

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал

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

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет



Science and Technique

International
Scientific and Technical Journal

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

Vol. 21 / No 6 / 2022

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Геодезия и разработка полезных ископаемых

- Петровский Б. И., Поляков А. Л.,
Мисников В. А., Шафиков М. Г.**
Слоевая выемка Третьего калийного пласта
с уменьшенной мощностью
межслоевой потолочины 455

Машиностроение и машиноведение

- Пумпур В. А., Анисович А. Г., Барановский К. Э.,
Дувалов П. Ю., Андриенко В. М.**
О применении внутренних источников
теплотвода при получении отливок
из износостойких хромистых чугунов 464

Приборостроение

- Багдюн А. А., Соломахо В. Л.**
Методы и технические средства обеспечения
единства измерений размера наночастиц 473

CONTENTS

Geodesy and Mining

- Piatrouski B. I., Paliakou A. L.,
Misnikou V. A., Shafikau M. G.**
Layered Excavation of the Third Potash Seam
with Reduced Thickness
of Interlayer Ceiling 455

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Pumpur V. A., Anisovich A. G., Baranouski K. E.,
Duvalau P. Yu., Andryienka V. M.**
On Application of Internal Heat Sink Sources
when Producing Castings from Wear-Resistant
Chromium Cast Iron. 464

Instrumentation Engineering

- Bagdun A. A., Solomakho V. L.**
Methods and Technical Means for Ensuring
Uniformity of Nanoparticle Size Measurements 473

Строительство

Михневич Э. И., Ли Цзэмин

Методика расчета подачи воды на орошение
из водохранилищ многофункционального
назначения (на примере Китая и Беларуси) 480

Zhang Qing, Romaniuk V. N., Aliakseyeu Yu. G.,
Hou Qiang

Thermodynamic Approaches in Assessing Quality,
Efficiency and Environmental Friendliness
of Asphalt Concrete
(Чжан Цин, Романюк В. Н., Алексеев Ю. Г.,
Хоу Цян
Термодинамические подходы
при оценке качества, эффективности
и экологичности асфальтобетона) 490

Садовская Е. А., Леонович С. Н.

Оптимизация состава нанофибробетона
по вязкости разрушения
модификацией матрицы 499

Каюмов А. К., Зиневич С. И., Ковалев Я. Н.

Основания дорожных одежд
из вторичных материалов 504

Черноиван В. Н., Черноиван Н. В.

Тепловая реабилитация фасадов
эксплуатируемых панельных зданий 511

Транспорт

Kapskiy D. V., Larin O. N.,

Nguyen Thi Thu Huong, Khmel'nitskaya L. V.

Organization of Logistics Operations
for Transportation of Household Electronic
Waste in Cities
(Капский Д. В., Ларин О. Н., Нгуен Тхи Тху
Хыонг, Хмельницкая Л. В.
Организация логистических операций
при перевозке электронных бытовых отходов
в городах) 517

Экономика промышленности

Ху Минцзюнь, Устинович И. В.

Оценка роли кадрового потенциала
в повышении конкурентоспособности
промышленных организаций при переходе
на «Индустрию 4.0» 525

ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ
В ЖУРНАЛЕ «НАУКА И ТЕХНИКА»
В 2022 г.

Тематический указатель 535

Civil and Industrial Engineering

Mikhnevich E. I., Li Ziming

Methodology for Calculating Water Supply
for Irrigation from Reservoirs of Multifunctional
Purpose (on the Example of China and Belarus) 480

Zhang Qing, Romaniuk V. N., Aliakseyeu Yu. G.,
Hou Qiang

Thermodynamic Approaches in Assessing Quality,
Efficiency and Environmental Friendliness
of Asphalt Concrete 490

Sadovskaya E. A., Leonovich S. N.

Optimization of Composition of Nanofiber
Concrete in Terms of Fracture Toughness
by Matrix Modification 499

Kayumov A. K., Zinevich S. I., Kovalev Y. N.

Pavement Bases from
Recycled Materials 504

Chernoivan V. N., Chernoivan N. V.

Thermal Rehabilitation of Facades
of Operated Panel Buildings 511

Transport

Kapskiy D. V., Larin O. N.,

Nguyen Thi Thu Huong, Khmel'nitskaya L. V.

Organization of Logistics Operations
for Transportation of Household Electronic
Waste in Cities 517

Economy in Industry

Hu Minqjun, Ustsinovich I. V.

Assessment of the Role of Human Resources
in Enhancing Competitiveness
of Industrial Organizations in the Transition
to Industry 4.0 525

LIST OF PAPERS PUBLISHED
IN "SCIENCE AND TECHNIQUE" JOURNAL
IN 2022

Thematic Index 535

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

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

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

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

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

Ответственный секретарь редакционной коллегии
В. Г. Горбаш

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

Executive Secretary of Editorial Board
V. G. Gorbash

Ведущий стилистический редактор

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

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

Тел. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by

<http://sat.bntu.by>

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

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

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 30.11.2022. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,0. Уч.-изд. л. 10,34. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022

Leading Style Editor

V. N. Guryanichyk

Address

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

Tel. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by

<http://sat.bntu.by>

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-455-463>

УДК 622.224.24:622.274.52(047.31)(476)

Слоевая выемка Третьего калийного пласта с уменьшенной мощностью межслоевой потолочины

Докт. техн. наук, проф. Б. И. Петровский¹⁾, канд. техн. наук, доц. А. Л. Поляков¹⁾,
канд. техн. наук В. А. Мисников²⁾, М. Г. Шафиков²⁾

¹⁾Филиал Белорусского национального технического университета (г. Солигорск, Республика Беларусь),

²⁾Научно-производственное унитарное предприятие «Институт горного дела»
(г. Солигорск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Третий калийный пласт Старобинского месторождения в основном отрабатывается по технологии слоевой выемки. Сущность технологии заключается в опережающей выемке верхней лавой сильвинитового слоя 4 и совместной выемке отстающей нижней лавой слоев 2, 2–3 и 3 под защитой межслоевой пачки каменной соли 3–4 (потолочины), оставляемой в выработанном пространстве. Мощность потолочины в соответствии с требованиями нормативного документа должна составлять не менее 0,8 м. В то же время на шахтном поле рудника Третьего рудоуправления имеются участки с уменьшенной до 0,66–0,70 м мощностью потолочины. Целью исследований авторов являлось определение возможности безопасной отработки Третьего калийного пласта по технологии слоевой выемки с уменьшенной мощностью потолочины. В процессе натурального эксперимента изучены геологическое строение и прочностные свойства пород потолочины, ее устойчивость в призабойном пространстве и интенсивность нагружения забойной крепи нижних лав. Методы исследования включали также анализ литературных источников и статистическую обработку полученных данных. Установлено, что уменьшение мощности потолочины на 0,10–0,14 м от требуемой не оказывает существенного влияния на ее прочность, при этом она сохраняет устойчивость в призабойном пространстве нижних лав. Основные показатели проявления горного давления в исследуемых нижних лавах – скорость нарастания забойной крепи в очистных циклах и опускание кровли в призабойном пространстве – не превышали аналогичные показатели в лавах с требуемой мощностью потолочины. Полученные данные свидетельствуют о возможности безопасной отработки Третьего калийного пласта по технологии слоевой выемки при мощности межслоевой пачки каменной соли 3–4 не менее 0,66 м. При этом несущая способность забойной крепи должна составлять не менее 550 кН/м².

Ключевые слова: горно-геологические условия, горное давление, призабойное пространство, лава, потолочина, забойная крепь, статистическая обработка данных

Для цитирования: Слойная выемка Третьего калийного пласта с уменьшенной мощностью межслоевой потолочины / Б. И. Петровский [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 455–463. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-455-463>

Layered Excavation of the Third Potash Seam with Reduced Thickness of Interlayer Ceiling

B. I. Piatrouski¹⁾, A. L. Paliakou¹⁾, V. A. Misnikou²⁾, M. G. Shafikau²⁾

¹⁾Branch of the Belarusian National Technical University (Soligorsk, Republic of Belarus),

²⁾Research and Production Unitary Enterprise “Institute of Mining” (Soligorsk, Republic of Belarus)

Abstract. The third potash seam of the Starobinsky deposit is mainly mined using the layered mining technology. The essence of the technology lies in the advance excavation of the 4th sylvinite layer by the upper lava and the joint excavation

Адрес для переписки

Мисников Владимир Аркадьевич
Научно-производственное
унитарное предприятие «Институт горного дела»
ул. Козлова, 69,
223710, г. Солигорск, Республика Беларусь
Тел.: +375 174 26-28-47
sigd@list.ru

Address for correspondence

Misnikou Vladimir A.
Research and Production Unitary Enterprise
“Institute of Mining”
69, Kozlova str.,
223710, Soligorsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 174 26-28-47
sigd@list.ru

of layers 2, 2–3 and 3 by the lagging lower lava under the protection of the interlayer pack of rock salt 3–4 (ceiling) left in the goaf. The thickness of the ceiling in accordance with the requirements of the regulatory document should be at least 0.8 m. At the same time, in the mine field of the mine of the Third Mine Administration, there are areas with a ceiling thickness reduced to 0.66–0.70 m. The purpose of the author's research was to determine the possibility of safe mining of the Third potash seam using the layered mining technology with a reduced thickness of the ceiling. In the course of a full-scale experiment, the geological structure and strength properties of the rocks of the ceiling, its stability in the bottomhole space and the intensity of loading of the bottomhole lining of the lower lavas have been studied in the paper. The research methods also included the analysis of literary sources and statistical processing of the obtained data. It has been established that a decrease in the thickness of the ceiling by 0.10–0.14 m from the required one does not have a significant effect on its strength, while it remains stable in the near-bottom space of the lower longwalls. The main indicators of the manifestation of rock pressure in the studied lower longwalls – the rate of increase of the bottomhole lining in the stope cycles and the lowering of the roof in the bottomhole space – did not exceed the similar indicators in the longwalls with the required thickness of the ceiling. The obtained data indicate the possibility of safemining of the Third potash seam using the layered excavation technology with the thickness of the interlayer rock salt pack 3–4 not less than 0.66 m. In this case, the bearing capacity of the bottomhole lining should be at least 550 kN/m².

Keywords: mining and geological conditions, rock pressure, bottomhole space, lava, ceiling, bottom hole support, statistical data processing

For citation: Piatrouski B. I., Paliakou A. L., Misnikou U. A., Shafikau M. G. (2022) Layered Excavation of the Third Potash Seam with Reduced Thickness of Interlayer Ceiling. *Science and Technique*. 21 (6), 455–463. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-455-463> (in Russian)

Введение

Слоевая выемка является основным вариантом отработки Третьего калийного пласта Старобинского месторождения. По этой технологии вначале верхней лавой отрабатывается сильвинитовый слой 4, а затем нижней лавой с различным разрывом во времени отрабатываются одновременно сильвинитовые слои 2 и 3 с межслоевым прослоем каменной соли 2–3 общей мощностью 1,7–2,4 м [1–7]. Роль перекрытия для нижней лавы от обрушенных пород кровли пласта после опережающей выемки сильвинитового слоя 4 выполняет межслоевая пачка каменной соли 3–4 (потолочина), мощность которой в соответствии с требованиями нормативного документа должна составлять не менее 0,8 м [8].

В восточной и северо-восточной частях шахтного поля рудника Третьего рудоуправления (3 РУ) ОАО «Беларуськалий» встречаются участки, где слой каменной соли 3–4 Третьего калийного пласта имеет мощность 0,66–0,70 м. При такой мощности потолочины возможно ее разрушение в призабойном пространстве нижней лавы с образованием вывалов. В связи с этим на руднике 3 РУ были проведены исследования, целью которых являлось определение возможности безопасной отработки запасов нижними слоевыми лавами при уменьшенной мощности потолочины [9].

В задачи исследований входило изучение геологического строения и физико-механических свойств пород, слагающих межслоевую пачку каменной соли 3–4 в ненадработанном и надработанном массивах, а также характера нагружения призабойного пространства нижних лав № 3–12 и 3–13, деформируемости, нарушенности и устойчивости уменьшенной потолочины на различных участках по длине выемочных столбов 4 «А» и 17 «А», отрабатываемых соответственно лавами № 3–12 и 3–13 с определением фактической удельной нагрузки на забойную крепь от горного давления.

