляется в следующем порядке. К 100 весовым частям первого материала добавляют последовательно 10, 20, 30 и т. д. весовых частей второго, определяя после их перемешивания и уплотнения среднюю плотность и выбирая смесь с минимальным количеством пустот в уплотненном состоянии. Если необходимо составить смесь из трех компонентов, то к плотной смеси из двух материалов добавляют постепенно увеличивающимися порциями третий материал и также выбирают наиболее плотную смесь.

Принцип последовательного заполнения пустот применен в методике проектирования оптимальных составов дорожных асфальтобетонов, в которых используются щебень, гравий и песок с любой гранулометрией [7]. По данным авторов статьи, на основе дедуктивного анализа испытаний агрегатных смесей с различным содержанием компонентов различной крупности установлена сложная математическая зависимость для определения «пустоты в минеральном агрегате» (Void in Mineral Aggregate, VMA). Он отражает объем пор (пустот) в минеральном заполнителе и определяет долю пространства, которое может быть заполнено вяжущим. VMA, наряду с содержанием

воздуха, является важным показателем в критериях проектирования смесей различных типов асфальтобетона. Авторы статьи постарались учесть все факторы, влияющие на создание плотной асфальтобетонной смеси с учетом остаточной пористости и количества вовлеченного воздуха, здесь также вводятся дополнительные коэффициенты, учитывающие размер и форму минеральных частиц и их поверхностную пористость. Лабораторные испытания контрольных смесей показали хорошую сходимость с результатами теоретических расчетов.

Второй метод оптимизации подбора зернового состава асфальтобетона основывается на подборе плотных минеральных смесей, зерновой состав которых приближается к идеальным кривым Фуллера, Графа, Германа, Болоея, Тэлбот–Ричарда, Китт–Пеффа и других авторов [8]. Эти кривые в большинстве случаев представляются степенными зависимостями требуемого содержания зерен в смеси от их крупности. Например, кривая гранулометрического состава плотной смеси, по Фуллеру, задается следующим уравнением:

$$P = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где  $P$  – процент агрегата, проходящего через сито, %;  $d$  – диаметр отверстий сита, мм;  $D$  – максимальный диаметр частиц в агрегате, мм.

Это уравнение используется для определения оптимального гранулометрического состава асфальтобетонной смеси, чтобы обеспечить наиболее плотную упаковку частиц минерального заполнителя. Графическое изображение кривой Фуллера для случая проектирования мелкозернистой асфальтобетонной смеси с максимальным размером зерен 10 мм представлено на рис. 3.

В практике проектирования асфальтобетонных смесей в рамках метода Supergrave [9, 10], внимание акцентируется на регулировании зернового состава с целью оптимизации плотности. В данном контексте, также принято использование гранулометрических кривых плотных смесей Фуллера, которые соответствуют степенной зависимости с показателем степени 0,45 и представляют собой инструмент для определения максимальной плотности асфальтобетона. Так, кривая гранулометрического состава в данном случае задается следующим уравнением:

$$P = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,45}. \quad (4)$$

Этот подход позволяет настраивать структуру смеси с учетом особенностей размеров и распределения минеральных фракций, что, в свою очередь, способствует достижению оптимальных плотностей асфальтобетона.

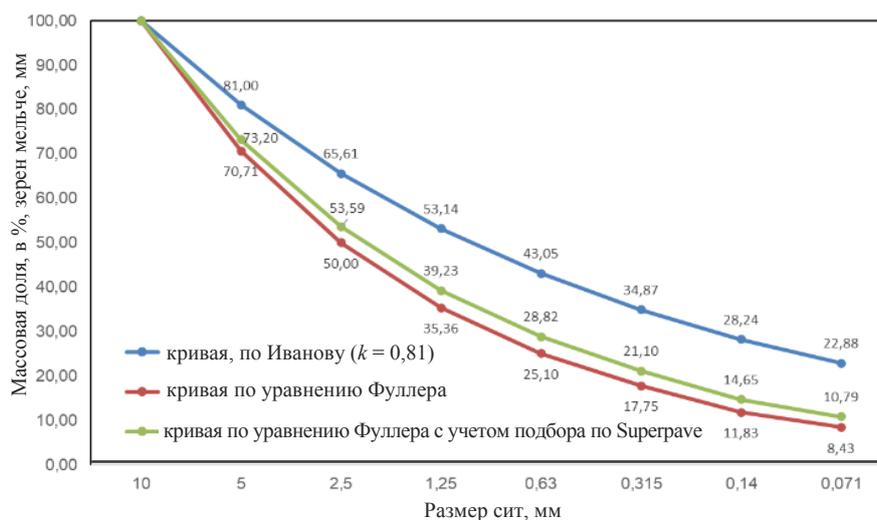


Рис. 3. Аналитические кривые зернового состава мелкозернистой асфальтобетонной смеси оптимальной плотности

Fig. 3. Analytical grading curves of fine-grained asphalt concrete mixture with optimum density

Построим аналитические кривые зернового состава плотных смесей по зависимостям (3) и (4) для случая мелкозернистого асфальтобетона с максимальным размером зерен 10 мм (рис. 3). Таким образом математические кривые плотных смесей, построенные по уравнению Фуллера (3), и кривая с учетом корректировки в методике проектирования состава асфальтобетона по методу Supergrape (4), а также кривая зернового состава по критерию плотности Н. Н. Иванова, определенная по формулам (1), (2), визуально имеют одинаковый характер наклона, что позволяет делать выводы об их взаимосвязи.

Проведя несложные расчеты методами математической статистики, осуществим анализ зависимости между кривыми с целью выявления и количественного описания связи между переменными. В качестве метода для оценки была выбрана линейная регрессия, которая позволяет оценить линейную зависимость между двумя переменными, далее проверим нашу гипотезу.

В линейной регрессии предполагается, что зависимость между переменными может быть описана линейной функцией

$$y = mx + b, \quad (5)$$

где  $y$  – зависимая переменная;  $x$  – независимая переменная;  $m$  – коэффициент наклона;  $b$  – свободный член.

Для нахождения коэффициентов  $m$  и  $b$ , которые наилучшим образом соответствуют данным, воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК). Этот метод минимизирует сумму квадратов разностей между значениями зависимых и независимых переменных. Это делается с целью найти наилучшую линейную аппроксимацию данных. Формулу для вычисления коэффициента наклона  $m$  можно описать по зависимости (6), а коэффициент  $b$  можно определить по выражению:

$$m = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}, \quad (6)$$

$$b = \frac{\sum y - m(\sum x)}{n}, \quad (7)$$

где  $n$  – количество наблюдений.

Таким образом, зависимость между данными, полученными по формуле Фуллера (3), и данными, полученными по формулам (1), (2) (представлены на рис. 4), может быть описана следующим выражением:

$$y = 0,8374x + 20,1877, \quad (8)$$

где  $y$  – данные, полученные по формулам (1), (2), учитывающие критерий плотности для мелкозернистой асфальтобетонной смеси, по Н. Н. Иванову, с коэффициентом сбега  $k = 0,81$ ;  $x$  – то же, полученные по формулам (3) для мелкозернистой асфальтобетонной смеси по критерию идеальной математической кривой плотной смеси Фуллера.

Коэффициент корреляции рассчитывался с использованием критерия наименьших квадратов. Формула для коэффициента корреляции ( $r$ ) в случае линейной регрессии с использованием метода наименьших квадратов выглядит следующим образом:

$$r = \frac{(\sum x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (9)$$

Коэффициент корреляции в нашем случае  $r = 0,9933$ , что свидетельствует о сильной положительной линейной зависимости между переменными. Значение  $r$ , близкое к 1, указывает на то, что изменения в переменной  $x$  сильно связаны с изменениями в переменной  $y$ . Таким образом, наше предположение о линейной зависимости между данными с высокой долей вероятности является правильным.

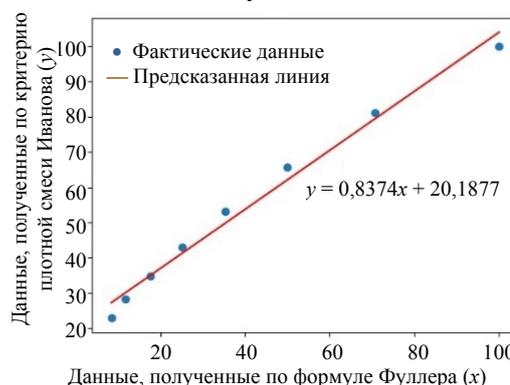


Рис. 4. Зависимость между данными для определения максимальной плотности мелкозернистой смеси по разным методикам

Fig. 4. Dependency between data for determining maximum density of fine-grained mixture using different methods

С помощью сравнительных расчетов было определено, что кривая Фуллера, наиболее близкая к кривой плотной смеси с коэффициентом сбега, равным 0,73, а оптимальная кривая плотной асфальтобетонной смеси по критерию профессора Н. Н. Иванова для случая мелкозернистого асфальтобетона с максимальным размером зерен 10 мм может быть описана идеальной кривой Фуллера со степенью 0,3 и определена по зависимости

$$P = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,3} \quad (10)$$

## ВЫВОДЫ

1. В ходе анализа различных методик подбора зернового состава для мелкозернистых асфальтобетонных смесей с максимальным размером зерен 10 мм установлена математическая зависимость, позволяющая произвести его оптимизацию по критерию максимальной плотности.

2. Крупность и геометрические параметры минерального наполнителя представляют собой важные переменные в управлении структурой асфальтобетона и могут оказать значительное влияние на его физические и механические свойства. Учет их в исследованиях обеспечит более глубокое понимание взаимосвязи между гранулометрическим составом и характеристиками асфальтобетонных смесей, что, в свою очередь, будет содействовать разработке эффективных методов оптимизации такого важного для дорожной отрасли строительного материала, как асфальтобетон.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Леонович, И. И. Испытание дорожно-строительных материалов: учеб. пособие для вузов / И. И. Леонович, В. А. Стрижевский, К. Ф. Шумчик. Минск: Вышэйш. шк., 1991. 224 с.
2. Пособие по строительству асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов (к СНиП 3.06.03–85 и СНиП 3.06.06–88). М.: Союздорнии, 1991. 176 с.
3. Охотин, В. В. Лабораторные опыты по составлению дорожных грунтовых смесей по принципу наименьшей пористости / В. В. Охотин. М.: Транспечать, 1929. 32 с.
4. Иванов, Н. Н. Строительство автомобильных дорог. Ч. 2: Постройка дорожных одежд: учеб. пособие / Н. Н. Иванов. М.: Автотрансиздат, 1957. 304 с.
5. Иванов, Н. Н. Подбор наиболее плотной смеси каменных агрегатов или грунтов для дорожных одежд /

- Н. Н. Иванов // Дорога и автомобиль, 1930. № 4–5. С. 23–28.
6. Проектирование состава асфальтобетона и методы его испытаний: обзорная информация / Федеральное государственное унитарное предприятие «Информационный центр по автомобильным дорогам». М.: Информавтодор, 2005. Вып. 6: Автомобильные дороги и мосты. 48 с.
7. Inoue, T. Rational Design Method of hot Mix Asphalt Based on Calculated VMA / T. Inoue, Y. Gunji, H. Akagi // Eurasphalt & Eurobitume Congress. Vienna, 2004. P. 1956–1966.
8. Горельшев, Н. В. Асфальтобетон и другие битумо-минеральные материалы: учеб. пособие / Н. В. Горельшев. М.: Можайск-Терра, 1995. 175 с.
9. Superpave Mix Design. Superpave Series No 2 (SP-02) / Asphalt Institute. Lexington, KY, 2001. 117 p.
10. The Superpave Mix Design System: Anatomy of a Research Program / National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, 2012. 172 p.

Поступила 20.02.2024

Подписана в печать 23.04.2024

Опубликована онлайн 31.05.2024

## REFERENCES

1. Leonovich I. I., Strizhevsky V. A., Shumchik K. F. (1991) *Testing of Road Building Materials*. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 224 (in Russian).
2. *Manual for the Construction of Asphalt Concrete Pavements and Foundations of Highways and Airfields (to SNiP 3.06.03–85 and SNiP 3.06.06–88)*. Moscow, Soyuzdornii Publ., 1991. 176 (in Russian).
3. Okhotin V. V. (1929) *Laboratory Experiments on the Preparation of Road Soil Mixtures Based on the Principle of Least Porosity*. Moscow, Transpechat Publ. 32 (in Russian).
4. Ivanov N. N. (1957) *Construction of Highways. Part 2: Construction of Road Pavements*. Moscow, Avtotransizdat Publ. 304 (in Russian).
5. Ivanov N. N. (1930) Selection of the Most Dense Mixture of Stone Aggregates or Soils for Road Pavements. *Doroga i Avtomobil* [Road and Car], (4–5), 23–28 (in Russian).
6. Federal State Unitary Enterprise “Information Center on Highways” (2005) *Design of Asphalt Concrete Composition and Testing Methods. Is. 6: Highways and Bridges*. Moscow, Informavtodor Publ. 48 (in Russian).
7. Inoue T., Gunji Y., Akagi H. (2004) Rational Design Method of hot Mix Asphalt Based on Calculated VMA. *Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Vienna, 1956–1966.
8. Gorelyshev N. V. (1995) *Asphalt Concrete and Other Bitumen-Mineral Materials*. Moscow, Mozhaysk-Terra Publ. 175 (in Russian).
9. Asphalt Institute (2001) *Superpave Mix Design. Superpave Series No 2 (SP-02)*. Lexington, KY. 117.
10. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2012) *The Superpave Mix Design System: Anatomy of a Research Program*. Washington. 172.

Received: 20.02.2024

Accepted: 23.04.2024

Published online: 31.05.2024

## Планирование производственных мощностей предприятий индустриального домостроения в условиях изменения спроса на продукцию

Магистр техн. наук В. Ю. Гуринович<sup>1)</sup>, Д. А. Поздняков<sup>2)</sup>,  
докт. техн. наук П. И. Юхневский<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Государственное предприятие «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»

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

**Реферат.** Основным критерием технико-экономического обоснования эффективности производства предприятий индустриального домостроения, анализа внутрипроизводственных резервов и оптимального объема выпуска продукции является показатель производственной мощности. С учетом этого исследование различных факторов, оказывающих влияние на показатели производственной мощности, является важной задачей. В статье представлены результаты исследований влияния этажности и набора блок-секций в комплектации жилых домов в индустриальном исполнении на изменение соотношения типов изделий в номенклатуре производственной программы предприятий. Установлены колебания показателей соотношения типов изделий при строительстве разнотипных домов. Основываясь на полученных результатах, построена зависимость производственной мощности предприятий от колебаний показателей соотношения типов изделий. Определено, что основной причиной выявленных фактов снижения производственных мощностей является неравномерная загрузка технологических линий при колебаниях показателей соотношения типов изделий в номенклатуре производственных программ предприятий индустриального домостроения. С учетом известных фактов зависимости производственной мощности от показателей бетоноемкости блок-секций домов представлены результаты сравнения степени влияния на производственную мощность бетоноемкости и соотношения основных типов изделий в номенклатуре производственных программ предприятий. Установлено, что ключевое влияние на показатели производственных мощностей оказывает изменение соотношения типов изделий. На основании проведенных исследований определены оптимальные резервы производственных мощностей при высокой доле разнотипных домов в производственных программах предприятий. С учетом установленных показателей снижения производственных мощностей оптимальное их резервирование находится в пределах 20–25 % от проектной мощности предприятия, что должно служить ориентиром при планировании функционирования системы управления производством в условиях изменения спроса на продукцию.

**Ключевые слова:** производственная мощность, производство сборных железобетонных конструкций, номенклатура изделий, индустриальное строительство, предприятия индустриального домостроения, производственная программа, эффективность производства, организация производства

**Для цитирования:** Гуринович, В. Ю. Планирование производственных мощностей предприятий индустриального домостроения в условиях изменения спроса на продукцию / В. Ю. Гуринович, Д. А. Поздняков, П. И. Юхневский // *Наука и техника*. 2023. Т. 23, № 3. С. 242–250. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-242-250>

## Planning of Production Capacities of Precast Construction Plants under Conditions of Changes in Demand for Products

Gurinovich V. Yu.<sup>1)</sup>, Pozdnyakov D. A.<sup>2)</sup>, Yukhnevskiy P. I.<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Institute of Housing – NIPTIS named after S. Ataev (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The main criterion for a feasibility study of the production efficiency of precast construction plants, analysis of internal production reserves and optimal production volume is the production capacity indicator. Thus, the study of various

### 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

Factors influencing the production capacity indicators is an important task. The results of research of the influence of the number of storeys and the set of block sections in the configuration of industrial residential buildings on changes in the ratio of product types in the range of the production programme of plants are presented in the paper. Fluctuations in the ratio of product types during the construction of different types of houses have been established. Based on the obtained results, the dependence of the production capacity plants on fluctuations in the ratio of product types has been constructed. It has been determined that the main reason for the revealed facts of a decrease in production capacity is the uneven loading of production lines with fluctuations in the ratio of product types in the range of production programs of precast construction plants. Taking into account the known facts of the dependence of production capacity on the concrete capacity of block sections of houses, the results of a comparison of the degree of influence of concrete capacity on the production capacity and the ratio of the main types of products in the range of production programs of plants are presented in the paper. It has been established that a key influence on the indicators of production capacity is exerted by changes in the ratio of product types. On the basis of the conducted research, optimal reserves of production capacity have been determined with a high share of different types of houses in the production programs of the plants. Taking into account the established indicators of production capacity reduction, their optimal reservation is within 20–25 % of the design capacity of the plants, which should serve as a reference point when planning the functioning of the production management system under the conditions of changes in demand for products.

**Keywords:** production capacity, production of precast reinforced concrete structures, product range, prefabricated construction, precast construction plants, production program, production efficiency, production scheduling

**For citation:** Gurinovich V. Yu., Pozdnyakov D. A., Yukhnevskiy P. I. (2024) Planning of Production Capacities of Precast Construction Plants under Conditions of Changes in Demand for Products. *Science and Technique*. 23 (3), 242–250. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-242-250> (in Russian)

## Введение

Основы расчета производственной мощности заложены в учебно-методической литературе [1–3], работах Г. И. Цителаури [4], Б. М. Стефанова [5], Г. Я. Антоненко [6]. Методики расчета базируются на определении показателей при максимальной загрузке производственных мощностей, постоянном во времени спросе на продукцию. Однако важной задачей повышения эффективности производства является учет и прогнозирование производственной мощности при постоянно изменяющемся спросе на продукцию. Это обусловлено тем, что действующая производственная мощность имеет динамический характер и изменяется в соответствии с организационно-техническим уровнем производства и номенклатурой изделий модификаций блок-секций в производственной программе предприятий [7].

Номенклатура изделий находится в прямой зависимости от архитектурной индивидуальности и гибкости конструктивно-планировочных решений домов, доли индивидуальных жилых домов коттеджного типа в программе строительства и характеризуется значительным ростом при модернизации серий домов [8–11]. Данное утверждение в полной мере подтверждается представленной в работе [7] функциональной зависимостью роста количества марок изделий при увеличении доли точечных домов в производственной программе предприятий. Также установлено, что показатель бетоноемкости блок-секций домов находится в прямой зависимости от этажности и количества блок-секций в комплектации домов [7].

Термин «бетоноемкость» в исследованиях обозначает отношение объема железобетонных изделий в номенклатуре дома или отдельной блок-секции дома к  $1 \text{ м}^2$  общей площади. Рост номенклатуры изделий и бетоноемкости блок-секций является следствием увеличения количества формовок в производственном цикле на 20–25 % и соответственно расхода бетонной смеси на 28–33 % [8]. Это в свою очередь оказывает существенное влияние на производственную мощность предприятий.

В то же время известно, что изменение соотношения основных типов изделий в номенклатуре производственных программ предприятий оказывает влияние на показатели производственной мощности вследствие неравномерной загрузки технологических линий, специализирующихся на выпуске однотипной продукции [7, 8, 10, 12]. Несмотря на гибкость современных технологий, совмещение производства разнотипных изделий на технологических линиях по ряду причин (конструктивные и габаритные решения изделий, параметры производственных линий) не представляется возможным или ограничивается экономической эффективностью такого решения [13].

На основании сказанного выше можно сделать вывод, что исследование параметров номенклатуры изделий, влияющих на динамический характер производственной мощности, изучение закономерности влияния номенклатуры изделий на производственную мощность предприятий – важная задача совершенствования и повышения эффективности производственных баз индустриального домостроения.

В статье представлены результаты исследований влияния изменения соотношения основных типов изделий в номенклатуре производственных программ предприятий при строительстве разнотипных домов на показатели производственной мощности, а также результаты сравнения степени влияния на показатели производственных мощностей изменения бетоноемкости модификаций блок-секций и соотношения основных типов изделий в номенклатуре производственной программы предприятий.

**Влияние изменения соотношения основных типов изделий на показатели производственных мощностей предприятий**

Выполнен анализ соотношения основных типов изделий по показателям бетоноемкости в номенклатуре производственной программы четырех предприятий индустриального домостроения в зависимости от этажности и набора блок-секций в комплектации домов. Предприятия индустриального домостроения для обеспечения конфиденциальности данных обозначены как предприятие «А», «В», «С» и «D» соответственно. С учетом набора домов в производственной программе предприятий установлены рамки анализа номенклатуры изделий в диапазоне этажности домов от 3 до 18 и количества блок-секций до 4. Доля доборных изделий учтена при анализе соотношения типов изделий в номенклатуре производственной программы предприятий, но на графиках не отображалась. Максимальные колебания показателей соотношения основных типов изделий зафиксированы в номенклатуре производственной программы предприятия «А» (табл. 1). Так, колебания доли плит перекрытия превышают 40 %, наружных стеновых панелей и внутренних стеновых панелей более 36 %.

Графики изменения соотношения основных типов изделий в номенклатуре производственной программы предприятий представлены на рис. 1.

Различные тенденции распределения основных типов изделий обусловлены индивидуаль-

ностью конструктивных систем и проектных решений серий домов в производственных программах предприятий. Так, для предприятия «А» наблюдается снижение долей всех основных типов изделий при росте этажности блок-секций, что вызвано одновременным ростом доли доборных изделий. Для остальных анализируемых типовых серий доля доборных изделий не оказывает существенного влияния на колебания показателей соотношения основных типов изделий при изменении этажности блок-секций.

Таблица 1

**Колебания показателей соотношения основных типов изделий в номенклатуре производственной программы, %**

**Fluctuations in the ratio of basic types of products in the range of production program, %**

Предприятие	Наружные стеновые панели	Внутренние стеновые панели	Плиты перекрытия
«А»	36,2	36,0	40,5
«В»	28,1	4,4	14,5
«С»	17,1	7,3	5,6
«D»	6,2	1,3	4,1

С учетом установленных колебаний соотношения основных типов изделий в номенклатуре производственных программ предприятий действующая производственная мощность будет определяться производительностью технологической линии, которая обеспечит максимально возможный комплектный выпуск продукции.

Для анализа изменения производительности технологических линий, специализирующихся на выпуске основных типов изделий, установлена зависимость бетоноемкости основных типов изделий в номенклатуре производственных программ от этажности и набора блок-секций в комплектации домов (табл. 2).

Проверка полученных моделей по критерию Фишера показала, что модели адекватно представляют расчетные значения и информационно значимы.

На основании полученных выражений построены графики зависимости производственной мощности предприятий (в %) от изменения

показателей бетоноемкости основных типов изделий при колебаниях соотношения этих из-

делий в номенклатуре производственной программы предприятий (рис. 2).

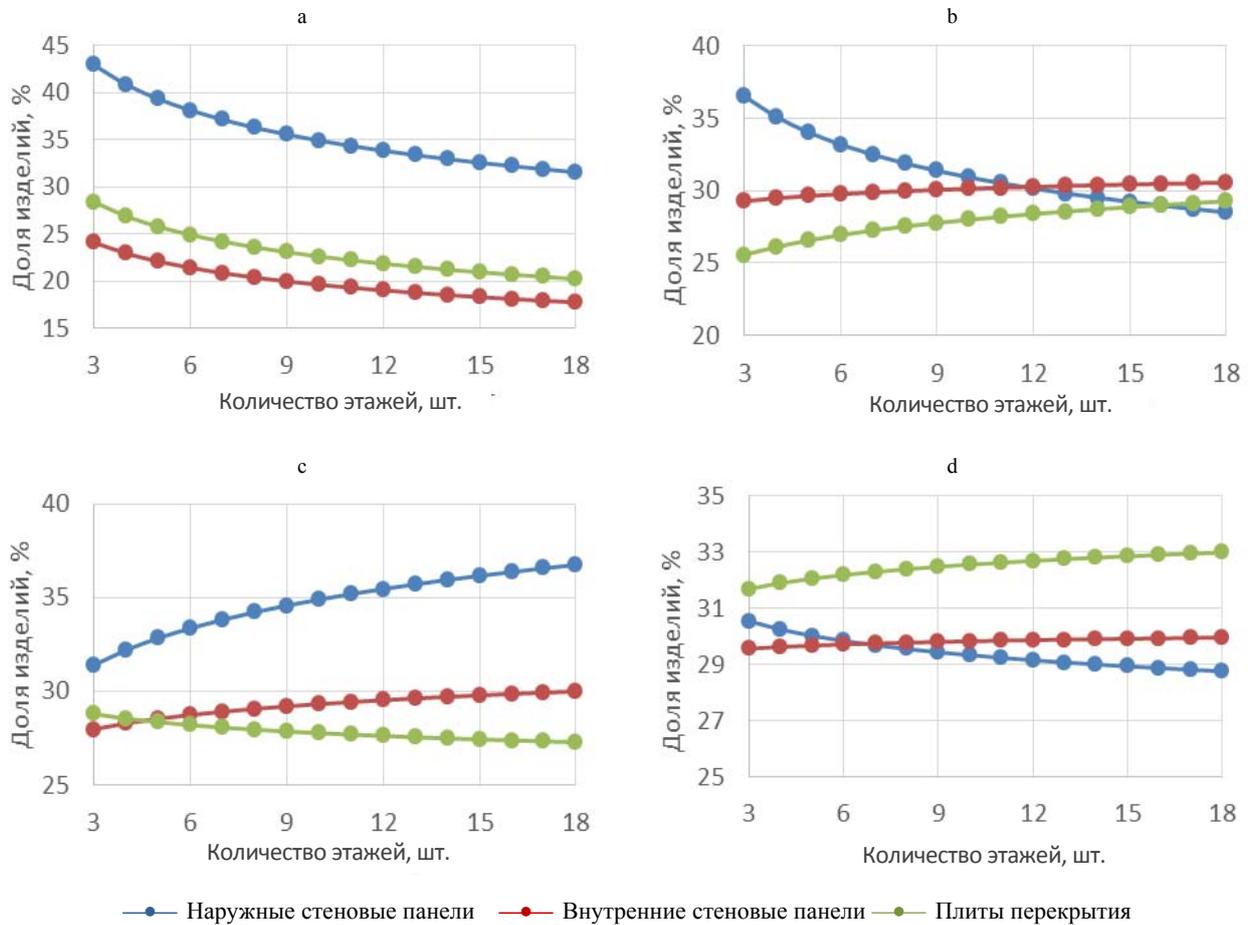


Рис. 1. Распределение основных типов изделий в номенклатуре производственной программы предприятий: а – предприятие «А»; б – предприятие «В»; с – предприятие «С»; d – предприятие «D»

Fig. 1. Distribution of the main types of products in the range of production program of plants: а – plant “A”; б – plant “B”; с – plant “C”; d – plant “D”

Таблица 2

**Зависимости бетоноемкости основных типов изделий от этажности и количества блок-секций в комплектации домов**

**Dependence of concrete capacity of the main types of products on the number of storeys and the number of block sections in house configurations**

Предприятие	Зависимость		
	Наружные стеновые панели	Внутренние стеновые панели	Плиты перекрытия
«А»	$K_6 = 0,657 \times X_1^{-0,279} \times X_2^{-0,211}$	$K_6 = 0,379 \times X_1^{-0,282} \times X_2^{-0,235}$	$K_6 = 0,479 \times X_1^{-0,328} \times X_2^{-0,213}$
«В»	$K_6 = 0,458 \times X_1^{-0,236} \times X_2^{-0,140}$	$K_6 = 0,373 \times X_1^{-0,137} \times X_2^{-0,183}$	$K_6 = 0,236 \times X_1^{-0,021} \times X_2^{-0,044}$
«С»	$K_6 = 0,527 \times X_1^{-0,317} \times X_2^{-0,160}$	$K_6 = 0,497 \times X_1^{-0,391} \times X_2^{-0,139}$	$K_6 = 0,452 \times X_1^{-0,384} \times X_2^{-0,0032}$
«D»	$K_6 = 0,321 \times X_1^{-0,198} \times X_2^{-0,098}$	$K_6 = 0,355 \times X_1^{-0,271} \times X_2^{-0,025}$	$K_6 = 0,261 \times X_1^{-0,002} \times X_2^{-0,084}$

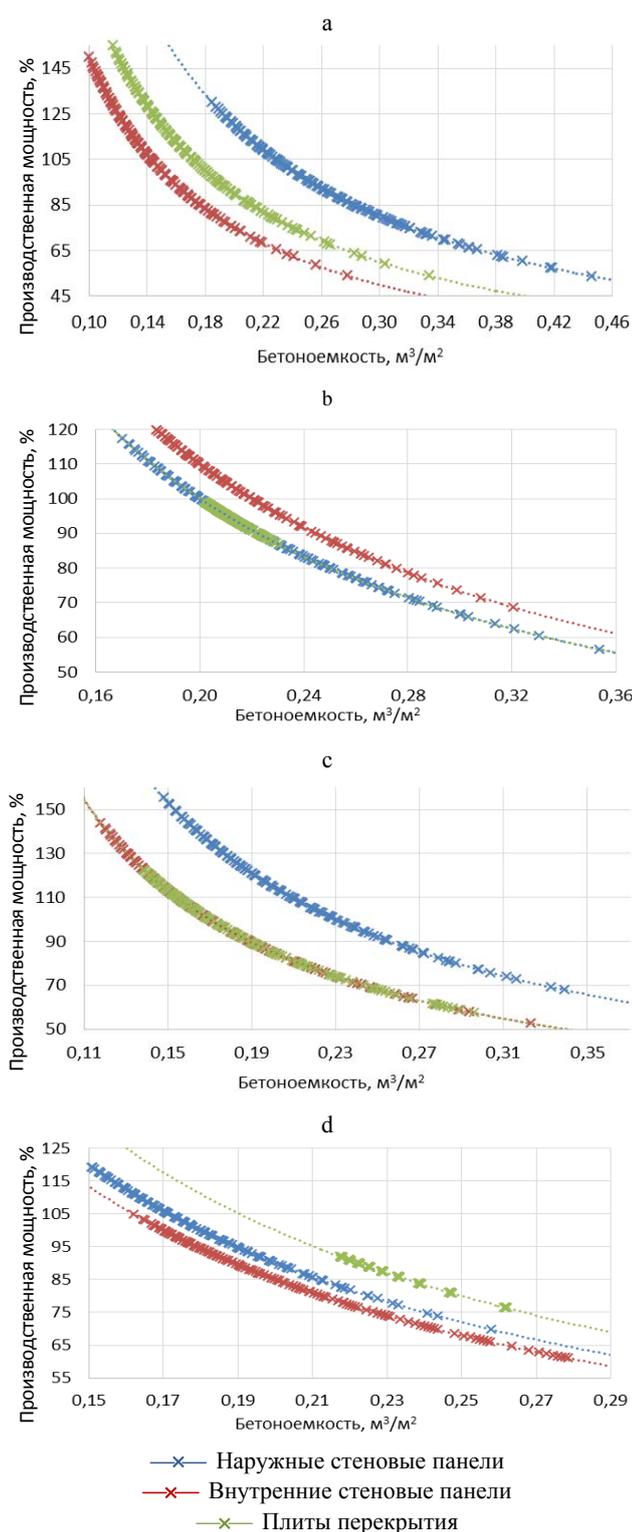


Рис. 2. Зависимость показателей производственных мощностей от изменения бетоноёмкости основных типов изделий: а – предприятие «А»; б – предприятие «В»; в – предприятие «С»; д – предприятие «Д»

Fig. 2. Dependence of production capacity indicators on changes in concrete capacity of main types of products: а – plant “А”; б – plant “В”; в – plant “С”; д – plant “Д”

Рост бетоноёмкости основных типов изделий является следствием снижения производительности технологических линий. Как видно из графиков на рис. 2, данный факт приводит к снижению показателей производственной мощности предприятий относительно проектных значений. При этом для отдельных модификаций домов с относительно низкими показателями бетоноёмкости основных типов изделий наблюдается рост производственной мощности до 50 % относительно проектных показателей. Однако следует отметить, что такие модификации домов характеризуются этажностью 18 уровней и набором блок-секций в комплектации домов не менее 9. Как показал анализ модификаций домов в производственных программах предприятий, такие решения домов в отечественной практике индустриального домостроения не применяются.