Характеристика объектов исследований

План горных выработок в северо-восточной и восточной частях шахтного поля рудника 3 РУ с полями и изолиниями мощности слоя 3–4, построенными в корпоративной геоинформационной системе MapManager, представлен на рис. 1 [10]. Для построения полей и изолиний использовали данные 40 скважин подземного разведочного бурения. Как видно из рисунка, на данном участке в пределах выемочных столбов наблюдаются четыре области с уменьшением мощности потолочины до 0,66–0,70 м. Нижние слоевые лавы на этих участках для сохранения потолочины в 0,8 м могут оставлять часть сильвинитового слоя 3. Однако для этого без замены режущих органов очистных комбайнов потребуется прихватывать породы

галита из слоя 2–3. Все это способствовало бы увеличению потерь полезного компонента и разубоживанию отбиваемой руды. С учетом изложенного было принято решение о выемке лавами № 3–12 и 3–13 слоев 2, 2–3 и 3 на данных участках на полную мощность с условием научного сопровождения работ. Сопровождение включало в себя проведение как предварительных исследований геологического строения и прочностных свойств пород потолочины, так и исследований характера ее поведения в лавах в процессе очистки выемки.

При проведении предварительных исследований уточнялись условия залегания и прочностные свойства пород, слагающих потолочину. Для этого в кровле подготовительных выработок, находящихся за зоной временного опорного давления нижних лав, бурили скважины с отбором керна, из которого впоследствии в соответствии с требованиями [11] изготавливали образцы и проводили их испытания на прочность при одноосном сжатии. При отборе керна осуществляли описание геологического строения потолочины, в процессе которого определяли тип и характеристики пород

по классификации устойчивости [12]. Бурение скважин и отбор керна осуществляли как на ненадработанных, так и на надработанных лавами при выемке сильвинитового слоя 4 участках выемочных столбов 4 «А» и 17 «А». Результаты статистической обработки данных прочности пород слоя 3–4 на одноосное сжатие в выемочных столбах лав № 3–12 и 3–13 представлены в табл. 1. В табл. 2 приведены результаты исследований геологического строения и прочностных свойств слоя каменной соли 3–4 в северо-восточной и восточной частях шахтного поля рудника 3 РУ.

Исследования проявлений горного давления и устойчивости потолочины в процессе очистной выемки проводили непосредственно в призабойном пространстве упомянутых выше двух нижних слоевых лав № 3–12 и 3–13, расположенных соответственно в северо-восточной и восточной частях шахтного поля рудника 3 РУ. Анализ выполняли двумя методами. Первый основывался на периодических (1–2 раза в неделю) исследованиях при посещении лав сотрудниками, второй заключался в проведении круглосуточных исследований.

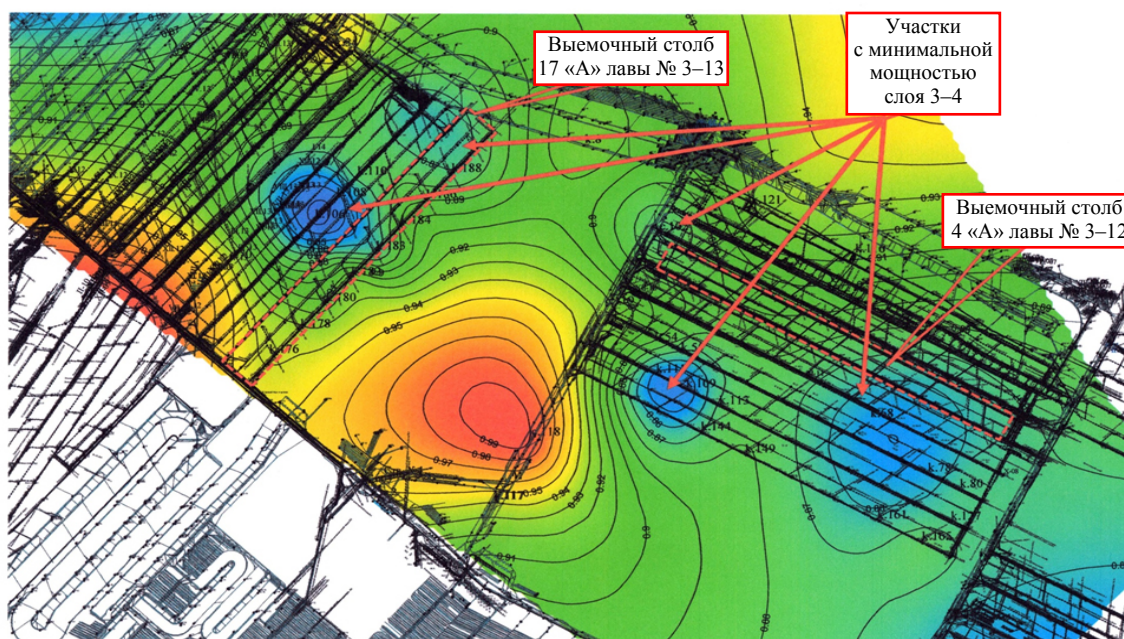


Рис. 1. Северо-восточная и восточная части шахтного поля на Третьем калийном пласте рудника Третьего рудоуправления с полями и изолиниями мощности слоя 3–4, построенными в геоинформационной системе MapManager

Fig. 1. North-eastern and eastern parts of the mine field on the Third potash seam of mine of the Third mining department with fields and isolines of layer 3–4 thickness built in the MapManager geoinformation system

Таблица 1

Результаты статистической обработки данных прочности пород слоя 3–4 на одноосное сжатие в выемочных столбах лав № 3–12 и 3–13

Results of statistical processing of data on the strength of rocks in layer 3–4 for uniaxial compression in extraction columns of lavas No 3–12 and 3–13

Номер скважины, наименование участка бурения скважин	Количество испытанных образцов n , шт.	Средний предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Среднее квадратическое отклонение Δ , МПа	Коэффициент вариации V , %	Заданная относительная погрешность ε , %	Отношение ε/V	Надежность α , %
Лава № 3–12							
Скважины № 1–3 в ненадработанном массиве	10	23,0	4,40	19,16	20	1,04	99
Скважины № 4–6 в надработанном массиве	13	20,5	7,00	33,94	20	0,59	94
Лава № 3–13							
Скважины № 4–8 в ненадработанном массиве	13	21,6	2,66	12,28	20	1,63	100
Скважины № 1–3 в надработанном массиве	13	21,8	3,36	15,43	20	1,30	100

Таблица 2

Результаты исследований геологического строения и прочностных свойств слоя каменной соли 3–4 в северо-восточной и восточной частях шахтного поля рудника Третьего рудоуправления

Results of studies of the geological structure and strength properties of the rock salt layer 3–4 in the north-eastern and eastern parts of the mine field of mine of the Third mining department

Наименование панели или выемочного столба (лавы)	Характеристика прочных слоев			Среднее содержание слабых прослоек η , %	Прочность на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$, МПа
	Суммарная мощность $\Sigma m_{гс}$, см	Количество слоев n , шт.	Средняя мощность $\Sigma m_{гс}/n$, см		
Ненадработанный массив					
Выемочный столб 4 «А» (лава № 3–12)	60,0	5	12,00	18,80	23,0
Выемочный столб 17 «А» (лава № 3–13)	60,4	9	6,71	29,70	21,6
Надработанный массив					
Выемочный столб 4 «А» (лава № 3–12)	60,0	5	12,00	18,80	20,5
Выемочный столб 17 «А» (лава № 3–13)	70,5	11	6,41	21,60	21,8

Горнотехнические условия отработки лавами № 3–12 и 3–13 соответствующих им выемочных столбов 4 «А» и 17 «А», а также условия проведения в них исследований представлены в табл. 3. Для повышения безопасности ведения горных работ в данных лавах использовали забойную крепь высокого рабочего сопротивления МХП-14/22 с уплотненным до 1,75 м шагом установки секций. Расчетная несущая способность забойной крепи при этом

составляла 710 кН/м². Вид призабойного пространства лав показан на рис. 2.

Шахтные исследования по первому методу заключались в следующем. При каждом посещении лав сотрудниками выполнялся комплекс инструментальных и визуальных наблюдений, включающий:

а) снятие показаний давления в гидростойках забойной крепи по штатным манометрам-индикаторам с указанием интервала времени

между передвижкой крепи и произведенным замером (T_3);

б) контроль исправности крепи с пометкой неисправных гидростоек или манометров-индикаторов;

в) измерение ширины призабойного пространства (B_3) и величины зависания породной консоли за крепью (δ_3) лазерной рулеткой РД-32 в заранее выбранных местах по длине лавы;

г) изучение состояния кровли в призабойном пространстве лавы и характера ее обрушения за крепью визуальным способом, а также с помощью фотографирования;

д) измерение отхода лавы по одному из бортовых штреков.

Обработку данных, полученных после каждого посещения шахты, осуществляли путем построения графиков изменения сопротивления гидростоек всех секций забойной крепи и величины зависания кровли за крепью δ_3 по длине лавы, а также вычисления средних значений сопротивления секции крепи Q_{ϕ} , скорости нарастания сопротивления гидростоек крепи v_p , ширины призабойного пространства B_3 и зависания кровли за крепью δ_3 .

Таблица 3

Условия отработки выемочных столбов 4 «А» и 17 «А» лавами № 3–12 и 3–13 и проведения в них исследований
Conditions for working out mining pillars 4 “A” and 17 “A” with longwalls No 3–12 and 3–13 and conducting research in them

Наименование условия отработки	Лава № 3–12	Лава № 3–13
Средняя глубина залегания выемочного столба, м	770	759
Длина выемочного столба, м	3040,0	2322,0
Длина лавы, м	221,0	267,7
Длина надработанного участка лавы, м	185,5	183,7
Вынимаемая мощность (средняя), м	1,96	1,95
Длина надрабатываемой верхней лавы, м	200,0	200,0
Разрыв во времени от отработки верхних лав, лет	12–13	8–9
Интервал отметок отхода лав от монтажного штрека, м, на которых проводились исследования по методу: первому второму	2041–2380 2244–2318	1271–1440 1320–1385
Удаленность от конвейерного штрека лавы участка (замерного профиля) с проводившимися исследованиями по второму методу, м	100–115 (107)	127–149 (135)

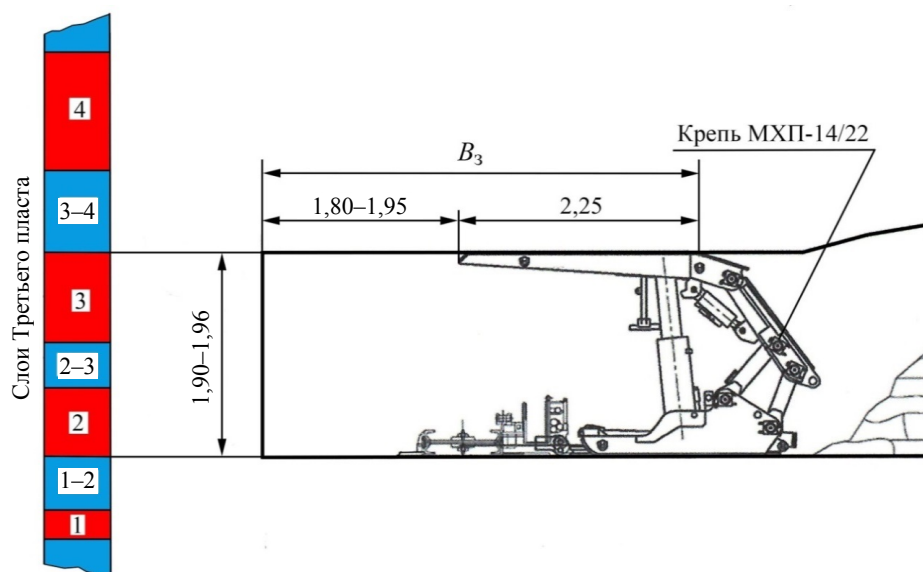


Рис. 2. Вид призабойного пространства лав № 3–12 и 3–13 с крепью МХП-14/22

Fig. 2. Bottomhole view of longwalls No 3–12 and 3–13 with МХП-14/22-support

Среднюю скорость нарастания сопротивления гидростоек крепи v_p , кН/мин, рассчитывали по формуле

$$v_p = \frac{Q_\phi - 2Q_n}{T_3}, \quad (1)$$

где Q_ϕ – среднее значение сопротивления секции крепи, кН,

$$Q_\phi = Q_{\phi п} + Q_{\phi л}; \quad (2)$$

$Q_{\phi п}$, $Q_{\phi л}$ – среднее значение сопротивления правой и левой гидростоек секций крепи, кН; Q_n – средний начальный распор гидростоек, кН, $Q_n = 1327$ кН; T_3 – среднее значение интервала времени между передвижкой секции крепи и произведенными замерами сопротивления гидростоек, мин.

После завершения исследований по первому методу средние значения всех получаемых показателей усреднялись и рассчитывалась фактическая удельная нагрузка на крепь q_ϕ , кН/м²:

$$q_\phi = \frac{Q_{\phi.уср}}{B_3 S}, \quad (3)$$

где $Q_{\phi.уср}$ – усредненное значение сопротивления секции крепи, кН; B_3 – то же ширины призабойного пространства, м; S – шаг установки секций крепи в лаве, м, $S = 1,75$ м.

Шахтные исследования по второму методу состояли в следующем. В каждом очистном цикле стойкой СУИ-3 измеряли опускание кровли (конвергенцию) по ширине призабойного пространства на замерном профиле, расположенном в центре лавы между двумя секциями забойной крепи. Опускание кровли измеряли по станциям контурных реперов, которые устанавливались в почве и кровле лавы сразу же после снятия очередной стружки на расстоянии 0,15–0,35 м от забоя лавы. Измерения по каждой станции выполняли с момента ее установки вплоть до выхода за крепь с фиксированием времени нахождения станций в призабойном пространстве. За время исследований лавой № 3–12 было выполнено 88, а № 3–13 – 76 очистных циклов.

Кроме измерений опускания кровли на 10 секциях забойной крепи лав, расположен-

ных по обеим сторонам от замерных профилей, в каждом очистном цикле снимали показания штатных манометров-индикаторов после распора гидростоек Q_n и перед передвижкой крепи Q_k с фиксированием продолжительности очистных циклов $T_{ц}$, а также производили измерения лазерной рулеткой ширины призабойного пространства B_3 и величины зависания непосредственной кровли за крепью δ_3 .

Состояние кровли в призабойном пространстве и характер ее обрушения в выработанном пространстве изучали визуальным способом с использованием фотографирования. Для оценки устойчивости кровли применяли коэффициент устойчивости K_{yc} , 1/м, который рассчитывали по формуле

$$K_{yc} = \frac{h_n}{m_b B_3}, \quad (4)$$

где h_n – максимальная величина полного опускания кровли, мм; m_b – вынимаемая мощность пласта, мм; B_3 – усредненное значение ширины призабойного пространства, м.

При $K_{yc} = 0,01–0,02$ кровля в призабойном пространстве оценивается как устойчивая, а при $K > 0,02$ – как неустойчивая.

В процессе обработки полученных данных в каждом очистном цикле определяли полное опускание кровли по реперной станции, расположенной на самом большом удалении от забоя, с фиксированием продолжительности нахождения станции в призабойном пространстве, а также средние по 10 секциям значения Q_n , Q_k , B_3 , δ_3 , v_p и q_ϕ . Средние значения скорости нарастания сопротивления v_p и фактической удельной нагрузки q_ϕ по 10 секциям крепи рассчитывали по формулам:

$$v_p = \frac{Q_k - Q_n}{T_{ц}}; \quad (5)$$

$$q_\phi = \frac{2Q_k}{B_3 S}. \quad (6)$$

После завершения исследований средние по 10 секциям значения всех показателей по очистным циклам усредняли, строили графики изменения средних значений всех показателей на исследуемых участках выемочных столбов лав.

Результаты исследований

Исследования геологического строения пород и прочностных свойств потолочины в выемочных столбах 4 «А» и 17 «А» соответствующих лав № 3–12 и 3–13 показали следующее:

- прочность пород потолочины после ее надработки в выемочном столбе 4 «А» уменьшается примерно на 10 %, а в выемочном столбе 17 «А» остается на уровне ненаработанного массива;

- значения $\Sigma m_{тс}/n$ и η , полученные в выемочных столбах 4 «А» и 17 «А», в сравнении с данными по 40 скважинам разведочного бурения в восточной и северо-восточной частях шахтного 3 РУ соответствуют лучшим (лава № 3–12) и средним (лава № 3–13) показателям для указанных частей шахтного поля;

- слой каменной соли 3–4 в выемочных столбах 4 «А» и 17 «А» (по применяемой на месторождении классификации на устойчивость) можно отнести ко II типу (среднему по устойчивости), при этом полученные значения прочности слоя 3–4 на ненаработанных и надработанных участках обоих выемочных столбов незначительно отличаются от показателей для северного крыла шахтного поля Третьего калийного пласта рудника 3 РУ [12];

- высокая (94–100 %) надежность полученных данных по прочности пород потолочины в выемочных столбах лав № 3–12 и 3–13 при заданной максимальной относительной погрешности 20 % и достаточном количестве испытанных образцов дает основание для использования результатов испытаний в инженерных расчетах.

На основании анализа результатов исследований, проведенных в призабойном пространстве лав, установлено следующее:

- по первому методу:

- ширина призабойного пространства B_3 после снятия комбайном полосы полезного ископаемого при задвинутых к конвейеру секциях крепи не превышала 4,05 м в лаве № 3–12 и 4,20 м в лаве № 3–13;

- скорость нарастания сопротивления крепи v_p изменялась в среднем от 0,8 до 15,4 кН/мин в лаве № 3–12 и от 1,8 до 11,7 кН/мин в лаве № 3–13, а усредненное ее значение состави-

ло 5,7 кН/мин в лаве № 3–12 и 5,2 кН/мин в лаве № 3–13;

- фактическая удельная нагрузка на крепь q_f составила 523 кН/м² в лаве № 3–12 и 484 кН/м² в лаве № 3–13, т. е. 74 и 68 % соответственно от несущей способности крепи МХП-14/22;

- потолочина из слоя каменной соли 3–4 в обеих лавах сохраняла устойчивое состояние в основном без каких-либо видимых нарушений; в некоторых случаях у забоя лав в ней отмечалось появление цикловых трещин шириной 1,0–2,0 мм без дальнейшего их раскрытия по мере подвигания очистных забоев (рис. 3);



Рис. 3. Появление цикловых трещин в кровле призабойного пространства лавы № 3–13

Fig. 3. Appearance of cyclic cracks in the roof of the bottom-hole space of longwall No 3–13

- величина зависания непосредственной кровли за крепью δ_3 изменялась в лаве № 3–12 от 1,4 до 3,1 м (средние значения) и от 4,0 до 8,0 м (максимальные значения), а в лаве № 3–13 – от 0,5 до 4,6 м (средние значения) и от 4,0 до 10,0 м (максимальные значения);

- по второму методу:

- горное давление в лавах № 3–12 и 3–13 так же, как и в других нижних лавах при слоевой выемке Третьего калийного пласта, характеризуется периодическими обрушениями основной кровли с различной интенсивностью. В лаве № 3–12 наиболее интенсивные обрушения основной кровли происходили с шагом не более 20 м, при этом скорость нарастания сопротивления крепи v_p достигала 16 кН/мин, а величина полного опускания кровли h_n от груди забоя до границы призабойного пространства не превышала 126 мм. В лаве № 3–13 шаг наиболее интенсивных обрушений кровли

составил не более 18 м, а значения показателей v_p и h_n не превышали 12 кН/мин и 119 мм. Полученные в лавах № 3–12 и 3–13 максимальные значения v_p и h_n не достигают этих показателей в нижних слоевых лавах с высокой интенсивностью обрушений основной кровли;

– усредненные значения показателей v_p , h_n и q_ϕ составили:

а) в периоды обрушений основной кровли:

в лаве № 3–12:

скорость нарастания сопротивления крепи

$v_p = 7,9$ кН/мин;

полное опускание кровли $h_n = 111,0$ мм;

фактическая удельная нагрузка на крепь $q_\phi = 570$ кН/м² (или 80 % от несущей способности крепи);

в лаве № 3–13:

$v_p = 9,3$ кН/мин;

$h_n = 115,3$ мм;

$q_\phi = 650$ кН/м² (или 91,5 % от несущей способности крепи);

б) в периоды между обрушениями:

в лаве № 3–12:

$v_p = 3,8$ кН/мин;

$h_n = 96,0$ мм;

$q_\phi = 480$ кН/м² (или 68 % от несущей способности крепи);

в лаве № 3–13:

$v_p = 4,8$ кН/мин;

$h_n = 93,2$ мм;

$q_\phi = 642$ кН/м² (или 90 % от несущей способности крепи);

– ширина призабойного пространства B_3 в обеих лавах не превышала 4,2 м, а усредненные ее значения составили 4,08 м в лаве № 3–12 и 4,15 м в № 3–13. При этом кровля в призабойном пространстве весь период проведения исследований сохраняла устойчивое состояние. Периодически образующиеся вдоль забоя цикловые трещины шириной не более 2,0 мм в дальнейшем не увеличивались до самой границы призабойного пространства, поэтому не оказывали влияния на устойчивость потолочины. Визуальная оценка состояния кровли подтверждается расчетом коэффициента устойчивости K_{yc} по формуле (4).

Для лавы № 3–12 при значениях h_n , m_v и B_3 , равных 126 мм, 1960 мм и 4,08 м соответственно, коэффициент устойчивости K_{yc} состав-

лял 0,016, а для лавы № 3–13 при h_n , m_v и B_3 , равных 119 мм, 1950 мм и 4,15 м, – 0,015, что свидетельствует об устойчивом состоянии кровли.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа результатов исследований геологического строения и прочностных свойств пород слоя каменной соли 3–4 (потолочины) в выемочных столбах 4 «А» и 17 «А» отмечено, что уменьшение мощности потолочины примерно на 0,10–0,14 м и незначительное снижение ее прочности по сравнению с северным крылом шахтного поля по Третьему калийному пласту рудника Третьего рудоуправления не могут существенно повлиять на ее устойчивость в призабойном пространстве лав № 3–12 и 3–13. Это подтверждается визуальными наблюдениями за состоянием потолочины в лавах и расчетом коэффициента ее устойчивости.

2. Полученные шахтными исследованиями в лавах № 3–12 и 3–13 основные показатели проявления горного давления v_p и h_n , а также значения фактической удельной нагрузки на забойную крепь q_ϕ свидетельствуют о возможности безопасной отработки нижними слоевыми лавами восточной и северо-восточной частей шахтного поля рудника Третьего рудоуправления на участках с уменьшенной до 0,66 м потолочиной из слоя каменной соли 3–4. При этом несущая способность забойной крепи должна быть не менее удельной нагрузки от горного давления (550 кН/м²) [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Результаты шахтных испытаний двухслоевой выемки Третьего пласта на Старобинском месторождении / В. А. Сорокин [и др.] // Горный журнал. 1985. № 12. С. 10–13.
2. Опыт двухслоевой выемки мощного пласта сложного строения / А. Ф. Бублис [и др.] // Технология и безопасность горных работ в калийных рудниках: межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1985. С. 17–22.
3. Слоевая выемка Третьего пласта на Старобинском месторождении калийных солей / В. А. Сорокин [и др.]. Л.: ВНИИГ, 1986. С. 4–14.
4. Петровский, Б. И. Совершенствование подготовки длинных столбов для слоевой выемки Третьего пласта.