### Влияние параметров номенклатуры изделий на показатели производственной мощности предприятий

Доминирующее влияние на изменение бетоноёмкости блок-секций и соотношение основных типов изделий оказывает этажность блок-секций. С учетом приведенного факта для установления зависимости производственных мощностей от параметров номенклатуры изделий в качестве основного критерия принята этажность при наборе секций в комплектации домов, равном 4.

На рис. 3 представлены совмещенные графики зависимости показателей производственных мощностей от бетоноёмкости блок-секций и изменения соотношения основных типов изделий в номенклатуре производственных программ предприятий при изменении этажности блок-секций домов.

В соответствии с графиками (рис. 3) производительность технологических линий при изменении соотношения основных типов изделий оказывает определяющее влияние на показатели производственных мощностей предприятий. Установлено, что влияние производительности технологических линий на показатели производственной мощности предприятий увеличивается при снижении этажности блок-секций домов. В свою очередь, рост доли наружных стеновых панелей в номенклатуре изделий имеет определяющее значение. Исключение установлено только для предприятия «Д».

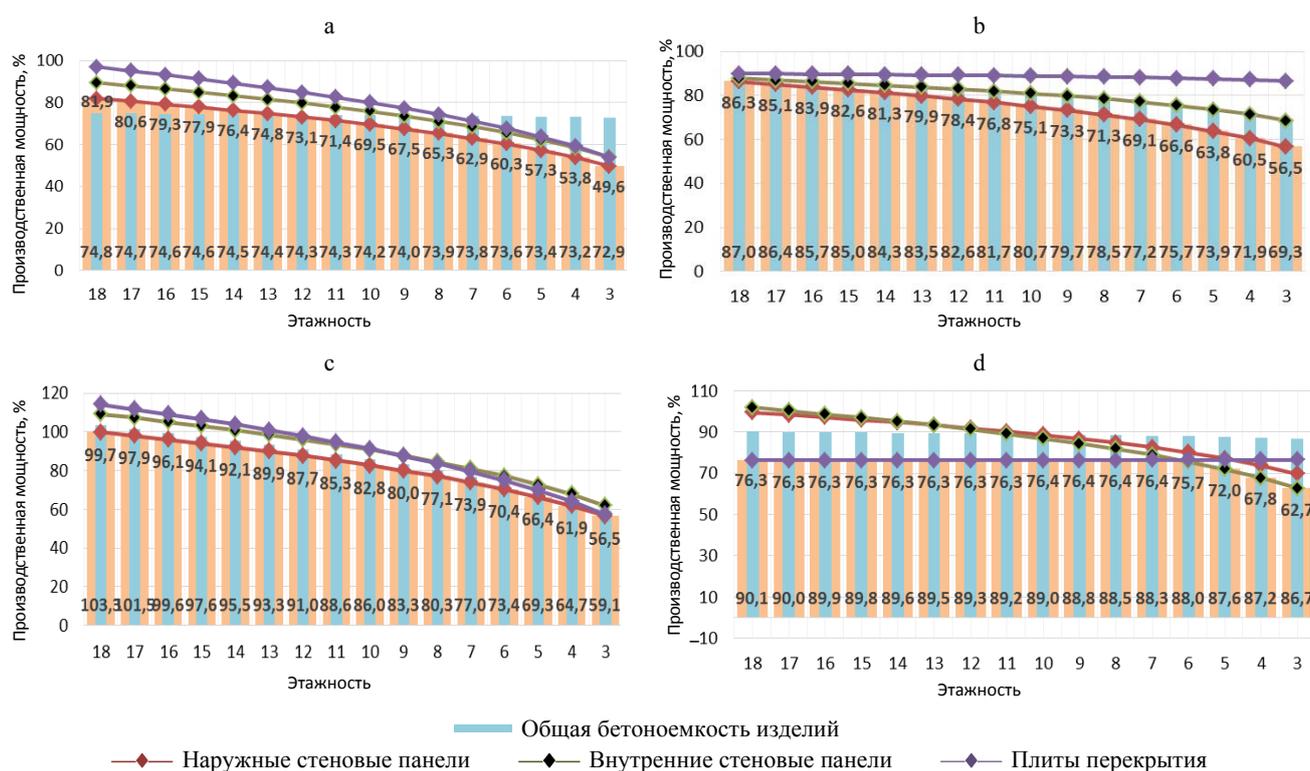


Рис. 3. Показатели изменения производственных мощностей с учетом производительности технологических линий: а – предприятие «А»; б – предприятие «В»; с – предприятие «С»; d – предприятие «D»

Fig. 3. Indicators of changes in production capacity taking into account the productivity of technological lines: а – plant “A”; б – plant “B”; с – plant “C”; d – plant “D”

Зафиксированы отклонения показателей производственных мощностей, установленных по бетоноемкости блок-секций и производительности технологических линий. При этом отклонения увеличиваются при снижении этажности блок-секций. Для блок-секций предприятия «А» при этажности более 12 уровней показатель производственных мощностей определяется бетоноемкостью блок-секций, что объясняется ростом доли доборных изделий при увеличении этажности блок-секций. В остальных

анализируемых типовых сериях для всей анализируемой линейки этажности блок-секций показатель производственных мощностей зависит от производительности технологических линий. Отклонения показателей производственной мощности предприятий, установленных по производительности технологических линий, от показателей, установленных по бетоноемкости блок-секций анализируемых серий, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Отклонения расчетных данных производственной мощности предприятий  
Deviations in calculated data of production capacity of plants

Пред- приятие	Отклонения расчетных показателей освоения производственной мощности предприятий при этажности блок-секций, %															
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
«А»	-7,2	-5,9	-4,6	-3,3	-1,9	-0,4	1,2	2,9	4,6	6,5	8,6	10,9	13,4	16,2	19,4	23,3
«В»	0,7	1,3	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,9	5,6	6,4	7,2	8,1	9,1	10,1	11,3	12,7
«С»	3,6	3,5	3,5	3,5	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7
«D»	13,8	13,7	13,6	13,5	13,3	13,2	13,0	12,8	12,6	12,4	12,2	11,9	12,3	15,6	19,4	23,9

Как видно из табл. 3, определяющее значение на показатели производственной мощности оказывает производительность технологических линий при изменении соотношения основных типов изделий. Так, при максимальной анализируемой этажности блок-секций превышение показателей, установленных по бетоноемкости блок-секций, достигает для отдельных серий домов более 23 %. Только для предприятия «А» для домов этажностью до 9 уровней определяющее значение на показатели производственной мощности оказывает бетоноемкость блок-секций. Таким образом, при формировании производственной программы предприятий первоочередной задачей является определение производительности каждой технологической линии с учетом изменения показателей соотношения основных типов изделий в номенклатуре производственных программ предприятий.

### Определение оптимального резервирования производственных мощностей предприятий

Для сглаживания систематически изменяемой номенклатуры изделий при строительстве домов различной этажности в рекомендациях расчета производственной мощности предприятий предусмотрено резервирование запаса мощности на каждой технологической линии в размере 6 % [3]. В [12] приводятся данные анализа рекомендаций справочной литературы и результатов исследований оптимальных резервов производственных мощностей для обеспечения эффективности производства. Для ком-

пенсации колебаний потребности в отдельных типах изделий и снижения серийности производства при увеличении количества марок рекомендуется резерв не более 10–15 %.

Для изучения оптимальных резервов производственной мощности выполнено распределение домов в производственных программах предприятий по количеству этажей блок-секций. На рис. 4 приведены данные анализа производственных программ девяти отечественных предприятий.

Как видно из рис. 4, наибольшая доля блок-секций (36 %) в производственных программах предприятий имеет высотность 10 этажей. При этом доля домов высотой ниже 10 этажей составляет 43 % в общем объеме возводимого жилья в индустриальном исполнении. Таким образом, в программах строительства жилья преобладает малоэтажная застройка территорий, что увеличивает для предприятий риск снижения показателей освоения производственных мощностей. Это утверждение подтверждается данными, представленными на рис. 3.

Зафиксированы следующие средние показатели параметров домов в индустриальном исполнении: набор секций в комплектации дома – 3,0; этажность домов – 12,3; этажность секций в комплектации домов – 9,6.

С учетом установленной средней этажности блок-секций определены максимальные показатели снижения производственных мощностей. В табл. 4 приведены показатели освоения производственных мощностей в зависимости от бетоноемкости блок-секций и производительности технологических линий при изменении соотношения основных типов изделий.

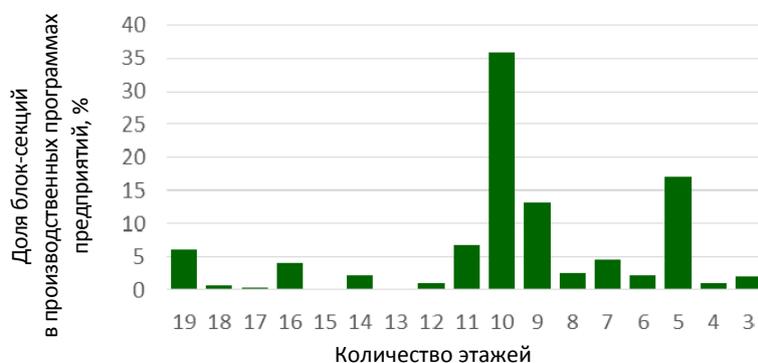


Рис. 4. Распределение жилья в индустриальном исполнении в зависимости от этажности

Fig. 4. Distribution of prefabricated construction housing depending on number of storeys

Таблица 4

Показатели освоения производственной мощности и оптимальные резервы производственной мощности  
Indicators of development of production capacity and optimal reserves of production capacity

Предприятие	Минимальное значение показателя освоения производственной мощности, %	
	по коэффициенту соответствия бетоноемкости изделий	по производительности технологических линий
«А»	74,0	67,6
«В»	79,6	73,3
«С»	86,7	75,2
«D»	83,4	80,2
Среднеарифметический показатель	80,9	74,1
Среднеквадратическое отклонение	5,5	5,2
Коэффициент вариации, %	7,0	7,0
Резервы производственной мощности с учетом колебаний параметров номенклатуры изделий, %	20	25

В соответствии с данными в табл. 4 усредненный показатель резервов производственной мощности достигает значения 25 %, что в свою очередь может служить ориентиром при планировании функционирования системы управления производством в условиях изменения спроса на продукцию.

## ВЫВОДЫ

1. Теоретический анализ литературы показал, что известные подходы определения производственных мощностей требуют оптимизации в связи с влиянием роста номенклатуры изделий на параметры производства, в том числе производительность предприятий. Установлена актуальность учета влияния на показатели производственной мощности предприятий номенклатуры изделий и влияния параметров номенклатуры изделий на уровень освоения производственных мощностей.

2. Анализ распределения основных типов изделий в номенклатуре производственных программ предприятий индустриального домостроения зафиксировал колебания данных при изменении этажности блок-секций. При этом колебания доли основных типов изделий производственных программ отдельных предприятий достигают: 40 % – для плит перекрытия; 36 % – для наружных и внутренних стеновых панелей. Различные тенденции изменения доли основных типов изделий в номенклатуре производственных программ предприятий обусловлены индивидуальностью конструктивных систем и проектных решений домов.

3. Приведены зависимости показателей освоения производственных мощностей от бетоноемкости основных типов изделий с учетом влияния на них изменения соотношения изделий за счет изменения производительности технологических линий. Обобщая результаты проведенных исследований, приведены графики зависимости показателей освоения производственных мощностей от бетоноемкости блок-секций и производительности технологических линий при изменении соотношения основных типов изделий. Установлено, что уровень освоения производственной мощности в большей степени зависит от производительности технологических линий.

4. На основании установленной средней этажности и набора секций в производственных программах девяти предприятий индустриального домостроения определены максимальные показатели снижения производственной мощности. С учетом зафиксированных параметров номенклатуры изделий для средней этажности и набора блок-секций в комплектации домов при формировании производственных программ предприятий в условиях действующего производства или технологическом проектировании нового строительства (реконструкции) предприятий для обеспечения достижения проектных показателей оптимальные резервы производственных мощностей рекомендованы в диапазоне 20–25 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий сборного железобетона: ОНТП 07–85. Введ. 01.01.1986. (Взамен «Общесоюзных норм технологического проектирования предприятий сборного желе-

- зобетона» ОНТП-7–80). М.: М-во промышленности строительных материалов СССР, 1986. 51 с.
- Инструкция по определению производственной мощности предприятий сборного железобетона: утв. М-вом промышленности строительных материалов СССР. М.: Всесоюз. науч.-исследоват. ин-т заводской технология сборных железобетонных конструкций и изделий ВНИИЖЕЛЕЗОБЕТОН, 1978. 71 с.
  - Методические указания по определению производственных мощностей предприятий крупнопанельного домостроения: утв. Гос. комитетом по гражданскому строительству и архитектуре при Госстрое СССР. М.: Центр. науч.-исслед. и проектный ин-т типового и экспериментального проектирования жилища (ЦНИИЭП жилища), 1971. 22 с.
  - Цителаури, Г. И. Проектирование предприятий сборного железобетона: учеб. для вузов по спец. «Производство строительных изделий и конструкций» / Г. И. Цителаури. М.: Высш. шк., 1986. 312 с.
  - Стефанов, Б. В. Организация технологических процессов на заводах сборного железобетона / Б. В. Стефанов, Г. Я. Антоненко. Киев: Будівельник, 1965. 82 с.
  - Антоненко, Г. Я. Организация, планирование и управление предприятиями строительных изделий и конструкций / Г. Я. Антоненко. Киев: Высш. шк., 1981. 375 с.
  - Гуринович, В. Ю. Исследование влияния номенклатуры изделий на показатели производственной мощности предприятий индустриального домостроения / В. Ю. Гуринович // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 2. С. 128–139. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-128-139>.
  - Граник, Ю. Г. Реконструкция и техническое перевооружение предприятий полносборного домостроения / Ю. Г. Граник, С. И. Полтавцев. М.: Стройиздат, 1989. 271 с.
  - 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 л.
  - 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 л.
  - 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 л.
  - Климкин, К. А. Методические основы оценки использования производственных мощностей домостроительных предприятий в условиях инвестиционного спада: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / К. А. Климкин. Хабаровск, 1998. 143 л.
  - 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>.

Поступила 15.02.2024

Подписана к печати 18.04.2024

Опубликована онлайн 31.05.2024

## REFERENCES

- ONTP 07–85. *All-Union Norms for Technological Design of Prefabricated Reinforced Concrete Enterprises*. Moscow Ministry of Construction Materials Industry of the USSR, 1986. 51 (in Russian).
- Instructions for Determining the production Capacity of Precast Concrete Enterprises: Approved by the Ministry of Construction Materials Industry of the USSR*. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of Factory Technology of Prefabricated Reinforced Concrete Structures and Products [VNIIZhELEZOBETON], 1978. 71 (in Russian).
- Guidelines for Determining the Production Capacity of Large-Panel Housing Construction Enterprises: Approved by the State Committee for Civil Engineering and Architecture under the USSR State Construction Committee*. Moscow, Central Research and Design Institute for Standard and Experimental Housing Design (TsNIIEP zhilishcha), 1971. 22 (in Russian).
- Tsitelauri G. I. (1986) *Design of Precast Concrete Plants*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 312 (in Russian).
- Stefanov B. V., Antonenko G. Ya. (1965) *Organization of Technological Processes at Precast Concrete Factories*. Kiev, Budivelnik Publ. 82 (in Russian).
- Antonenko G. Ya. (1981) *Organization, Planning and Management of Construction Products and Structures Enterprises*. Kiev, Vysshaya Shkola Publ. 375 (in Russian).
- Gurinovich V. Yu. (2024) Study of Influence of Product Range on Production Capacity Indicators of Precast Construction Plants. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 23 (2), 128–139 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-128-139>.
- Granik Yu. G., Poltavtsev S. I. (1989) *Reconstruction and Technical Re-Equipment of Prefabricated Housing Construction Enterprises*. Moscow, Stroyizdat Publ. 271 (in Russian).
- Dzhalilov 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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>.

Received: 15.02.2024

Accepted: 18.04.2024

Published online: 31.05.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-251-260>

УДК621.83.062.1

## Бесступенчатая двухпоточная гидрообъемно-механическая трансмиссия гусеничного трактора

Канд. техн. наук, доц. Ч. И. Жданович<sup>1)</sup>

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

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

**Реферат.** В работе предложена оригинальная конструкция бесступенчатой двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссии, которая обеспечивает разделение потока мощности по бортам гусеничного трактора. Для устойчивости прямолинейного движения регулирующие элементы двух бортов кинематически связаны между собой специальным механизмом блокировки, который разблокируется на повороте. Трансмиссия обеспечивает четыре диапазона скорости. На первом диапазоне и при движении задним ходом мощность передается по гидравлической ветви трансмиссии, на втором–четвертом – по двум ветвям: механической и гидравлической. Разработана математическая модель для выбора параметров гидромашин, учитывающая их объемный и механический КПД, максимальное давление рабочей жидкости в гидropередаче, максимальные обороты и крутящий момент на валу гидромотора. Выбраны параметры нерегулируемого гидромотора, регулируемого насоса и механических элементов трансмиссии. Разработаны математическая модель прямолинейного движения гусеничного трактора с бесступенчатой гидрообъемно-механической трансмиссией, учитывающей вес трактора, параметры ходовой системы, характеристики двигателя внутреннего сгорания, параметры и КПД гидромашин, редукторов, диапазонной и раздаточных коробок, планетарной передачи и позволяющей определять КПД отдельных ветвей и всей трансмиссии, проводить тяговый расчет трактора. Разработана программа расчета, реализующая математическую модель. Параметры двухпоточной трансмиссии подобраны так, что большая часть крутящего момента передается по механической ветви и трансмиссия имеет достаточно высокое значение КПД. Максимальное значение тягового КПД трактора реализуется на втором и третьем диапазонах, которые предназначены для выполнения основных операций почвообработки.

**Ключевые слова:** диапазон скорости, выбор параметров гидромашин, КПД гидромашин, планетарная передача, КПД трансмиссии, тяговый расчет, тяговый КПД

**Для цитирования:** Жданович, Ч. И. Бесступенчатая двухпоточная гидрообъемно-механическая трансмиссия гусеничного трактора / Ч. И. Жданович // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 3. С. 251–260. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-251-260>

## Continuously Variable Two-Flow Hydrostatic-Mechanical Transmission of Crawler Tractor

Ch. I. Zhdanovich<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** The paper proposes an original design of a continuously variable two-flow hydrostatic-mechanical transmission, which ensures division of the power flow along the sides of the crawler tractor. To ensure stability of rectilinear motion,

### Адрес для переписки

Жданович Чеслав Иосифович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Якуба Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 29 276-06-84  
chzhdanovich@mail.ru

### Address for correspondence

Zhdanovich Cheslav I.  
Belarusian National Technical University  
12, Jakuba Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 276-06-84  
chzhdanovich@mail.ru

the regulating elements of the two sides are kinematically interconnected by a special locking mechanism that unlocks when turning. The transmission provides four speed ranges. In the first range and when reversing, power is transmitted through the hydraulic branch of the transmission. In the second -fourth range, power is transmitted through two branches: mechanical and hydraulic. A mathematical model has been developed for selecting the parameters of hydraulic machines, taking into account their volumetric and mechanical efficiency, the maximum pressure of the working fluid in the hydraulic transmission, the maximum speed and torque on the shaft of the hydraulic motor. The parameters of an unregulated hydraulic motor, an adjust-table pump and mechanical transmission elements are selected. A mathematical model of the rectilinear motion of a caterpillar tractor with a continuously variable hydrostatic-mechanical transmission has been developed, taking into account the weight of the tractor, the parameters of the running system, the characteristics of the internal combustion engine, the parameters and efficiency of hydraulic machines, gearboxes, range and transfer boxes, planetary gear and allowing to determine the efficiency of individual branches and the entire transmission, carry out traction calculations of the tractor. A calculation program has been developed that implements the mathematical model. The parameters of the dual-flow transmission are selected so that most of the torque is transmitted through the mechanical branch and the transmission has a fairly high efficiency value. The maximum value of tractor traction efficiency is realized in the second and third ranges, which are designed to perform basic tillage operations.

**Keywords:** speed range, selection of hydraulic machine parameters, hydraulic machine efficiency, planetary gear, transmission efficiency, traction calculation, traction efficiency

**For citation:** Zhdanovich Ch. I. (2024) Continuously Variable Two-Flow Hydrostatic-Mechanical Transmission of Crawler Tractor. *Science and Technique*. 23 (3), 251–260. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-251-260> (in Russian)

## Введение

Развитие конструкций сельскохозяйственных тракторов направлено на повышение производительности машинно-тракторных агрегатов и улучшение условий труда оператора. Решение данных задач может быть достигнуто за счет автоматизации процесса управления, на что существенное влияние оказывает тип используемой трансмиссии. На данный момент наблюдается существенное увеличение использования на тракторах бесступенчатых трансмиссий. Многие ведущие тракторостроительные компании производят колесные тракторы с бесступенчатыми трансмиссиями [1–5]. Так, фирма Fendt перешла на производство тракторов только с бесступенчатыми трансмиссиями [2, 3, 6], причем не только колесных, но и гусеничных [6]. Гусеничные тракторы Fendt могут бесступенчато изменять скорость движения в пределах от 0 до 40 км/ч. Они используют специальные мощные гидростатические агрегаты высокого технического уровня [7]. В работе [8] предложена и обоснована бесступенчатая гидрообъемно-механическая двухпоточная трансмиссия для гусеничного трактора весом 50 кН со скоростью движения от 0 до 15 км/ч. В диапазоне от 0 до 7,5 км/ч трансмиссия работает в режиме циркуляции энергии, ее КПД в диапазоне скоростей 0–6 км/ч растет с 0 до 0,8, достигая максимума 8,4 при скорости 7–8 км/ч, затем опять падает до 0,8.

Бесступенчатое регулирование в широком скоростном диапазоне требует установки гидромашин большой мощности, при этом наблюдается их неэкономичная работа на отдельных режимах движения трактора. Для уменьшения стоимости гидрообъемно-механических трансмиссий целесообразно установить несколько скоростных диапазонов и использовать серийно изготавливаемую гидropередачу с нерегулируемым гидромотором, обеспечивающим заданный диапазон [9].

Трактор гусеничный «Беларус 2103» оборудован ступенчатой трансмиссией [10], имеющей четыре диапазона переднего хода и два диапазона заднего хода. Предложена схема трансмиссии [11], обеспечивающая бесступенчатую работу трактора в агротехнически допустимых скоростных диапазонах агрегатируемых машин [12].

Цель работы – расчетно-теоретическое обоснование конструкции бесступенчатой гидрообъемно-механической трансмиссии [11] гусеничного трактора и анализ ее основных характеристик.

## Конструкция бесступенчатой гидрообъемно-механической трансмиссии

Конструкция и работа рассматриваемой трансмиссии гусеничного трактора подробно

изложены в патенте [11]. Рассмотрим некоторые особенности ее работы (рис. 1). При движении трактора поток мощности от двигателя через муфту сцепления поступает на раздаточную коробку 1 привода насосов, где происходит разделение потока. Часть мощности по механической ветви через диапазонную коробку 2, раздаточную коробку 3 механизма поворота, где поток разделяется на оба борта трактора, поступает на эпициклические шестерни 4 и 5 дифференциальных механизмов поворота. Причем изменение передаточного числа в диапазонной коробке (переключение диапазона) приводит к изменению частоты вращения эпициклической шестерни и ступенчатому изменению скорости движения трактора. Часть мощности уходит по гидравлической ветви через шестерни раздаточной коробки 1 привода насосов, регулируемые насосы 6 и 7, гидроблок 8, нерегулируемые гидромоторы 9 и 10, редукторы гидромоторов 11 и 12 и поступает на солнечные шестерни 13 и 14 дифференциальных механизмов поворота. Изменение параметра регулирования насоса приводит к изменению частоты вращения гидромоторов и, как следствие, частоты вращения солнечных шестерен и бесступенчатому изменению скорости движения трактора в пределах диапазона. Сумми-

рование потоков мощности осуществляется на водилах 15 и 16 и далее через карданные передачи, главную передачу (центральный и бортовой редукторы) передается на ведущие колеса. Для обеспечения устойчивости прямолинейного движения регулирующие элементы двух бортов 13 и 14 кинематически связаны между собой специальным механизмом блокировки 17, который разблокируется на повороте. Плавное регулирование скорости движения в заданном диапазоне и бесступенчатое изменение радиуса поворота трактора осуществляет блок управления 18. Предлагаемая конструкция обеспечивает четыре диапазона скоростей движения трактора вперед, аналогично серийно выпускаемому трактору «Беларус 2301» [10], и один диапазон движения назад. На первом диапазоне эпицикл остановлен тормозом 19, мощность через механическую ветвь не передается, движение трактора обеспечивается передачей мощности по гидравлической ветви. Аналогично обеспечивается движение задним ходом, только посредством управления параметром регулирования насоса осуществляется изменение направления вращения гидромоторов. На втором–четвертом диапазонах мощность передается по двум ветвям: механической и гидравлической.

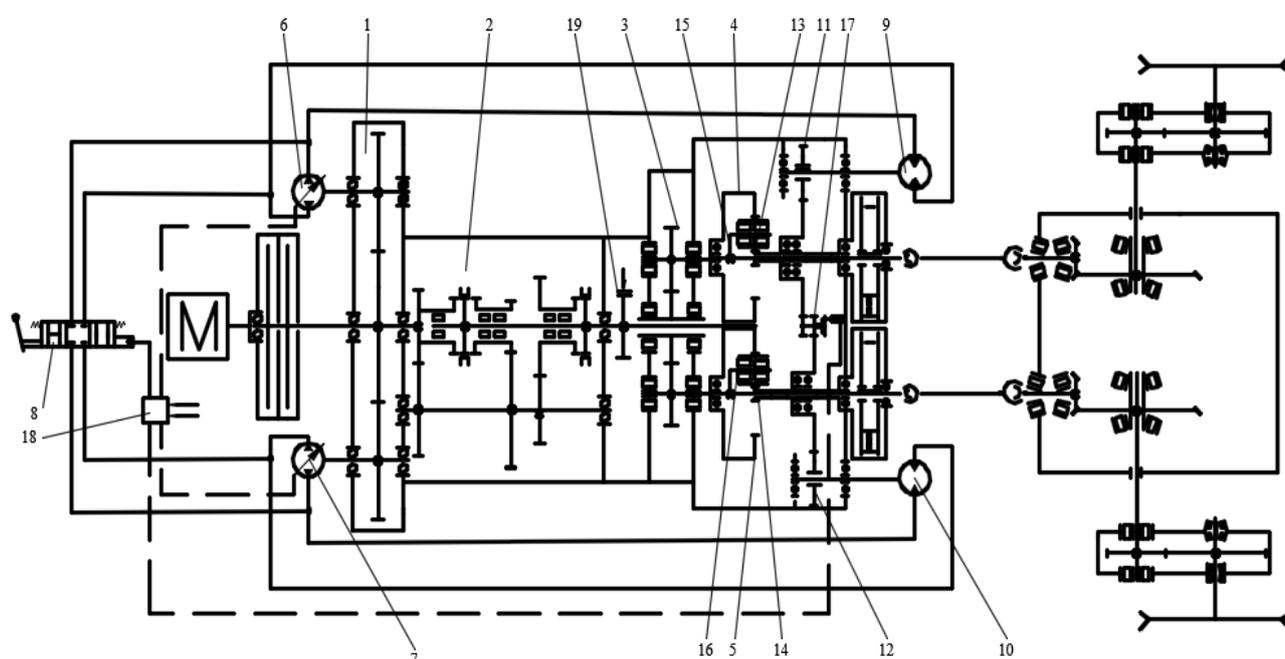


Рис. 1. Кинематическая схема трансмиссии

Fig. 1. Kinematic transmission diagram

**Выбор параметров бесступенчатой гидрообъемно-механической трансмиссии гусеничного трактора**

Числа зубьев шестерен раздаточной коробки 1 привода насосов выбираем по критерию обеспечения номинальной частоты вращения насоса при номинальной частоте вращения вала двигателя. Числа зубьев в шестернях диапазонной коробки и раздаточной коробки механизма поворота подбираем таким образом, чтобы на втором диапазоне в диапазонной коробке включалась пониженная передача, на третьем – прямая, на четвертом – повышенная. Конструкция и параметры планетарного ряда механизма поворота, центрального и бортового редукторов унифицированы с трактором «Беларус 2301». Числа зубьев шестерен редукторов гидромоторов 11 и 12 подбираем по условию согласования оборотов гидромотора и солнечных шестерен и возможности установки механизма блокировки 17.

Рабочий объем гидромотора и насоса, максимальные обороты элементов планетарного ряда определяем, используя известные зависимости [13–16], при необходимости преобразуя их. Рабочий объем гидромотора рассчитаем по максимальному крутящему моменту на его валу и выбранному максимальному давлению рабочей жидкости в гидropередаче. Анализ показывает, что максимальный крутящий момент ограничен максимальным сцеплением гусеницы с почвой. Учитывая, что каждая гусеница имеет свой привод, получим

$$V_{\text{ГМ(расч)}} = \frac{\pi G_{\text{T}} \varphi_{\text{max}} r_{\text{BK}}}{\eta_{\text{Гус}} i_{\text{ГП}} \eta_{\text{ГП}} \eta_{\text{КВ}} (K + 1) \eta_{\text{СВ}} i_{\text{РГМ}} \eta_{\text{РГМ}} \Delta p_{\text{max}} \eta_{\text{ГМ(ГМ)}}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{T}}$  – вес трактора, Н;  $\varphi_{\text{max}}$  – коэффициент сцепления;  $r_{\text{BK}}$  – радиус ведущего колеса, м;  $\eta_{\text{Гус}}$  – КПД гусеничного движителя;  $i_{\text{ГП}}$  – передаточное число главной передачи (центрального и бортового редукторов);  $\eta_{\text{ГП}}$  – КПД главной передачи;  $\eta_{\text{КВ}}$  – КПД карданного вала;  $K$  – коэффициент планетарного ряда;  $\eta_{\text{СВ}}$  – КПД планетарного ряда от солнечной шестерни до водила;  $i_{\text{РГМ}}$  – передаточное число редуктора гидромотора;  $\eta_{\text{РГМ}}$  – КПД редуктора гидромотора;  $\Delta p_{\text{max}}$  – максимальное давление рабочей жидко-

сти в гидropередаче, МПа;  $\eta_{\text{ГМ(ГМ)}}$  – гидромеханический КПД гидромотора.