- та / Б. И. Петровский, А. Ф. Бублис, В. А. Сорокин // Совершенствование разработки калийных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1987. С. 6–11.
5. Анализ случаев динамических проявлений основной кровли на призабойное пространство нижних лав при слоевой выемке Третьего калийного пласта / В. А. Губанов [и др.] // Горная механика. 1999. № 2. С. 12–16.
 6. Петровский, Б. И. Повышение эффективности и безопасности отработки Третьего калийного пласта длинными очистными забоями / Б. И. Петровский // Промышленная безопасность. 2006. № 10. С. 18–20.
 7. Кириенко, В. М. Новая технология слоевой выемки пласта Третьего калийного горизонта / В. М. Кириенко, В. А. Тараканов, В. М. Железняк // Горный журнал. 2010. № 8. С. 34–36.
 8. Инструкция по применению систем разработки на Старобинском месторождении. Солигорск, 2018. 146 с.
 9. Обобщить результаты исследований и выдать рекомендации по безопасной отработке 2,2–3,3 слоев нижними лавами с уменьшенной потолочиной в восточной и северо-восточной частях шахтного поля гор. – 620 м рудника 3 РУ: отчет о НИР (заключит. по дог. № 41/21, этап 3) / Унитарное предприятие «Институт горного дела»; рук. Б. И. Петровский, исполн.: В. А. Мисников [и др.]. Солигорск, 2021. 48 с. № ГР 20212386.
 10. Видякин, В. В. ГИС-технологии при добыче полезных ископаемых. Специализированная корпоративная геоинформационная система MapManager / В. В. Видякин, М. А. Журавков, О. Л. Коновалов. Минск: Изд. центр БГУ, 2004. 208 с.
 11. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии: ГОСТ 21153.2–84. Введ. 01.07.1986. М.: Госстандарт, 1986. 8 с.
 12. Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении. Солигорск, 2018. 197 с.
- Поступила 08.02.2022
Подписана в печать 12.04.2022
Опубликована онлайн 30.11.2022
- REFERENCES
1. Sorokin V. A., Piatrouski B. I., Bubliss A. F., Kalinichenko P. I. (1985) Results of Mine Tests of a Two-Layer Excavation of the Third Layer at the Starobinsky Field. *Gornyi Zhurnal*, (12), 10–13 (in Russian).
 2. Bubliss A. F. [et al.] (1985) Experience of Two-Layer Excavation of a Thick Layer of Complex Structure. *Tekhnologiya i Bezopasnost' Gornykh Rabot v Kaliinykh Rudnikakh: Mezhd. Sb. Nauch. Tr.* [Technology and Safety of Mining Operations in Potash Mines: Inter-University Collection of Scientific Papers]. Perm, 17–22 (in Russian).
 3. Sorokin V. A., Piatrouski B. I., Nikolaev Yu. N. [et al.] (1986) *Layered Excavation of the Third Layer at the Starobinsky Potash Deposit*. Leningrad, All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedenev, 4–14 (in Russian).
 4. Piatrouski B. I., Bubliss A. F., Sorokin V. A. (1987) Improving the Preparation of Long Pillars for Layered Excavation of the Third Layer. *Sovershenstvovanie Razrabotki Kaliinykh Mestorozhdenii: Mezhd. Sb. Nauch. Tr.* [Improving the Development of Potash Deposits: Inter-University Collection of Scientific Papers]. Perm, 6–11 (in Russian).
 5. Gubanov V. A., Volkov B. A., Polyakov A. L. [et al.] (1999) Analysis of the Cases of Dynamic Manifestations of the Main Roof on the Bottomhole Space of the Lower Lavas During the Layered Excavation of the Third Potash Seam. *Gornaya Mekhanika* [Mining Mechanical Engineering], (2), 12–16 (in Russian).
 6. Piatrouski B. I. (2006) Improving the Efficiency and Safety of the Third Potash Seam Mining with Longwalls. *Promyshlennaya Bezopasnost* [Industrial Safety], (10), 18–20 (in Russian).
 7. Kirienko V. M., Tarakanov V. A., Zheleznyak V. M. (2010) New Technology for Layered Mining of the Third Potash Horizon. *Gornyi Zhurnal*, (8), 34–36 (in Russian).
 8. *Instructions for the Use of Development Systems at the Starobinsky Field*. Soligorsk, 2018. 146 (in Russian).
 9. Piatrouski B. I., Misnikou V. A. [et al.] (2021). *To Summarize the Research Results and Issue Recommendations for the Safe Mining of 2.2–3.3 Layers of Lower Longwalls with a Reduced Ceiling in the Eastern and Northeastern Parts of the Minefield of the Mountains. 620 m of 3 RU Mine*: Research Report (Final Report for the Contract. No 41/21, Stage 3). Soligorsk. 48 (in Russian).
 10. Vidyakin V. V., Zhuravkov M. A., Kononov O. L. (2004) *GIS-Technologies in the Extraction of Minerals. Specialized Corporate Geo-Information System MapManager*. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University. 208 (in Russian).
 11. State Standard 21153.2–84. *Rocks. Methods for Determining the Ultimate Strength in Uniaxial Compression*. Moscow, Gosstandart Publ., 1986. 8 (in Russian).
 12. *Instructions for the Protection and Fastening of Mine Workings at the Starobinsky Deposit*. Soligorsk, 2018. 197 (in Russian).

Received: 08.02.2022

Accepted: 12.04.2022

Published online: 30.11.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-464-472>

УДК 621.74.04:669.27

О применении внутренних источников теплоотвода при получении отливок из износостойких хромистых чугунов

Канд. техн. наук, доц. В. А. Пумпур¹⁾, докт. физ.-мат. наук, проф. А. Г. Анисович²⁾,
канд. техн. наук, доц. К. Э. Барановский³⁾, П. Ю. Дувалов¹⁾, В. М. Андриенко¹⁾

¹⁾Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси
(Могилев, Республика Беларусь),

²⁾Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

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

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

Реферат. Исследованы особенности формирования отливок из хромистого чугуна при литье в комбинированную форму с использованием внутренних источников теплоотвода, введенных в расплав. Проведена серия экспериментов с износостойким хромистым чугуном ИЧХ18ВМ. В качестве макроохладителей использованы: пластина из силумина толщиной 0,5 мм с содержанием 3–5 % Ti, смесь буры и дробленого феррохрома (1–4 мм), дробь из белого чугуна. Методом рентгеноструктурного анализа определен фазовый состав образцов, а также изучена их микроструктура. Для образцов, полученных с применением дробы из белого чугуна, проведено испытание на твердость. Определен наиболее эффективный способ применения внутреннего источника теплоотвода, оказывающий существенное влияние на скорость охлаждения отливки и ее микроструктуру. Наиболее перспективной оказалась смесь буры и частиц дробленого феррохрома, которые не растворились в расплаве и образовали зоны с локальным измельчением структуры, а также дробы из белого чугуна – более технологичной альтернативы феррохрому. Применение дробы из белого чугуна привело к измельчению структуры детали «Лист подкладной УЗ.1.1» из износостойкого хромистого чугуна, а также к повышению твердости ее рабочей поверхности на 2,6 HRC. Практически вся введенная в расплав дробь расплавилась. В результате проведенных исследований выявлено, что применение феррохрома и дробы из белого чугуна является эффективным способом локального измельчения структуры и практической возможностью получения детали из хромистого чугуна с повышенной твердостью. Все это может повысить износостойкость деталей дробильно-размольного оборудования.

Ключевые слова: износостойкий хромистый чугун, литье, комбинированные формы, внутренние источники теплоотвода, макроохладители, феррохром, дробь из белого чугуна

Для цитирования: О применении внутренних источников теплоотвода при получении отливок из износостойких хромистых чугунов / В. А. Пумпур [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 464–472. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-464-472>

On Application of Internal Heat Sink Sources when Producing Castings from Wear-Resistant Chromium Cast Iron

V. A. Pumpur¹⁾, A. G. Anisovich²⁾, K. E. Baranouski³⁾,
P. Yu. Duvalau¹⁾, V. M. Andriyenka¹⁾

¹⁾Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus (Mogilev, Republic of Belarus),

²⁾Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

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

Abstract. The features of the formation of castings from chromium cast iron during casting in a combined mold are studied using internal sources of heat removal introduced into the melt. A series of experiments has been carried out with wear-

Адрес для переписки
Дувалов Павел Юрьевич
Институт технологии металлов НАН Беларуси
ул. Бялыницкого-Бирули, 11,
212030, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 222 64-30-20
lcti@yandex.by

Address for correspondence
Duvalau Pavel Yu.
Institute of Technology of Metals of NAS of Belarus
11, Bialynitskaga-Biruli str.,
212030, Mogilev, Republic of Belarus
Tel.: +375 222 64-30-20
lcti@yandex.by

resistant chromium cast iron. The following macrocoolers have been used: a 0.5 mm thick silumin plate containing 3–5 % Ti; a mixture of borax and crushed ferrochrome (1–4 mm); white cast iron shot. The phase composition of the samples has been determined by X-ray diffraction analysis, and their microstructure has been also studied. Hardness testing has been carried out on specimens obtained with cast iron shot. The most effective method of using an internal source of heat removal, which has a significant effect on the cooling rate of the casting and its microstructure, has been determined. The most promising was a mixture of borax and crushed ferrochrome particles, which did not dissolve in the melt and formed zones with local structure refinement, as well as white cast iron shot, a more technological alternative to ferrochrome. The use of white cast iron shot has led to a refinement of the structure of the part “Backing sheet Y3.1.1 [U3.1.1]” made of wear-resistant chromium cast iron, as well as to an increase in the hardness of its working surface by 2.6 HRC. Almost all of the shot introduced into the melt has been melted. As a result of the research, it has been revealed that the use of ferrochrome and white cast iron shot is an effective way of local structure refinement and a practical possibility of obtaining a part made of chromium cast iron with increased hardness. All this can increase the wear resistance of parts of crushing and grinding equipment.

Keywords: wear-resistant chromium cast iron, casting, combined molds, internal heat removal, macrocoolers, ferrochrome, white cast iron shot

For citation: Pumpur V. A., Anisovich A. G., Baranouski K. E., Duvalau P. Yu., Andryienka V. M. (2022) On Application of Internal Heat Sink Sources when Producing Castings from Wear-Resistant Chromium Cast Iron. *Science and Technique*. 21 (6), 464–472. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-464-472> (in Russian)

Введение

Эффективность работы центробежного дробильно-размольного оборудования (ДРО) напрямую зависит от работоспособности деталей основных рабочих элементов. К материалам, из которых изготавливаются эти детали, предъявляется ряд требований, и главные из них – высокая прочность и абразивная стойкость.

Основной фактор, влияющий на срок службы литых деталей ДРО из износостойкого хромистого чугуна (ИЧХ), – скорость кристаллизации отливки, которая напрямую зависит от скорости ее охлаждения в литейной форме. Существенное влияние скорости охлаждения на величину карбидов и, следовательно, на износостойкость отливок из ИЧХ наблюдается при увеличении ее до 10 К/с [1]. Дальнейший рост скорости охлаждения на размере карбидов и износостойкости сказывается незначительно, в связи с чем является нецелесообразным.

Однако вне зависимости от типа литейной формы детали, изготовленные из ИЧХ, имеют гораздо меньшую твердость в центре отливок, чем на поверхности. Так, твердость отбойной плиты УПМ-1,0.001 для ДРО по сечению уменьшается с 60–62 HRC вблизи поверхности до 51–54 HRC в середине. Это связано с тем, что в середине отливки размер карбидов в 2–2,5 раза больше, чем на поверхности [2]. Поэтому для улучшения эксплуатационных свойств защитных деталей и увеличения их срока службы важно обеспечить одинаково высокую скорость охлаждения отливок по всему сечению.

Для выравнивания скорости кристаллизации по всему сечению детали применяются способы внутреннего воздействия, например с использованием расплавляемых и нерасплавля-

емых внутренних холодильников, вводимых в расплав. Положительный эффект от их применения связывают с увеличением переохлаждения объема расплава [3]. Внутренние холодильники (как расплавляемые, так и нерасплавляемые) способствуют измельчению структуры отливок и улучшению механических свойств металла [4].