По полученному значению  $V_{\text{ГМ(расч)}}$ , см<sup>3</sup>/об, подбираем гидромотор из числа серийно изготавливаемых, уточняем его объем  $V_{\text{ГМ}}$ .

Максимальный рабочий объем насоса определяется по формуле, при параметре регулирования насоса  $\varepsilon_{\text{H}} = 1$ :

$$V_{\text{H(расч)}} = \frac{\varepsilon_{\text{ГМ}} V_{\text{ГМ}} n_{\text{ГМ max}} i_{\text{PH}}}{\eta_{\text{об(ГМ)}} \varepsilon_{\text{H}} n_{\text{N}} \eta_{\text{об(Н)}}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{\text{ГМ}}$  – параметр регулирования гидромотора;  $n_{\text{ГМ max}}$  – максимальные обороты гидромотора, мин<sup>-1</sup>;  $i_{\text{PH}}$  – передаточное число редуктора привода насоса;  $n_{\text{N}}$  – номинальная частота вращения вала двигателя, мин<sup>-1</sup>;  $\eta_{\text{об(ГМ)}}$  – объемный КПД гидромотора,  $\eta_{\text{об(Н)}}$  – то же насоса.

По полученному значению  $V_{\text{H(расч)}}$ , см<sup>3</sup>/об, выбирается насос из числа серийно изготавливаемых с рабочим объемом  $V_{\text{H}}$ .

При определении КПД редукторов, планетарного ряда, диапазонной и раздаточных коробок учитываем механические потери на трение в зубчатых зацеплениях, подшипниках и гидравлические потери, связанные с перемешиванием масла в их картерах. Для КПД карданного вала учитываем потери в карданных шарнирах.

Объемный и гидромеханический КПД в гидромашинах определяем по зависимостям [17–19], несколько преобразованным для удобства расчета. Объемный КПД насоса

$$\eta_{\text{об(Н)}} = 1 - \frac{k_{\text{yH1}} 30 \Delta p}{\pi n_{\text{H}} D_{\text{H}}^2 \varepsilon_{\text{H}}} \left( \frac{n_{\text{H max}}}{n_{\text{H}}} + c_{\text{y1}} \right), \quad (3)$$

где  $k_{\text{yH1}}$ , м<sup>2</sup>/(МПа·с),  $c_{\text{y1}}$  – коэффициенты утечек насоса;  $D_{\text{H}} = \sqrt[3]{2 \cdot 10^{-6} \pi V_{\text{H}}}$  – характерный размер насоса, м;  $n_{\text{H}}$  – обороты насоса, мин<sup>-1</sup>;  $n_{\text{H max}}$  – максимальные обороты насоса, мин<sup>-1</sup>.

Объемный КПД гидромотора

$$\eta_{\text{об(ГМ)}} = 1 / \left( 1 + \frac{k_{\text{yH2}} 30 \Delta p}{\pi n_{\text{ГМ}} D_{\text{ГМ}}^2 \varepsilon_{\text{ГМ}}} \left( \frac{n_{\text{ГМ max}}}{n_{\text{ГМ}}} + c_{\text{y2}} \right) \right), \quad (4)$$

где  $k_{\text{yH2}}$ , м<sup>2</sup>/(МПа·с),  $c_{\text{y2}}$  – коэффициенты утечек гидромотора;  $D_{\text{ГМ}} = \sqrt[3]{2 \cdot 10^{-6} \pi V_{\text{ГМ}}}$  – харак-

терный размер гидромотора;  $n_{ГМ}$  – обороты гидромотора,  $\text{мин}^{-1}$ .

Гидромеханический КПД гидромотора

$$\eta_{ГМ(ГМ)} = \frac{\varepsilon_{ГМ} - \frac{k_{жл2} \pi n_{ГМ}^2 D_{ГМ} (1 + c_{ж2} \varepsilon_{ГМ}^2)}{30 n_{ГМ \max} \Delta p}}{\varepsilon_{ГМ}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{k_{п2}}{\Delta p \left( 1 + \frac{c_{п2} \pi n_{ГМ}^2 D_{ГМ}}{30 n_{ГМ \max}} \right)} - \frac{k_{с2}}{1 + \frac{c_{с2} \pi n_{ГМ}^2 D_{ГМ}}{30 n_{ГМ \max}}}, \quad (5)$$

где  $k_{жл2}$ , МПа·с/м,  $c_{ж2}$  – коэффициенты потерь гидромотора на жидкое трение;  $k_{п2}$ , МПа,  $c_{п2}$ , с/м, – то же на сухое трение;  $k_{с2}$ ,  $c_{с2}$ , м, – то же потерь на прокрутку гидромотора.

Гидромеханический КПД насоса

$$\eta_{ГМ(Н)} = \frac{\varepsilon_{Н}}{\varepsilon_{Н} + \frac{k_{жл1} \pi n_{Н}^2 D_{Н} (1 + c_{ж1} \varepsilon_{Н}^2)}{30 n_{Н \max} \Delta p}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\varepsilon_{Н}}{+ \frac{k_{п1}}{\Delta p \left( 1 + \frac{c_{п1} \pi n_{Н}^2 D_{Н}}{30 n_{Н \max}} \right)} + \frac{k_{с1}}{1 + \frac{c_{с1} \pi n_{Н}^2 D_{Н}}{30 n_{Н \max}}}}, \quad (6)$$

где  $k_{жл1}$ , МПа·с/м,  $c_{ж1}$  – коэффициенты потерь насоса на жидкое трение;  $k_{п1}$  МПа,  $c_{п1}$ , с/м, – то же потерь насоса на сухое трение;  $k_{с1}$ ,  $c_{с1}$ , м, – то же потерь на прокрутку насоса.

На основании математической модели для выбора параметров гидромашин (уравнения (1)–(5)) разработана компьютерная программа. Она позволяет выбирать параметры гидромашин с учетом: их объемных и гидромеханических КПД, максимального давления рабочей жидкости в гидropередаче, максимальных оборотов и крутящего момента на валу гидромотора. Расчеты показывают, что гидромотор можно выбрать в диапазоне объемов 32–56  $\text{см}^3/\text{об}$ , в зависимости от задаваемого максимального давления рабочей жидкости в гидropередаче. Для дальнейших расчетов из каталога выбираем серийно выпускаемый нерегулируемый гидромотор объемом 40  $\text{см}^3/\text{об}$  и регулируемый насос объемом 90  $\text{см}^3/\text{об}$ .

### Математическая модель прямолинейного движения гусеничного трактора с бесступенчатой гидрообъемно-механической трансмиссией

Проведем анализ работы двухпоточной гидрообъемно-механической передачи и трактора в целом. Используем известные зависимости [13–16, 20, 21], при необходимости преобразуя их.

Крутящий момент на валу двигателя зависит от сопротивления движению машины. Схема передачи энергии от двигателя до водила каждого планетарного ряда двумя потоками представлена на рис. 2.

Часть крутящего момента двигателя, передаваемая по механической ветви (через диапазонную коробку, раздаточную коробку механизма поворота, эпициклические шестерню дифференциальных механизмов поворота каждого борта):

$$M_{A(m)i} = \frac{KM_{bi}}{i_{dki} \eta_{dki} i_{rpm} \eta_{rpm} (K+1) \eta_{св}}, \quad (7)$$

где  $M_{bi}$  – крутящий момент на водиле каждого планетарного ряда на  $i$ -м диапазоне, Н·м;  $i_{dki}$  – передаточное число диапазонной коробки на  $i$ -м диапазоне;  $\eta_{rpm}$  – КПД диапазонной коробки на  $i$ -м диапазоне;  $i_{rpm}$  – передаточное число раздаточной коробки механизма поворота;  $\eta_{rpm}$  – КПД раздаточной коробки механизма поворота.

Часть крутящего момента двигателя, передаваемая по гидравлической ветви (через шестерни раздаточной коробки привода насосов, регулируемые насосы, гидроблок, гидромоторы, редукторы гидромоторов, солнечные шестерни дифференциальных механизмов поворота каждого борта):

$$M_{A(r)} = \frac{\varepsilon_{Н} V_{Н} M_{bi}}{i_{рн} \eta_{рн} \eta_{ГМ(Н)} (K+1) \eta_{эв} \varepsilon_{ГМ} V_{ГМ} \eta_{ГМ(ГМ)} i_{ргм} \eta_{ргм}}, \quad (8)$$

где  $\eta_{рн}$  – КПД раздаточной коробки привода насосов;  $\eta_{эв}$  – КПД планетарного ряда от эпицикла до водила.

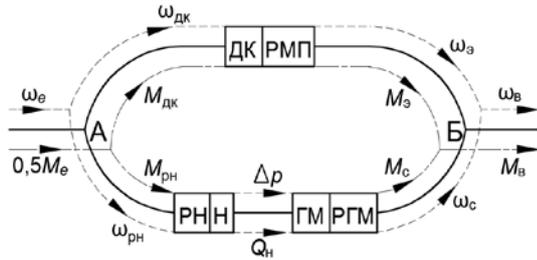


Рис. 2. Схема передачи энергии от двигателя к водиле двумя потоками: А – точка разделения потока; ДК – диапазонная коробка; РМП – раздаточная коробка механизма поворота; РН – то же привода насосов; Н – регулируемый насос; ГМ – нерегулируемый гидромотор; РГМ – редуктор гидромотора; Б – точка суммирования потоков;  $\omega_e, \omega_{дк}, \omega_3, \omega_{рн}, \omega_c, \omega_b$  – угловая скорость: коленчатого вала двигателя, входного вала диапазонной коробки, эпицикла, ведущей шестерни раздаточной коробки привода насосов, солнечной шестерни и водила, соответственно,  $s^{-1}$ ;  $M_e, M_{дк}, M_3, M_{рн}, M_c, M_b$  – крутящий момент на: коленчатом валу двигателя, входном валу диапазонной коробки, эпицикле, ведущей шестерне раздаточной коробки привода насосов, солнечной шестерне и водиле соответственно, Н·м;  $\Delta p$  – давление рабочей жидкости в гидропередаче, МПа;  $Q_n$  – подача рабочей жидкости насосом,  $см^3/мин$

Fig. 2. Scheme of energy transfer from engine to carrier in two streams: А – flow separation point; ДК (DK) – range box; РМП (RMP) – transfer case of rotation mechanism; РН (RN) – transfer case of pump drive; Н (N) – adjustable pump; ГМ (GM) – unregulated hydraulic motor; РГМ (RGM) – gearbox of hydraulic motor; Б (B) – flow summation point;  $\omega_e, \omega_{дк}, \omega_3, \omega_{рн}, \omega_c, \omega_b$  – angular velocity: engine crankshaft, input shaft of range box, epicycle, drive gear of transfer case of pump drive, solar gear and carrier, respectively,  $s^{-1}$ ;  $M_e, M_{дк}, M_3, M_{рн}, M_c, M_b$  – torque on: engine crankshaft, input shaft of range box, epicycle, drive gear of pump drive transfer case, solar gear and carrier, respectively, N·m;  $\Delta p$  – pressure of working fluid in hydraulic transmission, МПа;  $Q_n$  – supply of working fluid by pump,  $см^3/мин$

Суммируя части крутящего момента двигателя, передаваемые по механической (7) и гидравлической (8) ветвям, определим крутящий момент на  $i$ -м диапазоне на водиле каждого планетарного ряда, передаваемый от двигателя:

$$M_{Bi} = 0,5M_e \left/ \left( \frac{K}{i_{рмп} \eta_{рмп} i_{дкi} \eta_{дкi} (K+1) \eta_{эв}} + \right. \right.$$

$$M_{Bi} = 0,5M_e \left/ \left( \frac{K}{i_{рмп} \eta_{рмп} i_{дкi} \eta_{дкi} (K+1) \eta_{эв}} + \right. \right. \quad (9)$$

где  $M_e$  – крутящий момент двигателя, Нм;

Максимальный крутящий момент на водиле, ограничиваемый сцеплением ведущих колес с грунтом, определяется по формуле

$$M_{вmax(ф)} = \frac{0,5G_t \varphi_{max} r_{вк}}{i_{гп} \eta_{гп} \eta_{кв}}. \quad (10)$$

Максимальный крутящий момент на водиле ограничивается также давлением рабочей жидкости в гидропередаче и определяется

$$M_{вmax(\Delta p)} = \frac{\Delta p_{max} (K+1) \eta_{св} \varepsilon_{гм} V_{гм} \eta_{гм(гм)} i_{ргм} \eta_{ргм}}{2\pi}. \quad (11)$$

Перепад давления между гидролинией высокого и низкого давлений силового контура объемной гидропередачи на  $i$ -м диапазоне определяется зависимостью

$$\Delta p = \frac{2\pi M_{Bi}}{(K+1) \eta_{св} \varepsilon_{гм} V_{гм} \eta_{гм(гм)} i_{ргм} \eta_{ргм}}. \quad (12)$$

КПД гидравлической ветви участка трансмиссии от двигателя до водила планетарного ряда

$$\eta_{гд-в} = \eta_{рн} \eta_{гм(н)} \eta_{гм(гм)} \eta_{ргм} \eta_{св}. \quad (13)$$

КПД механической ветви участка трансмиссии от двигателя до водила планетарного ряда на  $i$ -м диапазоне

$$\eta_{мд-вi} = \eta_{дкi} \eta_{рмп} \eta_{эв}. \quad (14)$$

КПД участка трансмиссии от двигателя до водила планетарного ряда на  $i$ -ом диапазоне при одновременной работе двух ветвей

$$\eta_{д-вi} = \frac{2M_{Bi}}{M_e i_{д-вi}}, \quad (15)$$

где  $i_{д-вi}$  – передаточное число двухпоточной части трансмиссии от двигателя до водила на  $i$ -м диапазоне.

КПД трансмиссии на  $i$ -м диапазоне

$$\eta_{три} = \eta_{д-вi} \eta_{кв} \eta_{гп}. \quad (16)$$

Касательная сила тяги трактора на  $i$ -м диапазоне определяется зависимостью

$$F_{ki} = \frac{2M_{Bi} \eta_{кв} i_{гп} \eta_{гп} \eta_{гус}}{r_{вк}}. \quad (17)$$

Крюковая сила на  $i$ -м диапазоне

$$F_{кpi} = F_{ki} - F_f. \quad (18)$$

Коэффициент буксования на  $i$ -м диапазоне

$$\delta_i = - \frac{\ln \left( 1 - \frac{F_{ki}}{G_t \varphi_{max}} \right)}{k}. \quad (19)$$

Тяговый КПД на  $i$ -м диапазоне

$$\eta_{ти} = \eta_{три} \eta_{гус} (1 - \delta) \frac{F_{кpi}}{F_{ki}}. \quad (20)$$

Скорость движения машины задается частотой вращения двигателя и величиной подачи рабочей жидкости в объемной гидropередаче.