Ранее коллективом авторов была проделана работа по увеличению износостойкости отливок из хромистых чугунов, а также, в частности, по исследованию различных способов преодоления падения твердости и укрупнения микроструктуры в глубине отливки. В [5] изучено легирование износостойких хромистых чугунов Ti и W, а в [2] исследовано влияние способов литья и геометрических параметров деталей из хромистых чугунов на твердость их внутренних слоев. Влияние углерода (от 3,25 до 4,74 %) и типа литейных форм изучено в [6], а различных режимов термической обработки на структуру и механические свойства образцов из ИЧХ18ВМ – в [7]. Ряд исследований был посвящен легированию ниобием заэвтектического высокохромистого чугуна [8, 9], по итогам которых проводились производственные испытания отбойных плит для центробежных мельниц [10], был получен патент [11].

Методика исследований

В Институте технологии металлов НАН Беларуси выполнялись исследования особенностей формирования отливок из ИЧХ на основе технологии литья с использованием внутренних источников теплоотвода (холодильников). На первом этапе проводили серию экспериментов по литью износостойких хромистых

чугунов с внутренними и наружными расплавленными и нерасплавленными источниками теплоотвода. Образцы отливали в комбинированную форму, в которой средняя и верхняя части изготавливались из холодно-твердеющей смеси, а в качестве нижней части использовалась металлическая плита, покрытая теплоустойчивой кремнеземной тканью.

Исследования проводили с хромистым чугуном ИЧХ18ВМ, расплав готовили в индукционной печи ИСТ-0,25/0,32И1, разливка происходила при температуре 1380–1420 °С. Температура нижней (металлической) части комбинированной формы перед заливкой составляла 100–120 °С.

Из хромистого чугуна ИЧХ18ВМ отливали:

- образец, полученный без применения холодильников, принятый в качестве эталонного;
- образцы с пластиной из силумина толщиной 0,5 мм с содержанием 3–5 % Ti, пластина укладывалась на теплоустойчивую ткань нижней плиты комбинированной формы;
- образцы со смесью буры и дробленого феррохрома (1–4 мм) марки ФХ850 (бура в качестве наполнителя для равномерного распределения частиц феррохрома), смесь высыпали на ткань перед заливкой.

Были получены три экспериментальных образца массой 0,8–1,0 кг, один из которых – эталонный. С помощью оптико-эмиссионного спектрометра GNR SCP (Solaris CCD) определяли их химический состав. Фазовый состав образцов исследовали методом рентгеноструктурного анализа на установке «ДРОН 3», оснащенной аппаратно-программным комплексом для управления дифрактометром и обработки результатов измерений. Контроль измерительной системы гониометра осуществляли по стандартному эталонному кристаллу кварца. Микроструктуру образцов изучали с приме-

нием металлографического комплекса на основе инвертированного микроскопа «МИ-1».

На втором этапе проводили эксперименты по заливке детали «Лист подкладной УЗ.1,1» из износостойкого хромистого чугуна с применением в качестве внутреннего источника теплоотвода дробы чугунной литой (ДЧЛ) производства ОАО «Могилевский металлургический завод» следующего химического состава: С – 2,7–3,2 %, Si – 0,8–1,5 %, Mn – 0,30–0,85 %, P < 0,20 %, S < 0,15 %, Fe – остальное. Химический состав дробы соответствует доэвтектическому белому чугуну.

Дробь подавалась в струю расплава через 4–5 с с момента начала заливки. Для введения дробы использовали швеллер 10П длиной 40 см. Время начала введения дробы в расплав выбирали с такой задержкой, чтобы вся попавшая в расплав дробь локализовалась в верхней части утолщения детали. Перед заливкой дробь нагревали до температуры 120 °С и выдерживали в течение 30 мин для удаления влаги.

Для исследований были отлиты два подкладных листа, в один из которых засыпалась ДЧЛ диаметром 1,4–1,8 мм, а другой служил эталоном. Кристаллическое строение исследовали в среднем сечении детали вдоль высоты с применением металлографического микроскопа Leica DMi8. Для более отчетливого выявления карбидной фазы образцы прошли предварительный отжиг при температуре 960 °С с выдержкой в течение 30 мин и последующим охлаждением в печи СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И2. Твердость измеряли на твердомере модели ТК-14-250 по методу Роквелла.

Результаты исследований

Химический состав полученных на первом этапе исследований литейных образцов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав экспериментальных образцов
Chemical composition of experimental samples

Образец	Содержание элементов, %								
	C	Cr	Ni	Mn	Si	W	Al	V	Mo
Эталонный	3,20	18,30	0,28	0,57	0,22	0,40	Следы	0,22	0,22
С пластиной из силумина с содержанием 3–5 % Ti	3,42	18,85	0,22	0,50	0,30	0,38	0,3–0,4	0,21	0,33
Со смесью буры и феррохрома	3,30	18,15	0,26	0,51	0,40	0,30	Следы	0,21	0,23

В двух образцах наблюдались небольшие отклонения получившегося состава хромистого чугуна от технических условий, в частности содержание вольфрама на 0,02 и 0,10 % меньше, что, впрочем, никак не должно сказаться на результате эксперимента. Также в образце, отлитом на силуминовую пластину с 3–5 % Ti, обнаружен алюминий.

Фазовый состав всех образцов состоял из аустенита, цементита и карбидной фазы состава $(Cr, Fe)_7C_3$. Исключение – образец, полученный литьем на смесь буры и феррохрома (верхняя часть образца), в котором отсутствует цементит. Судя по интенсивности линий, образцы могут несколько различаться количеством аустенита и карбидов. Микроструктура в верхней части эталонного образца представлена на рис. 1. При увеличении 500 крат в структуре различимы первичные дендриты аустени-

та (рис. 1а). В междендритном пространстве располагаются эвтектические колонии (рис. 1б).

Микроструктуру в нижней части эталонного образца составляли аустенит и карбиды (рис. 2а). Дендриты аустенита выражены менее четко.

В нижней части образца структура более мелкая (рис. 2), что вполне объяснимо, так как нижняя часть формировалась в контакте с металлической плитой, а верхняя – в контакте с холодно-твердеющей смесью. В остальном структуры низа и верха отливки – без существенных отличий.

Микроструктура в верхней части образца, отлитого на пластину из силумина, соответствует микроструктуре доэвтектического хромистого чугуна (рис. 3а). Матрица сплава – аустенит, присутствуют карбиды хрома различной ориентации, а также эвтектические розетки вокруг центральных стержней (рис. 3б).

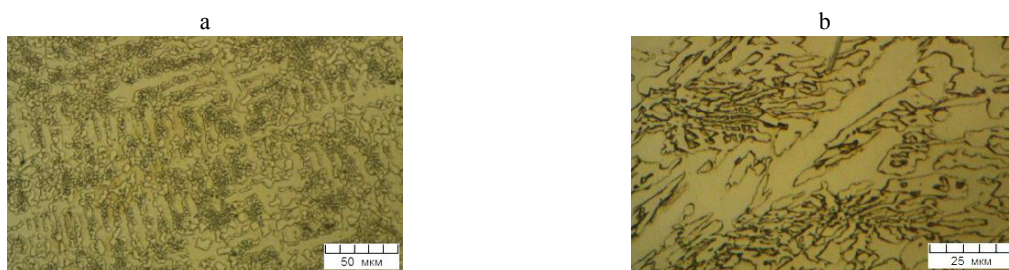


Рис. 1. Микроструктура в верхней части эталонного образца

Fig. 1. Microstructure at the top part of reference sample

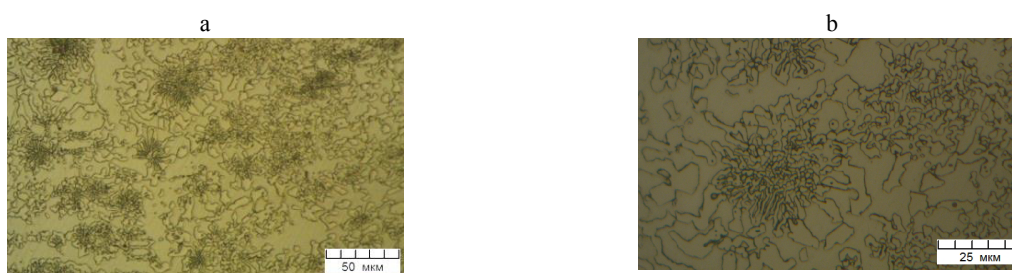


Рис. 2. Микроструктура в нижней части эталонного образца

Fig. 2. Microstructure at the bottom part of reference sample



Рис. 3. Микроструктура в верхней части образца, отлитого на пластину из силумина с содержанием 3–5 % Ti

Fig. 3. Microstructure at the top part of sample cast on silumin plate with content of 3–5 % Ti

В микроструктуре нижней части отливки присутствуют поры и значительное количество неметаллических включений (рис. 4а). В поляризованном свете они показывают опалесцирующий эффект (рис. 4б). Состав включений соответствует оксиду кремния. Вокруг включений наблюдается ободок, в котором матрица сплава приобретает темный цвет. При анализе в растровом микроскопе установлено, что на данном участке произошло перлитное превращение, продукты распада соответствуют перлиту повышенной дисперсности (рис. 4с). Поскольку теплопроводность оксида кремния значительно меньше, чем аустенитной матрицы, включение при кристаллизации остывает медленнее, в силу чего является концентрированным источником теплоты. За счет этой теплоты

успевает произойти перлитное превращение. В остальном микроструктуры нижней и верхней частей отливки принципиально не отличаются.

Макроструктура в верхней части образца, полученного литьем на смесь буры и дробленого феррохрома ФХ850, представлена на рис. 5.

В структуре образца присутствуют включения феррохрома, температура плавления которого существенно выше температуры расплава. Они являются центрами кристаллизации, от которых расходятся «лучи» направленно закристаллизованной структуры, состоящей из аустенита и ориентированных карбидов (рис. 5а). В промежутках между «лучами» располагаются участки структуры, где произошло перлитное превращение (рис. 5б).

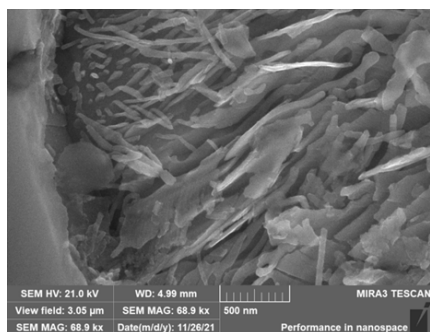
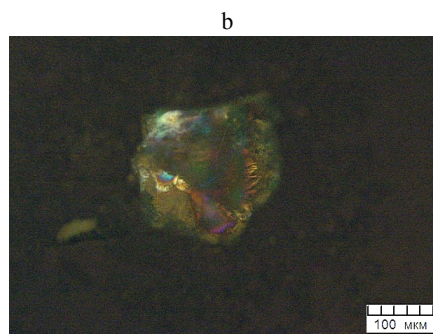
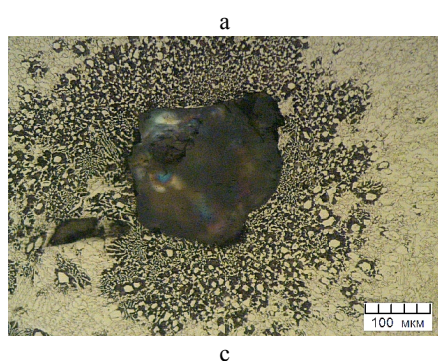


Рис. 4. Микроструктура в нижней части образца, отлитого на пластину из силумина с содержанием 3–5 % Ti: а – светпольное освещение; б – поляризованный свет; с – структура матрицы на участке распада аустенита

Fig. 4. Microstructure at the bottom part of sample cast on silumin plate with content of 3–5 % Ti: а – bright field lighting; б – polarized light; с – matrix structure at the site of austenite decay

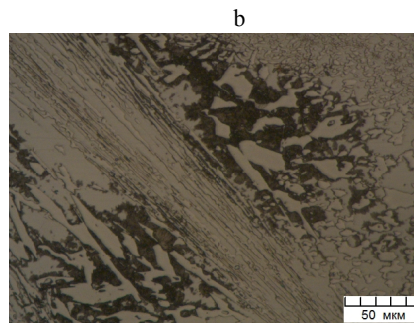
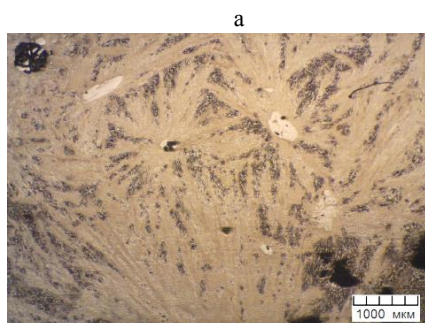


Рис. 5. Структура в верхней части образца, полученного литьем на смесь буры и дробленого феррохрома: а – макроструктура; б – микроструктура

Fig. 5. Structure at the top part of sample obtained by casting on mixture of borax and crushed ferrochrome: а – macrostructure; б – microstructure

Микроструктура в нижней части образца неоднородная (рис. 6а, б) и представляет собой смесь аустенита и карбидов, распределенных неравномерно в зависимости от присутствия крупных включений феррохрома.