Обороты гидромотора

$$n_{\text{ГМ}} = \frac{n_e \varepsilon_n V_n \eta_{\text{об(н)}} \eta_{\text{об(ГМ)}}}{\varepsilon_{\text{ГМ}} V_{\text{ГМ}} i_{\text{рн}}}. \quad (21)$$

Передаточное число двухпоточной части трансмиссии от двигателя до водела на  $i$ -м диапазоне определяется зависимостью

$$i_{\text{д-вн}} = 1 / \left( \frac{K}{(K+1) i_{\text{рмп}} i_{\text{дкi}}} + \frac{\varepsilon_n V_n \eta_{\text{об(н)}} \eta_{\text{об(ГМ)}}}{(K+1) \varepsilon_{\text{ГМ}} V_{\text{ГМ}} i_{\text{рн}} i_{\text{ГМ}}} \right). \quad (22)$$

Передаточное число трансмиссии в целом на  $i$ -м диапазоне

$$i_{\text{тпи}} = i_{\text{д-вн}} i_{\text{ГМ}}. \quad (23)$$

Действительная скорость трактора на  $i$ -м диапазоне

$$v_{\text{ди}} = \frac{\pi n_e r_{\text{вк}} (1 - \delta)}{30 i_{\text{тпи}}}. \quad (24)$$

### Анализ характеристик разработанной трансмиссии трактора

На основании математической модели прямолинейного движения гусеничного трактора с бесступенчатой гидрообъемно-механической трансмиссией (уравнения (3)–(24)) разработана компьютерная программа расчета характеристик трансмиссии и трактора. В качестве исходных данных использовались параметры гусеничного трактора «Беларус 2301» [10] и разработанной трансмиссии. Принято, что двигатель работает на номинальных оборотах и реализует эксплуатационную мощность.

Изменение скорости движения трактора вперед осуществляется изменением параметра регулирования насоса  $\varepsilon_n$  от 0 до 1 и, как следствие, частоты вращения солнечной шестерни планетарного ряда. Возможны следующие режимы работы:

– коронная и солнечная шестерни остановлены ( $\varepsilon_n = 0$ ), трактор также остановлен, далее солнечная шестерня начинает вращение ( $0 < \varepsilon_n < 1$ ), трактор начинает плавно набирать

скорость, двигаясь на I диапазоне, крутящий момент от двигателя до водела передается только по гидравлической ветви;

– солнечная шестерня остановлена ( $\varepsilon_n = 0$ ), в диапазонной коробке включается II, III или IV диапазон, замыкается муфта сцепления, крутящий момент от двигателя до водела передается только по механической ветви, трактор начинает движение на минимальной скорости включенного диапазона. Далее солнечная шестерня вращается по направлению вращения коронной шестерни ( $0 < \varepsilon_n \leq 1$ ), крутящий момент от двигателя до водела передается по механической и гидравлической ветвям, трактор плавно набирать скорость до максимальной на заданном диапазоне.

Движение трактора задним ходом аналогично движению на I диапазоне, только гидромотор и солнечная шестерня вращаются в противоположную сторону ( $-1 \leq \varepsilon_n < 0$ ).

В табл. 1 приведены значения теоретической скорости для серийного трактора [10] и трактора с предлагаемой трансмиссией.

КПД гидравлической ветви (рис. 3) относительно низкий, его максимальное значение на I диапазоне составляет 0,82, на II – 0,76, на III – 0,71, на IV – 0,63. КПД механической ветви на II и IV диапазонах – 0,90, а на III благодаря прямой передаче – 0,94. Учитывая, что большая часть крутящего момента передается по механической ветви (рис. 4), общее максимальное значение КПД двухпоточной передачи составляет на II диапазоне – 0,90–0,84, на III – 0,94–0,88, на IV – 0,90–0,85.

I диапазон не основной, предназначен для выполнения технологических операций на скорости 2–6 км/ч, трактор может развить крюковое усилие 49–76 кН при КПД передачи 0,76–0,82. II и III диапазоны рабочие, предназначены для выполнения основных операций почвообработки. Так, агротехнически допустимая скорость пахотных агрегатов 7–10 км/ч, почвообрабатывающе-посевных 6–12 км/ч [12], трактор будет работать на II диапазоне, может развить крюковое усилие 23–52 кН (рис. 5) при КПД двухпоточной передачи 0,90–0,82.

Таблица 1

Теоретическая скорость тракторов, км/ч  
Theoretical speed of tractors, km/h

Направление	Вперед				Назад	
	I	II	III	IV	I	II
«Беларус 2301», ступенчатого	3,0; 3,72; 4,49; 5,59	5,5; 6,65; 8,02; 10,34	7,78; 9,40; 11,34; 14,62	13,90; 16,79; 20,25; 26,12	4,31; 5,21; 6,28; 8,20	7,70; 9,30; 11,22; 14,47
Бесступенчатая трансмиссия	0–8,1	6,01–14,15	10,13–18,27	18,04–26,18	0–8,1	–

Агротехнически допустимая скорость при культивации 10–15 км/ч [12], трактор будет работать на III диапазоне, может развить крюковое усилие 18–32 кН (рис. 5) при КПД двухпоточной передачи 0,94–0,86. IV диапазон транспортный, движение может осуществляться на скоро-

сти 18–26 км/ч, крюковое усилие 5–15 кН при КПД двухпоточной передачи 0,90–0,63.

Максимальное значение тягового КПД 0,62–0,64 (рис. 6) трактор развивает на II и III диапазонах при крюковом усилии 25–52 кН и буксовании 2,4–6,2 %.

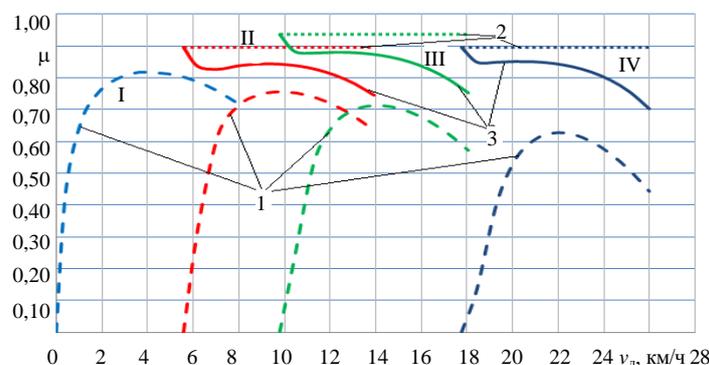


Рис. 3. Зависимость КПД участка трансмиссии (от двигателя до водила планетарного ряда) от действительной скорости движения трактора на I, II, III, IV диапазонах: 1 – гидравлической ветви; 2 – механической ветви; 3 – двух ветвей вместе

Fig. 3. Dependence of efficiency of transmission section (from engine to planetary gear carrier) on actual speed of tractor in ranges I, II, III, IV: 1 – hydraulic branches; 2 – mechanical branches; 3 – two branches together

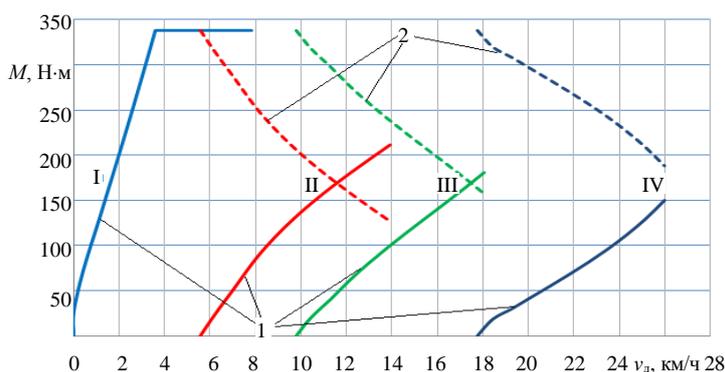


Рис. 4. Зависимость величины крутящего момента двигателя, передающегося по механической и гидравлической ветвям трансмиссии, от действительной скорости движения трактора на I, II, III и IV диапазонах: 1 – по гидравлической ветви; 2 – по механической ветви

Fig. 4. Dependence of torque value of engine transmitted through mechanical and hydraulic branches of transmission on actual speed of tractor in ranges I, II, III and IV: 1 – hydraulic branch; 2 – mechanical branch

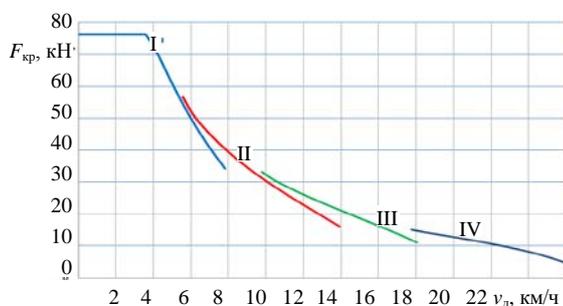


Рис. 5. Величина крюкового усилия и действительной скорости трактора на I, II, III и IV диапазонах

Fig. 5. Value of hook force and actual speed of tractor in ranges I, II, III and IV

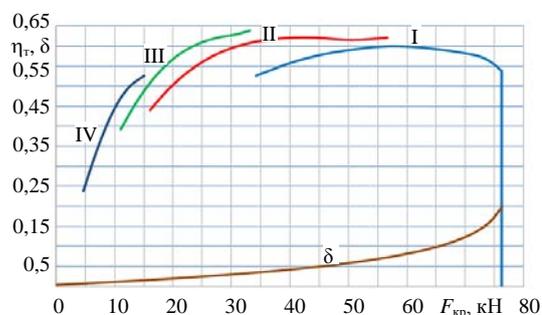


Рис. 6. Зависимость тягового КПД на I, II, III и IV диапазонах и буксования трактора от крюкового усилия

Fig. 6. Dependence of traction efficiency in ranges I, II, III and IV and tractor slipping on hook force

## ВЫВОДЫ

1. Предложена оригинальная конструкция бесступенчатой, в рамках четырех диапазонов, двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссии гусеничного трактора. На первом диапазоне и при движении задним ходом мощность передается по гидравлической ветви трансмиссии. На втором–четвертом диапазонах мощность передается по двум ветвям: механической и гидравлической.

2. Разработана математическая модель для выбора параметров гидромашин, учитывающая их объемный и механический КПД, максимальное давление рабочей жидкости в гидропередаче, максимальные обороты и крутящий момент на валу гидромотора. Разработана программа расчета, реализующая математическую модель, выбраны гидромашин: нерегулируемый гидромотор объемом 40 см<sup>3</sup>/об и регулируемый насос объемом 90 см<sup>3</sup>/об.

3. Разработана математическая модель прямолинейного движения гусеничного трактора с разработанной бесступенчатой гидрообъемно-механической трансмиссией, учитывающая вес трактора, параметры ходовой системы, характеристики двигателя внутреннего сгорания, параметры и КПД гидромашин, редукторов, диапазонной и раздаточных коробок, планетарного ряда и позволяющая определять КПД отдельных ветвей и всей трансмиссии, проводить тяговый расчет трактора. Разработана программа расчета, реализующая математическую модель.

4. Теоретическая скорость движения трактора при работе двигателя на номинальных оборотах составляет: на первом диапазоне 0–8,1 км/ч, на втором – 6,01–14,15 км/ч, на третьем – 10,13–18,27 км/ч, на четвертом – 18,04–26,18 км/ч, на заднем ходу – 0–8,1 км/ч. Максимальный КПД двухпоточной части трансмиссии на первом диапазоне составляет 0,82, на втором – 0,90–0,84, на третьем – 0,94–0,88, на четвертом – 0,90–0,84.

Работа выполнена в рамках договора № Т23УЗБ-045 от 20.11.2023 с БРФФИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ключников, А. В. Тенденции развития трансмиссий колесных тракторов / А. В. Ключников // Техника и оборудование для села. 2012. № 1 (175). С. 43–47.
2. Перспективні трансмісії колісних тракторів / В. Б. Самородов [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. Сер. Автомобіле- та тракторобудування. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. № 10 (1053). С. 3–10.
3. Тенденции развития трансмиссий колесных тракторов сельскохозяйственного назначения / А. С. Романов [и др.] // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 25 февр. 2021 г. / под общ. ред. О. М. Кос-тикова, А. В. Божко. Воронеж: Воронеж. гос. аграрный ун-т им. императора Петра I, 2021. Ч. I. С. 240–242.
4. Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С. Н. Поддубко [и др.]. Минск: Беларус. навука, 2019. 207 с.
5. Щельцын, Н. А. Современные бесступенчатые трансмиссии с.-х. тракторов / Н. А. Щельцын, Л. А. Фрумкин, И. В. Иванов // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 11. С. 18–26.
6. Fendt Tractors [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.fendt.com/int/agricultural-machinery/tractors> Date of access: 12.01.2024.
7. Fendt 900 Vario MT [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://polymya-agro.by/pdf/fendt900mt.pdf>. Дата доступа: 12.01.2024.
8. Самородов, В. Б. Бесступенчатая гидрообъемно-механическая двухпоточная трансмиссия гусеничного трактора / В. Б. Самородов, И. В. Удод, О. И. Деркач // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Транспортное машиностроение. Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. № 18. С. 45–50.
9. Жданович, Ч. И. Выбор диапазона регулирования двухпоточной трансмиссии сельскохозяйственного трактора / Ч. И. Жданович, М. И. Мамонов // Автомобиле- и тракторостроение: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: отв. ред. Д. В. Капский [и др.]. Минск: БНТУ, 2018. Т. 1. С. 176–179.
10. Трактор гусеничный «БЕЛАРУС» 2103 [Электронный ресурс]. Руководство по эксплуатации. Режим доступа: <https://www.mozyrmash.by/upload/iblock/b83/Traktor-gusenichnyy-Belarus-2103-rukovodstvo.pdf>. Дата доступа: 12.01.2024.
11. Трансмиссия гусеничного трактора: полез. модель ВУ 4161 / Ч. И. Жданович, М. И. Мамонов. Оpubл. 28.02.2008.
12. Жданович, Ч. И. Анализ режимов работы трактора общего назначения в составе машинно-тракторного агрегата / Ч. И. Жданович // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. трудов: в 2 т. / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет; редкол.: Т. В. Матюшинец (отв. ред.) [и др.]. Минск: БНТУ, 2023. Т. 1. С. 249–254.
13. Петров, В. А. Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин / В. А. Петров. М.: Машиностроение, 1988. 248 с.
14. Объемные гидромеханические передачи: расчет и конструирование / О. М. Бабаев [и др.]; под общ. ред. Е. С. Кисточкина. Л.: Машиностроение, 1987. 256 с.
15. Шарипов, В. М. Проектирование механических, гидромеханических и гидрообъемных передач тракторов / В. М. Шарипов. М.: МГТУ «МАМИ», 2002. 300 с.
16. Жданович, Ч. И. Выбор параметров двухпоточной трансмиссии: учеб.-метод. пособие для студентов спец. 1-37 01 04 «Многоцелевые гусеничные и колесные машины» / Ч. И. Жданович, М. И. Мамонов. Минск: БНТУ, 2022. 54 с.