Поскольку рентгеноструктурный анализ не зафиксировал иных фаз, кроме аустенита и карбидов, присущих таким чугунам, крупные включения фаз белого цвета следует отнести к карбидам. На рис. 6б показана граница такого крупного карбидного включения, из которого растут дендриты карбидов.

В результате проведенной серии экспериментов имеются следующие результаты. В образце, полученном литьем на пластину из силумина с 3–5 % Ti, явного влияния наружного источника теплоотвода на структуру нижней части образца по сравнению с верхней не выявлено. Образец, отлитый на смесь буры и дробленого феррохрома марки ФХ850, продемонстрировал перспективность применения феррохрома в качестве внутреннего источника теплоотвода. Части-

цы феррохрома ожидаемо не расплавились в хромистом чугуне и выступили холодильниками, вокруг которых сформировались зоны с локальным измельчением структуры. Это натолкнуло на поиск более технологичной альтернативы. Обычно используемые при литье внутренние холодильники растворяются в расплаве, улучшая свойства. Для случая применения ИЧХ полное расплавление частиц хоть и не обязательно, но желательно. Поэтому было принято решение вместо феррохрома использовать дробь чугунную литейную при изготовлении экспериментального образца из ИЧХ с внутренними холодильниками в виде дробленых материалов на основе реальной детали для ДРО. В качестве последней выбрали «Лист подкладной УЗ.1,1» – сложную деталь переменного сечения, заливаемую в комбинированную форму, в которой средняя часть выполнена из холодно-твердеющей смеси, а верхняя и нижняя части представляют собой металлические плиты (рис. 7).

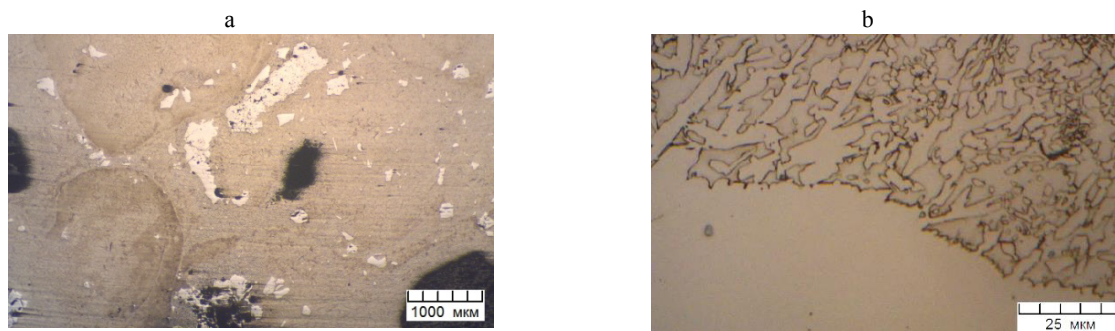


Рис. 6. Структура в нижней части образца, полученного литьем на смесь буры и дробленого феррохрома: а – макроструктура; б – микроструктура

Fig. 6. Structure at the bottom part of sample obtained by casting on mixture of borax and crushed ferrochrome: а – macrostructure; б – microstructure



Рис. 7. Оснастка для литья детали «Лист подкладной УЗ.1,1»: а – средняя часть из холодно-твердеющей смеси; б – комбинированная форма в сборе

Fig. 7. Equipment for casting part “Backing sheet Y3.1,1”: а – middle part of cold-hardening mixture; б – combined mold assembly

Масса детали «Лист подкладной У3.1,1» составляла 7,1 кг, масса рабочего элемента (утолщения), выступающего над тонкой частью отливки, – примерно 2,6–2,8 кг, масса дробы – 120 г, что соответствует 4,3–4,6 % от массы рабочего элемента. По причине того, что деталь имеет массу, в семь раз большую исследуемых ранее экспериментальных образцов, и более сложную форму, был опробован способ введения дробы в струю расплава, зарекомендовавший себя как наиболее эффективный [12, 13].

В ходе эксперимента были отлиты два подкладных листа, в один из которых засыпалась дробь чугуна литая диаметром 1,4–1,8 мм, а другой служил эталоном. Детали были отлиты из износостойкого хромистого чугуна ИЧХ18ВМ. Химический состав расплава и твердость полученных экспериментальных деталей «Лист подкладной У3.1,1» представлены в табл. 2.

У подкладного листа, отлитого с применением дробы, твердость больше на 2,6 единицы HRC. Экспериментальная деталь «Лист подкладной У3.1,1», полученная с использованием дробы в качестве внутреннего источника теплоотвода, представлена на рис. 8.

Как видно из рис. 8, несколько дробинок потоком расплава вынесло на верхнюю (рабо-

чую) поверхность детали. Это позволяет предположить, что, как и ожидалось, большая часть дробы локализовалась в верхней части детали. Изучение изломов обеих деталей показало, что у экспериментального подкладного листа, полученного с применением дробы, заметно измельчение верхнего слоя в несколько миллиметров, с чем предположительно и связана немного более высокая твердость (62,3 HRC против 59,7 HRC). Вся чугунная дробь, введенная в отливку, расплавилась (за исключением нескольких дробинок на поверхности). Микроструктуры двух подкладных листов представлены на рис. 9.

Как видно из рис. 9, введение дробы значительно измельчило микроструктуру. В образце из подкладного листа, отлитого с применением ДЧЛ, крупные первичные карбиды не встречаются и наблюдается большее количество колоний мелких эвтектических карбидов. Следует отметить, что расплавление дробы из белого чугуна вызывает некоторое обеднение химического состава, прежде всего по хрому, которое тем не менее незначительно и им можно пренебречь в связи с малым количеством подаваемой в расплав ДЧЛ.

Таблица 2

Химический состав и твердость экспериментальных деталей
Chemical composition and hardness of experimental parts

Образец	Содержание элементов, %								Твердость рабочей поверхности, HRC
	C	Cr	Ni	Mn	Si	W	V	Mo	
Эталонный (без дробы)	3,59	18,8	0,11	0,47	0,52	0,4	0,16	0,25	59,7
С дробью									62,3



Рис. 8. Экспериментальная деталь «Лист подкладной У3.1,1», изготовленная с применением дробы чугунной литой:
а – общий вид; б – участок поверхности

Fig. 8. Experimental part “Backing sheet U3.1,1”, made using shot: a – general view; b – surface area



Рис. 9. Микроструктура образцов, вырезанных из отливок детали «Лист подкладной УЗ.1,1»:
а – эталон; б – с дробью (увеличение $\times 200$)

Fig. 9. Microstructure of specimens cut from castings of the part “Backing sheet УЗ.1,1”:
а – standard, without shot; б – using shot (magnification $\times 200$)

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенной работы по определению материалов для внутренних источников теплоотвода при литье износостойких хромистых чугунов установлено, что применение феррохрома и дробы чугуновой литой оказалось эффективным способом локального измельчения структуры.

2. Эксперимент по изготовлению детали «Лист подкладной УЗ.1,1» с использованием дробы чугуновой литой продемонстрировал практическую возможность получения отливки с повышенной твердостью с применением внутреннего источника теплоотвода. Результатом испытаний стало измельчение структуры износостойкого хромистого чугуна, что положительно сказывается на износостойкости и прочности детали, обеспечивая тем самым оптимальный комплекс свойств.

ЛИТЕРАТУРА

- Гарбер, М. Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация / М. Е. Гарбер. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
- Структура и твердость литых деталей из износостойких чугунов / Е. И. Марукович [и др.] // Литье и металлургия. 2017. Т. 88, № 3. С. 39–44. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-3-39-44>.
- Скребцов, А. М. О переохлаждении расплавленного металла при использовании внутренних расплавляемых кристаллизаторов / А. М. Скребцов, Б. А. Павлюк // Известия вузов. Черная металлургия. 1993. № 9–10. С. 78–79.
- О некоторых возможностях измельчения зерна металла отливки при внешнем воздействии на затвердевающий металл / А. М. Скребцов [и др.] // Металл и литье Украины. 1996. № 1–2. С. 30–34.
- Повышение износостойкости хромистых чугунов / В. М. Ильюшенко [и др.] // Литье и металлургия. 2016. Т. 83, № 2. С. 5–9.
- Эксплуатационные свойства износостойких хромистых чугунов с разной степенью эвтектичности / Е. И. Марукович [и др.] // Литье и металлургия. 2018. Т. 93, № 4. С. 50–54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-50-54>.
- Влияние термической обработки на механические свойства износостойкого хромистого чугуна / Е. И. Марукович [и др.] // Металлургия машиностроения. 2021. № 5. С. 19–22.
- Хромистый чугун, легированный ниобием / Е. И. Марукович [и др.] // Металлургия машиностроения. 2018. № 1. С. 21–24.
- Влияние ниобия на структуру и механические свойства заэвтектического износостойкого хромистого чугуна / Е. И. Марукович [и др.] // Литейное производство. 2018. № 12. С. 20–23.
- Исследование модифицирования хромистых чугунов при литье в песчаную и комбинированную формы / Е. И. Марукович [и др.] // Литейное производство. 2019. № 6. С. 12–14.
- Износостойкий чугун: пат. 23010 Респ. Беларусь, МПК С22С 37/08 / В. М. Ильюшенко, П. Ю. Дувалов, В. М. Андриенко, К. Э. Барановский, Е. В. Розенберг. Опубл. 30.06.2020.

12. Рыжиков, А. А. Расчет и применение суспензионной заливки / А. А. Рыжиков, И. В. Гаврилин // Литейное производство. 1970. № 8. С. 11–13.
13. Особенности теплофизического и физико-химического взаимодействия кипящей стали с введенной в расплав дробью / Л. А. Соколовская [и др.] // Процессы литья. 2000. № 2. С. 35–37.

Поступила 09.06.2022

Подписана в печать 16.08.2022

Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Garber M. E. (2010) *Wear-Resistant White Cast Irons: Properties, Structure, Technology, Operation*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 280 (in Russian).
2. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Kalentsionak A. I., Baranouski K. E. (2017) Structure and Hardness of Castings Made from Wear-Resistant Cast Irons. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, 88 (3), 39–44. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-3-39-44> (in Russian).
3. Skrebtsov A. M., Pavlyuk B. A. (1993) On Supercooling of Molten Metal When Using Internal Molten Crystallizers. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, (9), 78–79 (in Russian).
4. Skrebtsov A. M., Dan L. A., Sekachev A. O., Prokopov A. A. (1996) On Some Possibilities of Grinding the Grain of the Casting Metal under External Action on the Solidifying Metal. *Metal i Lityo Ukrainy = Metal and Casting of Ukraine*, (1–2), 30–34 (in Russian).
5. Ilyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Baranowski K. E., Provorova I. B., Rozenberg E. V. (2016) The Wear Resistance Increase of Chromium Cast Iron. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, 83 (2), 5–9 (in Russian).
6. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Korotkin G. P., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M., Baranouski K. E. (2018) The Performance Properties of Chromium Cast Irons with Different Degree of Eutectic. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, 93 (4), 50–54.

- <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-50-54> (in Russian).
7. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Anisovich A. G., Pumpur V. A., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M. (2021) An Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Wear-Resistant Chromium Iron. *Metallurgiya Mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, (5), 19–22 (in Russian).
8. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Anisovich A. G., Baranovskii K. E. (2018) Chromium Cast Iron Alloyed with Niobium. *Metallurgiya Mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, (1), 21–24 (in Russian).
9. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M., Baranovskiy K. E. (2018) Influence of Niobium on Structure and Mechanical Properties of Hypereutectic Wear-Resistant Chromium Iron. *Liteynoe Proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, (12), 20–23 (in Russian).
10. Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Pumpur V. A., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M. (2019) Investigation of the Modification of Chromogenous Irons for the Casting in the Sand and Combined Forms. *Liteynoe Proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, (6), 12–14 (in Russian).
11. Ilyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M., Baranovsky K. E., Rozenberg E. V. (2020) *Wear-Resistant Cast Iron*. Patent No 23010 Republic of Belarus (in Russian).
12. Ryzhikov A. A., Gavrilin I. V. (1970) Calculation and Application of Suspension Pouring. *Liteynoe Proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, (8), 11–13 (in Russian).
13. Sokolovskaya L. A., Osipov V. P., Mamishev V. A., Diyuk E. F. (2000) Features of Thermophysical and Physico-Chemical Interaction of Boiling Steel with Shot Introduced Into the Melt. *Protsessy Litya = Casting Processes*, (2), 35–37 (in Russian).

Received: 09.06.2022

Accepted: 16.08.2022

Published online: 30.11.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-473-479>

УДК 531.713.8-022.532:620.3

Методы и технические средства обеспечения единства измерений размера наночастиц

Инж. А. А. Багдюн^{1,2)}, докт. техн. наук, проф. В. Л. Соломахо²⁾

¹⁾Белорусский государственный институт метрологии (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Предлагается набор технических средств для решения задачи единообразия измерений размеров микро- и наночастиц. Для этого необходимо обеспечивать прослеживаемость измерений размеров частиц к единице длины – метру, а также эквивалентных диаметров, применяемых при измерениях в различных дисперсных средах (аэрозолях и взвесьях). Чтобы обеспечить прослеживаемость измерений диаметра частиц к метру, следует использовать наноизмерительную машину с атомно-силовым микроскопом в качестве зондирующей системы. В статье показана схема измерительной системы, описаны принцип действия машины и метод измерения размеров частиц. Для обеспечения прослеживаемости измерений гидродинамического диаметра наночастиц, характеризующего частицы, находящиеся в жидкости (взвеси), предложено использовать анализатор размера наночастиц, реализующий метод динамического рассеяния света. Приведена схема анализатора с описанием принципа измерения размера наночастиц методом динамического рассеяния света. Представлена схема колонны анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц для обеспечения прослеживаемости измерений их диаметра, эквивалентного по электрической подвижности. Диаметр обычно применяется для характеристики частиц, находящихся в состоянии аэрозоля. Приведена схема анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц с описанием принципа действия, выведена формула расчета диаметра частиц.

Ключевые слова: наночастица, диаметр, динамическое рассеяние света, анализатор электрической подвижности частиц, наноизмерительная машина

Для цитирования: Багдюн, А. А. Методы и технические средства обеспечения единства измерений размера наночастиц / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 473–479. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-473-479>

Methods and Technical Means for Ensuring Uniformity of Nanoparticle Size Measurements

A. A. Bagdun¹⁾, V. L. Solomakho²⁾

¹⁾Belarusian State Institute of Metrology (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper proposes a set of technical tools for solving the problem of ensuring the uniformity of measurements of micro- and nanoparticles. To do this, it is necessary to ensure the traceability of particle size measurements to a unit of length –

Адрес для переписки

Соломахо Владимир Леонтьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-11-20
v.solomakho@gmail.com

Address for correspondence

Solomakho Vladimir L.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-11-20
v.solomakho@gmail.com

a meter, as well as equivalent diameters used in measurements in various dispersed media (aerosols and suspensions). To ensure traceability of particle diameter measurements to the meter, it is proposed to use a nanomeasuring machine with an atomic force microscope as a probing system. The paper presents a diagram of the measuring system, describes the principle of operation of the machine and the method for measuring particle sizes. The main alleged sources of errors in particle measurement by this method are also identified. To ensure the traceability of measurements of the hydrodynamic diameter of nanoparticles, which characterizes particles in a liquid (suspension), it is proposed to use a nanoparticle size analyzer that implements the method of dynamic light scattering. The scheme of the analyzer with a description of the principle of measuring the size of nanoparticles by the method of dynamic light scattering is presented in the paper. The scheme of the column of the analyzer of the differential electrical mobility of particles is presented to ensure the traceability of measurements of their diameter, which is equivalent in electrical mobility. Diameter is usually used to characterize particles in the aerosol state. A diagram of an analyzer for the differential electric mobility of particles is given with a description of the operating principle, a formula for calculating the particle diameter is derived.

Keywords: nanoparticle, diameter, dynamic light scattering, particle electrical mobility analyzer, nanomeasuring machine

For citation: Bagdun A. A., Solomakho V. L. (2022) Methods and Technical Means for Ensuring Uniformity of Nanoparticle Size Measurements. *Science and Technique*. 21 (6), 473–479. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-480-473-479> (in Russian)

Введение

Размер наночастиц – базовый параметр, влияющий на механические, физико-химические, электрические, оптические и другие свойства конечного продукта нанотехнологий. Поэтому важно оперативно и точно контролировать размерные параметры наночастиц, что возможно при наличии системы обеспечения метрологической прослеживаемости измерений их геометрических размеров. В зависимости от применяемых технологий наночастицы могут пребывать в различных исходных состояниях (например, в виде аэрозоля, взвеси, порошка), что делает процедуру обеспечения прослеживаемости измерений размеров наночастиц сложной многовекторной задачей. В [1] изучены мировой опыт обеспечения прослеживаемости измерений размеров наночастиц, методики и технические средства, позволяющие фрагментарно решать эту сложную метрологическую задачу.

Для системного решения проблемы необходимо создать комплекс оборудования, предназначенный для определения размеров наночастиц в дисперсных средах, который позволяет обеспечивать измерения частиц тремя методами – с помощью: наноизмерительной машины, определяющей действительный диаметр частиц в линейных величинах (прослеживаемый к единице длины – метру); анализатора размера наночастиц, позволяющего определять методом динамического рассеяния света гидродинамический диаметр частиц, находящихся в растворах в виде взвесей; анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц, позволяющего по их электрической подвижности определять размер частиц, находящихся в аэрозолях.

Физические принципы построения и конструктивные особенности оборудования, применяемого для контроля размеров наночастиц

Технические средства и методика измерения линейных размеров наночастиц. Основой оборудования, применяемого для измерения линейных размеров наночастиц, является наноизмерительная машина (NMM), реализующая интерферометрический метод измерения в полном соответствии со стандартным определением единицы длины – метра. Необходимая точность измерения наноизмерительной машины достигается за счет принципа компаратора Аббе по всем трем измерительным осям.

В конструкции NMM (рис. 1) зондирующая система и три средства измерения длины – интерферометры 1, 2, 3 – крепятся на корпусе, представляющем собой жесткую рамную конструкцию. Материал рамы – ситалл, имеющий малый коэффициент теплового расширения, что позволяет минимизировать погрешность измерения длины из-за изменений температуры. Корпус с измерительными интерферометрами и зондирующей системой установлен на гранитном основании. Температурные коэффициенты расширения рамы и гранитного основания существенно различаются. Для предотвращения возможных дополнительных механических напряжений и деформации в случае соединения двух частей в «единую» сборочную конструкцию и, как следствие, возникновения погрешности измерения размера наночастиц рама и гранитное основание соединяются между собой только в трех точках опоры. Направляюще-приводная система жестко закреплена на базирующей плоскости гранитного основания. Корпус и соединительные элементы

направляюще-приводной системы сконструированы отдельно и, таким образом, механически отделены друг от друга. Использование данной компоновки предотвращает механическую обратную связь от системы направляющих приводов к корпусу, на котором установлены измерительные интерферометры. Интерферометры установлены таким образом, что точка пересечения их оптических осей, совпадающих с линиями измерений по осям X , Y , Z , совмещена с точкой контакта зондирующей системы и объекта измерения.

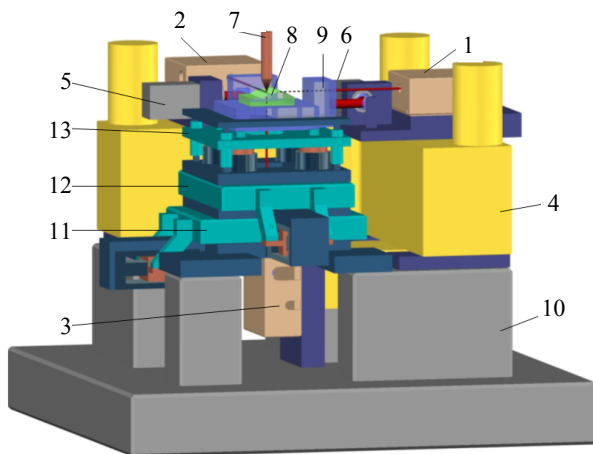


Рис. 1. Схема измерительной системы NMM:
1, 2, 3 – X -, Y - и Z -интерферометр; 4 – корпус;
5, 6 – угловой датчик; 7 – зондирующая система;
8 – объект измерения; 9 – угловое зеркало;
10 – гранитное основание; 11, 12, 13 – платформа,
перемещающаяся по осям X , Y , Z соответственно

Fig. 1. Diagram of the measuring system NMM:
1, 2, 3 – X -, Y - and Z -interferometer; 4 – frame;
5, 6 – angle sensor; 7 – probing system; 8 – measurement
object; 9 – corner mirror; 10 – granite base;
11, 12, 13 – platform moving along
the axes X , Y , Z respectively

Большая масса корпуса и зондирующей системы может сильно ограничить динамику позиционирования и измерения. Во время измерений необходимое взаимное положение друг относительно друга объекта измерения, зондирующей системы и корпуса достигается путем последовательных перемещений одного из указанных узлов при неподвижном состоянии двух других. Одновременное перемещение зондирующей системы и корпуса не допускается, поскольку последний, обладая большой массой, из-за возникающих постоянно изменяющихся динамических нагрузок может деформироваться во время движения, что неизбежно приведет к погрешности измерения. По этим причинам измерительные перемещения осуществляются

путем позиционирования объекта измерения, обладающего наименьшей массой.

В качестве средств измерений длины в наноизмерительной машине используются интерферометры, которые обладают необходимой разрешающей способностью и точностью измерения и позволяют обеспечивать прослеживаемость измерений к единице длины – метру. Объект измерения устанавливается на приспособление в виде углового зеркала, внешние грани которого служат оптическими отражателями для измерительных интерферометров. Объект лежит поверх углового зеркала и перемещается вместе с ним. Угловое зеркало установлено на трехкоординатном столе, представляющем собой комбинацию установочных платформ и систем приводов, обеспечивающих независимое перемещение платформ по осям X , Y , Z . В основу конструкции положена установочная платформа, которая крепится к основанию и обеспечивает перемещение узла по оси X . На ней крепится платформа, обеспечивающая перемещение узла по оси Y , к которой, в свою очередь, – платформа, обеспечивающая перемещение узла по оси Z . Платформы имеют технологические каналы для прохождения лучей интерферометра. Поскольку измерительный луч не должен прерываться, размеры каналов соответствуют рабочему диапазону перемещений.

Конструкция направляющих для каждой из осей X и Y представляет собой комбинацию роликовой направляющей и электромагнитного привода. Для оси Z используются три круглых коротких роликовых направляющих и четыре электромагнитных привода. Из-за малой длины направляющих риски возникновения дополнительных погрешностей, вызванных неточностью их угловой установки при монтаже, значительно выше, чем погрешности по другим осям. Дополнительно угловые датчики 5, 6 (рис. 1), установленные на корпусе, измеряют наклон углового зеркала на его обеих боковых сторонах. Управление углом наклона относительно осей X и Y возможно с помощью данных измерения угловых датчиков и использования четырех отдельных приводов. Вся система направляющих и приводов имеет канал для луча интерферометра оси Z . Поскольку измерительный луч не должен прерываться, размер канала соответствует рабочему диапазону перемещений. Основные технические характеристики наноизмерительной машины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики
наноизмерительной машины
Specifications of nanomeasuring machine

Диапазон измерений, мм	25×25×5
Разрешение, нм	0,1
Встраиваемые датчики	Атомно-силовой микроскоп, лазерный фокусный микроскоп, интерферометр белого света, щуп для 3D-измерений

Как видно из табл. 1, в NMM можно встраивать широкий спектр контактных и бесконтактных датчиков (зондирующих систем). Для измерения диаметра наночастиц в качестве зондирующей системы применяется атомно-силовой микроскоп (АСМ). После контакта с объектом измерений сигнал АСМ используется для регулирования вертикального положения стола, что дает возможность сканировать поверхность объекта измерения. Применение NMM с АСМ позволяет реализовать два способа измерения размера наночастиц – в вертикальной и латеральной плоскостях.