17. Городецкий, К. И. Механический КПД объемных гидромашин / К. И. Городецкий // Вестник машиностроения. 1977. №7. С. 19–23.
18. Городецкий, К. И. КПД объемных гидропередач / К. И. Городецкий, А. А. Михайлин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1979. № 9. С. 9–14.
19. Городецкий, К. И. Математическая модель объемных гидромашин / К. И. Городецкий, А. А. Михайлин // Вестник машиностроения. 1981. № 9. С. 14–17.
20. Renius, K. Th. *Fundamentals of Tractor Design* / K. Th. Renius. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 287 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32804-7>.
21. Бойков, В. П. Многоцелевые гусеничные и колесные машины / В. П. Бойков, В. В. Гуськов, В. А. Коробкин. Минск; М.: Новое знание; ИНФРА-М, 2012. 542 с.
- Поступила 16.02.2024  
Подписана в печать 23.04.2024  
Опубликована онлайн 31.05.2024
- REFERENCES
- Klyuchnikov A. V. (2012) Development Trends of Wheeled Tractor Transmissions. *Tekhnika i Oborudovanie dlya Sela* [Machinery and Equipment for Rural Areas], (1), 43–47 (in Russian).
  - Samorodov V. B., Bondarenko A. I., Kozhushko A. P., Pelipenko S. S. Mittsel' M. O. (2014) Prospective Transmissions Of Wheeled Tractors. *Visnik NTU«Khpi»: Zb. Nauk. prats'. Seriya: Avtomobile- ta Traktorobuduvannya* [Bulletin of NTU «KhPI». Series: Car- and Tractorbuilding]. Kharkov, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, iss. 10, 3–10 (in Ukrainian).
  - Romanov A. S., Bozhko A. V., Ozherel'ev V. N., Podorvanov D. A. (2021) Trends in the Development of Transmissions for Agricultural Wheel Tractors. *Tendentsii Razvitiya Tekhnicheskikh Sredstv i Tekhnologii v APK: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Voronezh, 25 fevr. 2021 g. Ch. 1* [Trends in the Development of Technical Means and Technologies in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Voronezh, February 25, 2021. Part 1]. Voronezh, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 240–242 (in Russian).
  - Poddubko S. N., Amel'chenko P. A., Stasilevich A. G., Vityaz' P. A., Dubovik D. A., Vashchula A. V., Zhukovskii I. N., Klyuchnikov A. V. (2019) *Tractors of the 21<sup>st</sup> Century: State and Prospects*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 207 (in Russian).
  - Shchel'tsyn N. A., Frumkin L. A., Ivanov I. V. (2011) Modern Continuously Variable Transmissions of Agricultural Tractors. *Traktory i Selkhoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*, (11), 18–26. (in Russian).
  - Fendt Tractors*. Available at: <https://www.fendt.com/int/agricultural-machinery/tractors> (accessed 12 January 2024).
  - Fendt 900 Vario MT*. Available at: <https://polymya-agro.by/pdf/fendt900mt.pdf> (accessed 12 January 2024) (in Russian).
  - Samorodov V. B., Udod I. V., Derkach O. I. (2011) Stepless Hydrovolumetric-Mechanical Two-Flow Transmission of a Crawler Tractor. *Vestnik Nats. Tekhn. Un-ta “KhPI”*: *Sb. Nauch. Tr. Temat. Vyp.: Transportnoe mashinostroenie* [Bulletin of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Collection of Scientific Works. Thematic Issue: Transport Engineering]. Kharkov, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, iss. 18, 45–50 (in Russian).
  - Zhdanovich Ch. I., Mamonov M. I. (2018) Selection of the Adjustment Range of the Two-Flow Transmission of the Agricultural Tractor. *Avtomobile- i Traktorostroenie: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. T. 1* [Automobile and Tractor Construction: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 176–179 (in Russian).
  - Caterpillar Tractor “BELARUS” 2103. Operation Manual*. Available at: <https://www.mozyrmash.by/upload/iblock/b83/Traktor-gusenichnyy-Belarus-2103-rukovodstvo.pdf> (accessed 12 January 2024) (in Russian).
  - Zhdanovich Ch. I., Mamonov M. I. (2008) *Transmission of a Tracked Tractor*. Utility Model no. BY 4161 (in Russian).
  - Zhdanovich Ch. I. (2023) Analysis of Operating Modes of a General-Purpose Tractor as Part Of a Machine-Tractor Unit. *Avtotraktorostroenie i Avtomobil'nyi Transport: Sb. Nauch. Trudov. T. 1* [Automobile and Tractor Construction and Automobile Transport: Collection of Scientific Works. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 249–254 (in Russian).
  - Petrov V. A. (1988) *Hydrostatic Transmissions of Self-Propelled Vehicles*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 248 (in Russian).
  - Babaev O. M., Ignatov L. N., Kistochkin E. S., Sokolov G. S., Tsvetkov V. A. (1987) *Volumetric Hydro-Mechanical Transmissions: Calculation and Design*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 256 (in Russian).
  - Sharipov V. M. (2002) *Design of Mechanical, Hydro-mechanical and Hydrostatic Transmissions of Tractors*. Moscow, Moscow State University of Mechanical Engineering. 300 (in Russian).
  - Zhdanovich Ch. I., Mamonov M. I. (2022) *Selection of Dual-Flow Transmission Parameters*. Minsk, Belarusian National Technical University. 54 (in Russian).
  - Gorodetsky K. I. (1977) Mechanical Efficiency of Volumetric Hydraulic Machines. *Vestnik Mashinostroeniya*, (7), 19–23 (in Russian).
  - Gorodetsky K. I., Mikhaylin A. A. (1979) Efficiency of Volumetric Hydraulic Transmission. *Traktory i Selkhoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*, (9), 9–14 (in Russian).
  - Gorodetsky K. I., Mikhaylin A. A. (1981) Mathematical Model of Volumetric Hydraulic Machines. *Vestnik Mashinostroeniya*, (9), 14–17 (in Russian).
  - Renius K. Th. (2020) *Fundamentals of Tractor Design*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32804-7>.
  - Boikov V. P., Gus'kov V. V., Korobkin V. A. (2012) *Multi-Purpose Tracked and Wheeled Vehicles*. Minsk, Moscow, Novoe Znanie Publ., INFRA-M Publ. 542 (in Russian).

Received: 16.02.2024

Accepted: 23.04.2024

Published online: 31.05.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-261-266>

УДК 656.131:656.138:656.016:65.011.42:33.338.001.36

## Структурные преобразования затрат на перевозки пассажиров городским электрическим транспортом

Магистр О. А. Синицкая<sup>1)</sup>, Т. А. Дойлидо<sup>1)</sup>, канд. экон. наук, доц. Д. Н. Месник<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский научно-исследовательский институт транспорта «Транстехника» (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Транспортные предприятия Республики Беларусь сегодня находятся на этапе преодоления последствий пандемии COVID-19 и санкционного давления, связанных с особенностями развития ее экономики. Современные условия деятельности предприятий, оказывающих услуги по перевозке пассажиров, диктуют исполнителям услуг ориентироваться на структурное, организационное развитие, на повышение эффективности в удовлетворении изменяющихся запросов потребителей. Достичь экономического результата для такого рода предприятий равнозначно определению рационального соотношения затрат по производственным, материальным, финансовым и трудовым ресурсам в процессе оказания транспортных услуг. Процессы агломерации пассажирских перевозок в пригородном сообщении, урбанизации, а также появление новых технологических средств персональной мобильности усилили перестроение пассажиропотоков в обслуживании автомобильным транспортом общего пользования. В пригородных, городских пассажирских перевозках задействован чаще всего автомобильный и железнодорожный транспорт, реже – внутренний водный транспорт. Перевозки пассажиров осуществляются различными видами наземного транспорта: автобусами и электробусами, троллейбусами и трамваями, автомобилями-такси, а также транспортом, находящимся в личной собственности граждан, конкуренция между которыми зависит от отношения ценовых паритетов перевозчика и уровня доходов потребителей. Этим обусловлена необходимость пересмотра ценовых и неценовых мер гибкого реагирования транспортных перевозчиков пассажиров в процессе оказания социально значимых услуг. В приведенной статье исследована сущность услуг по перевозке пассажиров в регулярном сообщении в границах территории г. Минска применительно к современному уровню развития транспортно-логистической системы Республики Беларусь. Цель проведенного исследования состояла в разработке предложений по расчету стоимости транспортной работы на выполнение перевозок пассажиров на примере парка электрического транспорта г. Минска.

**Ключевые слова:** электрический транспорт, пассажирские перевозки, структура затрат, стоимость социально значимых услуг

**Для цитирования:** Синицкая, О. А. Структурные преобразования затрат на перевозки пассажиров городским электрическим транспортом / О. А. Синицкая, Т. А. Дойлидо, Д. Н. Месник // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 3. С. 261–266. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-261-266>

## Structural Transformations of Passenger Transportation Costs by Urban Electric Transport

V. A. Sinitskaya<sup>1)</sup>, T. A. Doilido<sup>1)</sup>, D. N. Mesnik<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian Research Institute of Transport “Transtekhnika” (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Transport enterprises of the Republic of Belarus today are at the stage of overcoming the consequences of the COVID-19 pandemic and sanctions pressure related to the peculiarities of the development of its economy. Modern operating

**Адрес для переписки**  
Месник Дмитрий Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-75-31  
eut\_atf@bntu.by

**Address for correspondence**  
Mesnik Dmitriy N.  
Belarusian National Technical University  
12, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-75-31  
eut\_atf@bntu.by

conditions for enterprises providing passenger transportation services dictate that service providers focus on structural and organizational development, and on increasing efficiency in meeting the changing demands of consumers. Achieving an economic result for this type of enterprise is equivalent to determining a rational ratio of costs for production, material, financial and labor resources in the process of providing transport services. The processes of agglomeration of passenger transportation in suburban traffic, urbanization, as well as the emergence of technologically new means of personal mobility have intensified restructuring of passenger flows in public transport services. In suburban and urban passenger transportation, road and rail transport is most often involved, and inland water transport is less common. Passenger transportation is carried out by various types of ground transport: buses and electric buses, trolleybuses and trams, taxi cars and also transport owned by citizens, the competition between which depends on the ratio of price parities of a carrier and the level of consumer income. In this regard, it is necessary to revise price and non-price measures of flexible response of transport carriers of passengers in the process of providing socially significant services. This paper examines the essence of services for the transportation of passengers in regular traffic within the boundaries of the territory of Minsk in relation to the current level of development of the transport and logistics system of the Republic of Belarus. The purpose of the study was to develop proposals for calculating the cost of transport work for passenger transportation using the example of the electric transport fleet in Minsk.

**Keywords:** electric transport, passenger transportation, cost structure, cost of socially significant services

**For citation:** Sinitskaya V. A., Doilido T. A., Mesnik D. N. (2024) Structural Transformations of Passenger Transportation Costs by Urban Electric Transport. *Science and Technique*. 23 (3), 261–266. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-261-266> (in Russian)

## Введение

Совершенствование механизма взаимодействия субъектов транспортной деятельности при оказании услуг по перевозке пассажиров городским электрическим транспортом направлено на урегулирование порядка размещения государственного заказа на перевозки согласно действующему законодательству в области городского электрического транспорта, а также на определение порядка экономически обоснованных затрат с учетом действующей маршрутной сети городского электрического транспорта [1–3].

Сформированный порядок возмещения затрат на социально значимые услуги по перевозке пассажиров, находящийся под постоянным давлением изменяющейся рыночной ситуации, в том числе макроэкономических процессов воздействия, вынуждает адаптивно реагировать субъекты транспортной деятельности и прилагать усилия для повышения эффективности их

деятельности. Государственной программой «Транспортный комплекс» на 2021–2025 гг., утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 23.03.2021 № 165 (далее – Государственная программа), обозначены задачи по обеспечению доступности, повышению качества и безопасности услуг городского электрического транспорта [4]. Одним из приоритетов решения задач Государственной программы является обеспечение безубыточной работы транспортных предприятий посредством совершенствования подходов к возмещению экономически обоснованной стоимости затрат на выполнение перевозок пассажиров по регулируемым тарифам [5, 6].

Сеть транспортных маршрутов, сформированных городским электрическим транспортом, охватывает девять крупных городов Республики Беларусь с населением не менее 100 тыс. человек (рис. 1).



Рис. 1. Расположение населенных пунктов с маршрутной сетью городского электрического транспорта Республики Беларусь (Собственная разработка авторов на основании источников [7, 8]):

- – геолокация населенных пунктов с перевозками пассажиров городским электрическим транспортом;
- – геолокация населенных пунктов с перевозками пассажиров трамваями

Fig. 1. Location of settlements with the route network of urban electric transport of the Republic of Belarus (Authors' own development based on the source [7, 8]):

- – geolocation of settlements with the transportation of passengers by urban electric transport;
- – geolocation of settlements with the transportation of passengers by trams

На рис. 1 отмечены: девять населенных пунктов с обслуживанием населения пассажирскими перевозками городским электрическим транспортом; четыре населенных пункта с обустроенной инфраструктурой по предоставлению транспортными предприятиями услуг перевозки пассажиров трамваями, относящимися к экологически чистому виду транспорта. По всем отмеченным городам, за исключением Новополоцка и Мозыря, в числе городского электрического транспорта для перевозки пассажиров используются троллейбусы.

### Основная часть

В Республике Беларусь парк городского электрического транспорта отличается по моделям. Парк трамваев г. Минска, который насчитывает на начало 2023 г. 133 единицы техники, включает такие модели, как АКСМ-60102, АКСМ-843 и АКСМ-743. Так, в структуре трамвайного парка филиала «Трамвайный парк» государственного предприятия «Минсктранс» трамваев модели: АКСМ-60102 – 95,6 %, АКСМ-843 – 3,7 %, АКСМ-743 – одна единица, или 0,7 %.

Троллейбусный парк г. Минска выделяется самой многочисленной в мире сетью маршрутов, протяженностью контактной сети, численностью троллейбусных транспортных средств [9]. По данным Национального статистического комитета Республики Беларусь, ежегодно троллейбусами перевозится примерно 35 % пассажиров г. Минска, и это является третьим показателем по перевозкам пассажиров после автобусов и метро. Всего на начало 2023 г. в парке г. Минска насчитывалось 715 единиц троллейбусов, в том числе модели 321 – 49,1 %; модели 203Т70 – 20,3; модели 333 – 15,7; модели 43300D – 7,0; модели 32102 – 4,3; модели 32100D – 3,5; модель 33305 – 0,1 %. Из общей численности троллейбусного парка г. Минска 37,6 % прошли нормативный ресурс до капитального ремонта и примерно 52,0 % находятся на учете с амортизированным ресурсом. Средний срок эксплуатации троллейбусов г. Минска приблизился к 9,4 года, что в 1,7 раза ниже среднего срока эксплуатации трамваев филиала «Трамвайный парк» государственного предприятия «Минсктранс».

В рамках Государственной программы инновационным решением по развитию пассажирских перевозок экологически чистым видом транспорта особое место отводится электробусам [10, 11]. Прописанное в СТБ 2531–2018 «Перевозка пассажиров. Термины и определе-

ния», ГОСТ 31286–2005 «Транспорт дорожный. Основные термины и определения. Классификация» и других нормативно-правовых документах определение электробуса позволяет выделить его как разновидность автобуса, приводимого в движение электрическим двигателем от внутреннего перезаряжаемого источника энергии [12–14]. Впервые белорусское предприятие ОАО «УКХ «БКМ» в 2016 г. произвело электробусы моделей АКСМ-E420 и E433 Vitovt Electro и Vitovt Max Electro. В дальнейшем конструкторские решения по развитию электробусов отечественными производителями обеспечили рост запаса автономного хода с 12,5 до 50 км. Так, на базе троллейбуса АКСМ-321 представлен городской общественности электробус модели E321, оснащенный суперконденсатором с циклом полной зарядки/разрядки приблизительно 90 тыс. км. ОАО «МАЗ» выпущен в эксплуатацию электробус модели МАЗ 303E10, конструкцией которого предусмотрены литий-железо-фосфатные аккумуляторные батареи, обеспечивающие запас хода электробуса до 300 км. К настоящему времени, по данным государственного предприятия «Минсктранс», в парке городского электрического транспорта насчитывается 93 электробуса, что составляет порядка 11 % от общего количества трамваев и троллейбусов г. Минска.

На рис. 2 представлена структура по срокам эксплуатации таких моделей электробусов в г. Минске, как E321, E321-30, E433, МАЗ-303E10.

Данные рис. 2 свидетельствуют о том, что наибольшее количество задействованных в перевозках пассажиров электробусов пришлось на период эксплуатации 4–5 лет и составило 33,3 %. На период 1–2 года эксплуатации электробусов приходится 2,2 % (на 01.01.2023). Это свидетельствует о значительном замедлении обновления парка городского электрического транспорта по перевозкам пассажиров экологически чистыми видами транспортных средств, такими как электробусы.

Сдерживающими процесс обновления парка городского электрического транспорта г. Минска электробусами отмечены следующие причины: недостаточная развитость инфраструктуры электробусов, требующая значительных инвестиционных вливаний, высокая стоимость электробусов отечественных производителей (препятствует ее снижению импортная составляющая в стоимости производства электробуса), рост спроса на электробусы со стороны зарубежных потребителей, значительные расходы в эксплуатации электробуса и др.

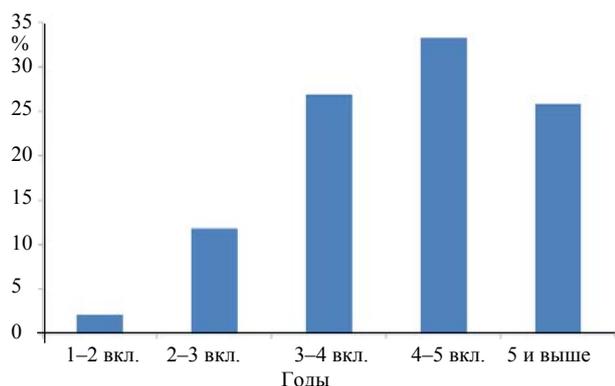


Рис. 2. Структура парка электробусов г. Минска по срокам эксплуатации, % (Собственная разработка авторов на основании источника [7, 8])

Fig. 2. Structure of the electric bus fleet in Minsk by service life, % (Authors' own development based on the source [7, 8])

Исследованием разработаны предложения по формированию статей затрат по видам городского электрического транспорта. На рис. 3 приведена структура затрат на перевозку пассажиров с учетом особенностей эксплуатации городского электрического транспорта и электробусов в регулярном сообщении г. Минска.

Исследование структуры затрат на перевозку пассажиров городским электрическим транспортом Минска свидетельствует о том, что наибольший удельный вес в общем объеме затрат приходится на заработную плату, который составил: по трамваям – 36,4 %, троллейбусам – 42,9 %, электробусам – 45 %; отчисления на социальное страхование – 13,2, 15,9, 6,2 %, соответственно.

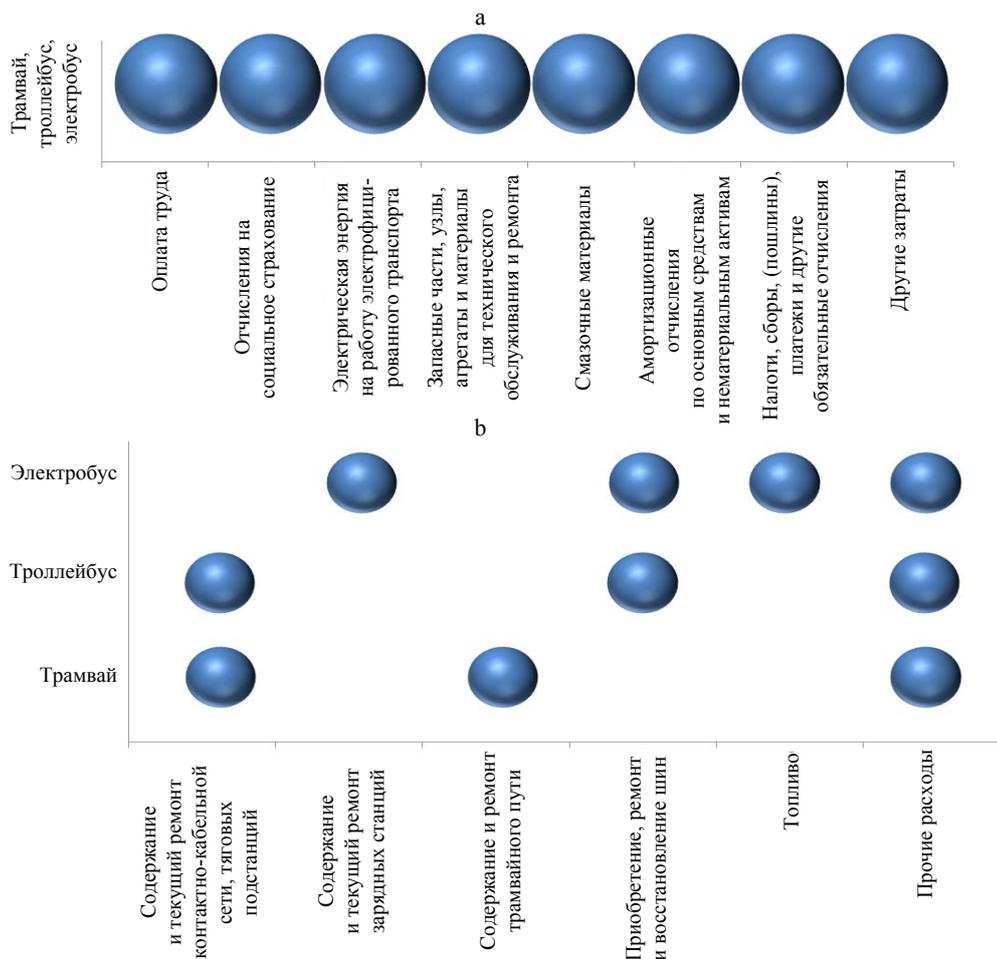


Рис. 3. Структура затрат по видам городского электрического транспорта (кроме железнодорожного и метро) в разрезе статей: а – основных; б – других затрат (Собственная разработка авторов на основании источника [7, 8])

Fig. 3. Cost structure by type of urban electric transport (except railway and metro) in the context of: a) main expense items; b) other cost items (Authors' own development based on the source [7, 8])

Следует отметить значительный удельный вес по статье «Электроэнергия на работу электрифицированного транспорта»: по трамваям – 13,5 %, троллейбусам – 15,0 %, электробусам – 9,3 %. Как видно из рис. 3б, затраты по видам городского электрического транспорта по статье «Содержание и текущий ремонт контактно-кабельных сетей, тяговых электрических подстанций» по трамваям составили 5,0 %, троллейбусам – 10,9 %; «Содержание и текущий ремонт зарядных станций» по электробусам – 6,9 %; «Содержание и ремонт трамвайного пути» – 14,9 %; «Прочие затраты» по трамваям – 11,7 %, троллейбусам – 10,3 %, электробусам – 12,8 %.

Традиционно группировка затрат по элементам способствует изучению влияния технического прогресса на структурные преобразования затрат на перевозку пассажиров городским электрическим транспортом. Считается, что электрический транспорт относится к высокому уровню развития технического прогресса. В связи с этим следует ожидать, что доля затрат на оплату труда будет сокращаться при одновременном росте доли амортизационных отчислений по основным средствам и нематериальным активам в общей структуре затрат. С другой стороны, оплата труда является составляющей добавленной стоимости, то есть показателя, характеризующего результативность деятельности транспортного предприятия. В этом случае наблюдается отклонение от общепринятого понимания: чем выше уровень технического прогресса, тем более высокая результативность работы предприятий. Имеет место баланс между достаточным уровнем результативности и уровнем развития технического прогресса, выраженного долей амортизационных отчислений по основным средствам и нематериальным активам в общей структуре затрат по оказанию услуг перевозки пассажиров. Определенно этот баланс служит критерием использования потенциальных возможностей хозяйствующего субъекта.

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны предложения по формированию статей затрат по видам городского электрического транспорта г. Минска.

2. Практическая значимость полученных результатов предусматривает достижение экономического и социального эффекта при оказании услуг по перевозке пассажиров городским электрическим транспортом, чему сегодня способствуют экономические условия обоснования объемов государственных субсидий и порядка оплаты транспортной работы при выполнении

перевозок пассажиров в регулярном сообщении доступным потребителю электрическим транспортом.

3. В практической деятельности транспортных предприятий в основе управления затратами лежат профессиональные навыки их персонала в умении экономить ресурсы (ресурсосбережение, энергосбережение), освоении новых методов стандартизации в соответствии с основными положениями Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 гг. в контексте Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. [16].

4. Разработанные предложения направлены на совершенствование порядка оплаты транспортной работы с использованием электрического транспорта, а также учитывают приведение в соответствие затраты на услуги пассажирских перевозок городским электрическим транспортом при условии обоюдно выгодного соблюдения баланса интересов потребителей и перевозчика с точки зрения эффективного использования бюджетных средств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке / Д. В. Капский [и др.] // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 2. С. 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157>.
2. О реализации постановления Совета Министров Республики Беларусь, 11 янв. 2023 г., № 22 [Электронный ресурс]: постановление Министерства транспорта и коммуникаций, 19 янв. 2023 г., № 4. Режим доступа: [https://base.spinform.ru/show\\_doc.fwx/show\\_doc.fwx?rgn=147818](https://base.spinform.ru/show_doc.fwx/show_doc.fwx?rgn=147818).
3. О проведении эксперимента по оплате транспортной работы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 11 янв. 2023 г., № 22. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22300022>. Дата доступа: 28.05.2023.
4. О Государственной программе «Транспортный комплекс» на 2021–2025 гг. [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23 марта 2021, № 165. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100165&p1=1>. Дата доступа: 09.07.2023.
5. Месник, Д. Н. Рынок пассажирских перевозок Республики Беларусь: развитие, структурные изменения, тенденции / Д. Н. Месник, Т. В. Пильгун, О. И. Мойсак // Новая экономика. 2021. № 1 (77). С. 68–80.
6. Структура пассажирооборота в 2021 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/sovместnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/h-passazhirooborot/h-1-passazhirooborot/>. Дата доступа: 20.12.2022.
7. Статистический ежегодник 2020 / Нац. стат. комитет Респ. Беларусь. Минск: Информационно-вычислитель-

- ный центр Национального статистического комитета Республики Беларусь, 2020. 436 с.
8. Транспорт в Республике Беларусь 2020 / Нац. стат. комитет Респ. Беларусь. Минск: Информационно-вычислительный центр Национального статистического комитета Республики Беларусь, 2020. 23 с.
  9. История минского троллейбуса [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://tochka.by/articles/life/po\\_prospektu\\_nezavisimosti\\_snova\\_ezdyat\\_trolleybusy\\_video/](https://tochka.by/articles/life/po_prospektu_nezavisimosti_snova_ezdyat_trolleybusy_video/). Дата доступа: 09.07.2023.
  10. Месник, Д. Н. Экономико-организационный механизм стимулирования развития экологически чистых технологий на транспорте / Д. Н. Месник, Д. А. Вечёрко // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 3. С. 248–255. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-248-255>.
  11. Месник, Д. Н. Развитие транспортно-логистической системы в условиях формирования инновационной экономики / Д. Н. Месник. Минск: БНТУ, 2023. 282 с.
  12. Об утверждении Правил перевозок пассажиров городским электрическим транспортом и Правил перевозок пассажиров метрополитеном [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 22 нояб. 2014 г., № 1088 (в ред. от 12 нояб. 2020 г., № 642). Режим доступа: <https://minsktrans.by/wp-content/uploads/2021/03/1088.pdf>.
  13. О некоторых вопросах автомобильных перевозок пассажиров [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, № 972, 30 июня 2008 г. Режим доступа: <http://vitoperator.by/normativnyye-dokumenty>. Дата доступа: 12.07.2023.
  14. О городском электрическом транспорте и метрополитене [Электронный ресурс]: Закон Респ. Беларусь, 05 мая 2014 г., № 141-З. Режим доступа: <http://vitoperator.by/normativnyye-dokumenty>. Дата доступа: 12.07.2023.
  15. Перевозка пассажиров. Термины и определения: СТБ 2531–2018. Минск: Госстандарт, 2018. 60 с.
  16. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. / Национальная комиссия по устойчивому развитию Республики Беларусь; редкол.: Я. М. Александрович [и др.]. Минск: Юнипак, 2014. 132 с.
- Поступила 15.08.2023  
Подписана к печати 15.10.2023  
Опубликована онлайн 31.05.2024
- REFERENCES
1. Kapskiy D. V., Kuzmenko V. N., Krasilnikava A. S., Semchenkov S. S., Kot E. N., Larin O. N. (2022) Analysis of Development of Various Types of Urban Electric Transport in Polotsk and Novopolotsk. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 21 (2), 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157> (in Russian).
  2. *About implementation of the Resolution of Council of Ministers of the Republic of Belarus of January 11, 2023 No 22*. Resolution of the Ministry of Transport and Communications of January 19, 2023 No 4. Available at: [https://base.spinform.ru/show\\_doc.fwx/show\\_doc.fwx?rgn=147818](https://base.spinform.ru/show_doc.fwx/show_doc.fwx?rgn=147818) (in Russian).
  3. *About Carrying Out Experiment on Payment for Transport Work*. Resolution of Council of Ministers of the Republic of Belarus of January 11, 2023 No 22. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22300022> (accessed 28 May 2023) (in Russian).
  4. *On the State Program "Transport Complex" for 2021–2025*. Resolution of Council of Ministers of the Republic of Belarus of March 23, 2021 No. 165. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100165&p1=1> (accessed 09 July 2023) (in Russian).
  5. Mesnik D. N., Pilgun T. V., Moisaok O. I. (2021) Passenger Transportation Market of the Republic of Belarus: Development, Structural Changes, Trends. *Novaya Ekonomika [New Economics]*, (1), 68–80 (in Russian).
  6. *Passenger Turnover Structure in 2021*. Available at: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makro-ekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/sovместnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/h-passazhirooborot/h-1-passazhirooborot/> (accessed 20 December 2022) (in Russian).
  7. National Statistical Committee of the Republic of Belarus (2020) *Statistical Yearbook 2020*. Minsk, Information and Computing Center of the National Statistical Committee of the Republic of Belarus. 436 (in Russian).
  8. National Statistical Committee of the Republic of Belarus (2020) *Transport in the Republic of Belarus 2020*. Minsk, Information and Computing Center of the National Statistical Committee of the Republic of Belarus. 23 (in Russian).
  9. *History of the Minsk Trolleybus*. Available at: [https://tochka.by/articles/life/po\\_prospektu\\_nezavisimosti\\_snova\\_ezdyat\\_trolleybusy\\_video/](https://tochka.by/articles/life/po_prospektu_nezavisimosti_snova_ezdyat_trolleybusy_video/) (accessed 09 July 2023) (in Russian).
  10. Mesnik D. N., Vecherko D. A. (2023) Economic and Organizational Mechanism for Stimulating Development of Environmentally Friendly Technologies in Transport. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (3), 248–255. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-248-255> (in Russian).
  11. Mesnik D. N. (2023) *Development of the Transport and Logistics System in the Context of the Formation of an Innovative Economy*. Minsk, Belarusian National Technical University. 282 (in Russian).
  12. *On Approval of the Rules for the Transportation of Passengers by Urban Electric Transport and the Rules for the Transportation of Passengers by Metro*: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus Dated November 22, 2014 No 1088: Edited on November 12, 2020 No 642. Available at: <https://minsktrans.by/wp-content/uploads/2021/03/1088.pdf> (in Russian).
  13. *On Some Issues of Road Transportation of Passengers. Dated June 30, 2008*. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus No 972. Available at: <http://vitoperator.by/normativnyye-dokumenty> (accessed 12 July 2023) (in Russian).
  14. *On Urban Electric Transport and Metro*. Law of the Republic of Belarus dated 05.05.2014 No 141-Z. Available at: <http://vitoperator.by/normativnyye-dokumenty> (accessed 12 July 2023) (in Russian).
  15. STB 2531–2018. *Transportation of Passengers. Terms and Definitions*. Minsk, Gosstandart Publ. 60 (in Russian).
  16. National Commission for Sustainable Development of the Republic of Belarus (2014) *National Strategy for Sustainable Socio-Economic Development of the Republic of Belarus for the Period Until 2030*. Minsk, Unipak Publ. 132 (in Russian).
- Received: 15.08.2023  
Accepted: 15.10.2023  
Published online: 31.05.2024