При измерении наночастицы в вертикальной плоскости определяется расстояние между вершиной одиночной частицы и подложкой (рис. 2), в латеральной плоскости – расстояние между двумя вершинами двух соседних частиц (рис. 3).

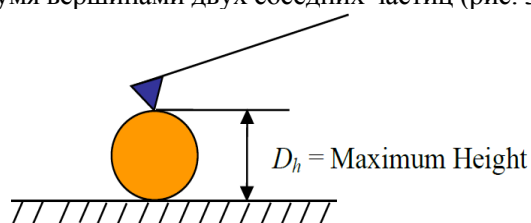


Рис. 2. Схема измерения наночастицы в вертикальной плоскости

Fig. 2. Scheme of measurement of nanoparticles in the vertical plane

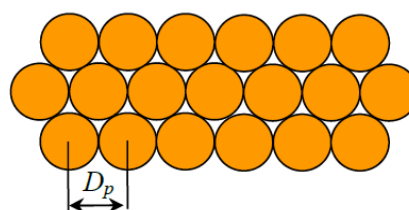


Рис. 3. Схема измерения наночастицы в латеральной плоскости

Fig. 3. Scheme for measuring a nanoparticle in the lateral plane

В [2] выделены основные источники погрешностей, возникающих при измерении размеров частиц с помощью наноизмерительной машины, а в [3–6] – методы их количественной оценки.

Технические средства и методика измерения эквивалентного диаметра наночастиц методом динамического рассеяния света. Динамическое рассеяние света (ДРС) – физический принцип, положенный в основу метода определения свойств и размера наночастиц (их гидродинамического диаметра) в жидкой фазе, который является эталонным для такого вида измерений в соответствии со стандартом ISO 2241:2017 «Гранулометрический анализ. Динамическое рассеяние света (DLS)». Техническое средство реализации этого метода – анализатор размера наночастиц, схема которого представлена на рис. 4.

Источник излучения, в качестве которого выступает лазер, обеспечивающий когерентность и монохроматичность генерируемого светового потока, испускает оптическое излучение, попадающее в аттенюатор. Это устройство ослабляет интенсивность оптических колебаний (испускаемого излучения) до уровня, подходящего для приемника излучения, не искажая при этом форму сигнала. Падающее излучение попадает в ячейку, содержащую образец наночастиц, после контакта с которыми часть света преломляется, а часть рассеивается.

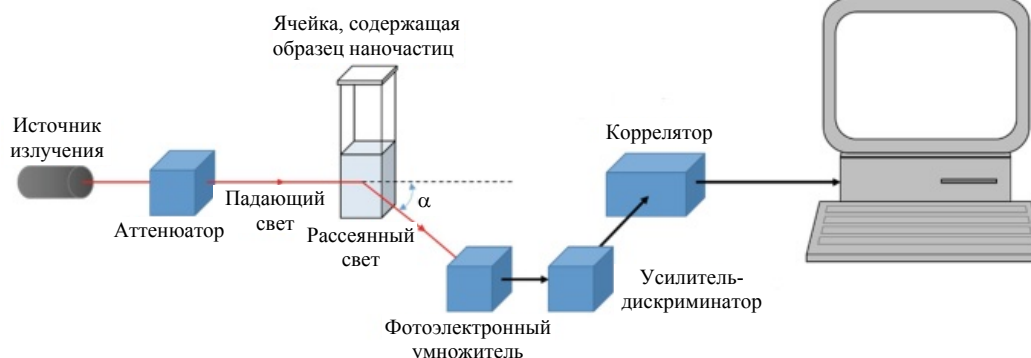


Рис. 4. Схема анализатора размера наночастиц

Fig. 4. Diagram of nanoparticle size analyzer

Преломленный свет собирается фотоловушкай, а рассеянный – под определенным углом собирается фотодетектором, в качестве которого выступает фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), преобразовывающий оптическое излучение в электрический сигнал. Электрический сигнал с ФЭУ обрабатывается усилителем-дискриминатором, после чего попадает в коррелятор, который вычисляет автокорреляционную функцию и строит ее зависимость от времени задержки электронного сигнала.

Гидродинамический диаметр выражается аналитически путем решения уравнения

$$d = \frac{k_B T \left[4\pi n \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2}{3\pi\Gamma\eta\lambda^2}, \quad (1)$$

где k_B – постоянная Больцмана; T – температура; n – показатель преломления частиц и дисперсионной среды; θ – угол сбора рассеянного излучения; Γ – скорость затухания автокорреляционной функции; η – вязкость дисперсионной среды; λ – длина волны лазерного излучения.

Технические характеристики анализатора размера наночастиц приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Технические характеристики анализатора
размера наночастиц**

Specifications of nanoparticle size analyzer

Диапазон измерений	диаметров частиц, нм	От 0,6 до 4000
	дзета-потенциала, мВ	От –200 до 200
Диапазон молекулярного веса, г/моль		$1 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^7$
Величина пробы для измерения, мл		От 0,012 до 4,000

В [7] выделены основные источники погрешностей, возникающих при измерении размеров частиц методом динамического рассеяния света. Методики количественной оценки параметров, входящих в (1), изложены в [8–11].

Технические средства и методика измерения наночастиц путем анализа их дифференциальной электрической подвижности. Система анализа дифференциальной электрической подвижности позволяет разделять частицы аэрозоля на основании их электрической подвижности и формировать на выходе поток монодисперсных частиц, обеспечивая их счет и соответственно определение размеров. Система включает три основных устройства: электростатический классификатор, колонну анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц и конденсационный счетчик частиц.

Электростатический классификатор включает входной импактор, отфильтровывающий

частицы размером более 2 мкм, расходомер, предназначенный для стабилизации скорости истечения потока обдува, нейтрализатор аэрозолей – биполярное зарядное устройство, в котором частицы сталкиваются с биполярными ионами, что приводит к равновесному распределению заряда, зависящего от размера частицы и источника высокого напряжения.

Колонна анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц (рис. 5) представляет собой длинную цилиндрическую камеру радиусом 1,958 см. Внутри ее находится стержень радиусом 0,937 см, концентричный стенкам камеры, расположенный таким образом, чтобы между стержнем и стенками камеры образовалось кольцевое пространство. Поток аэрозоля попадает в верхнюю часть камеры и соединяется с потоком чистого воздуха обдува, который создается насосом, помещенным в электростатический классификатор, фильтруется и контролируется термометром, гигрометром, манометром и высокоточным расходомером. Для достижения максимальной точности скорость потока воздуха обдува должна быть минимум в десять раз больше скорости потока входящего аэрозоля, измеренного входным импактором.

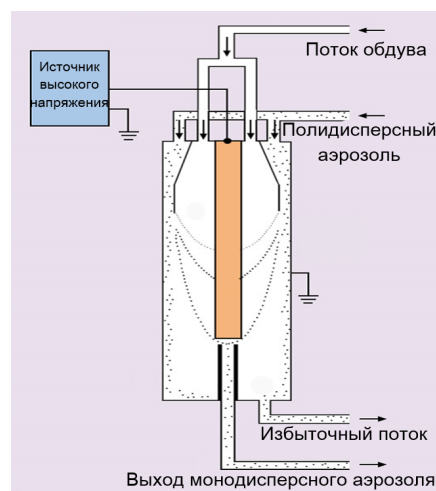


Рис. 5. Схема колонны анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц

Fig. 5. Scheme of the column of the analyzer for differential electrical mobility of particles

Объединенный поток поступает в зазор между коаксиально расположенными центральным стержнем и наружным цилиндром. Напряжение на стержень подается от источника высокого напряжения, находящегося в классификаторе, и регулируется в диапазоне от 0 до 10000 В. Внешняя цилиндрическая камера поддерживается потенциалом земли, что позволяет электрическому полю равномерно распространять-

ся в кольцевом пространстве ко дну камеры. По пути заряженные частицы движутся к центральному стержню из-за разности потенциалов напряжения. Малый радиальный зазор и высокая равномерность электрического поля создают необходимые условия, позволяющие проводить измерения электрической подвижности с высоким разрешением.

Небольшая щель в стержне дает возможность классифицировать частицы с электрической подвижностью Z , вычисляемой по формуле

$$Z = \frac{q_{sh}}{2\pi UL} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right), \quad (2)$$

где q_{sh} – скорость потока воздуха обдува; U – напряжение на стержне; L – длина от входа аэрозоля до щели; r_1, r_2 – внутренний и внешний радиусы кольцевого пространства соответственно.

При регулировании напряжение отбираются частицы с узким диапазоном подвижности. Выход практически моноразмерных частиц достигается путем выбора частиц на основании их подвижности. Поток, состоящий из моноразмерных частиц, проходит через отверстие стержня и выходит из классификатора, затем направляется в конденсационный счетчик частиц, где подсчитывается их количество. Остальной поток покидает классификатор через отвод избыточного потока и попадает в систему рециркуляции, которая прокачивает поток через классификатор, обеспечивая его необходимый объем и кондиционируя перед возвратом в виде потока воздуха обдува. Основные технические характеристики анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц
Technical characteristics of differential electrical particle mobility analyzer

Диапазон измерений диаметров частиц, нм		От 2 до 1000
Диапазон	скорости потока измеряемого аэрозоля, л/мин	От 0,2 до 2,1
	скорости потока воздуха обдува, л/мин	От 2 до 30
	напряжений анализатора, В	От 10 до 10000

Электрическая подвижность частицы Z равна скорости v заряженной частицы, деленной на напряженность электрического поля E :

$$Z = \frac{v}{E}. \quad (3)$$

Электрическая подвижность вычисляется из баланса электрических сил, возникающих

из-за заряда на частице, и силы сопротивления, определяемой законом Стокса:

$$neE = \frac{3\pi\mu v D_p}{C(D_p)}, \quad (4)$$

где n – количество зарядов; e – заряд электрона; μ – вязкость газа; D_p – диаметр частицы; $C(D_p)$ – коррекция скольжения Каннингема.

Из уравнений (2) и (4) можно определить диаметр частицы

$$D_p = \frac{eC(D_p)2UL}{q_{sh}3\mu \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}. \quad (5)$$

В [12] выделены основные источники погрешностей, возникающих при измерении размеров частиц с помощью анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц, а в [13–15] – методы их количественной оценки.

ВЫВОДЫ

1. По используемым методикам измерений и предварительно полученным техническим и метрологическим характеристикам описанный комплекс средств измерений соответствует мировым аналогам.

2. После проведения юридических и административных процедур комплекс средств измерений может быть принят в качестве эталона в области определения размеров наночастиц. Это означает возможность использования комплекса для метрологической оценки государственных стандартных образцов размеров наночастиц и обеспечения прослеживаемости их измерений к единице длины – метру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соломахо, В. Л. Современное состояние обеспечения прослеживаемости в области измерения наночастиц / В. Л. Соломахо, А. А. Багдун // Качество, стандартизация, контроль – теория и практика: матер. XX Междунар. науч.-техн. конф. Киев: АТМ Украины, 2020. С. 15–17.
2. Багдун, А. А. Погрешность передачи размера единицы длины – метра в нанометровом диапазоне измерений при использовании наноизмерительной машины / А. А. Багдун, В. Л. Соломахо // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2022. Т. 67, № 1. С. 86–93. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-86-93>.
3. Leach, R. Abbe Error/Offset / R. Leach // CIRP Encyclopedia of Production Engineering / R. Leach, eds. L. Laperrière, G. Reinhart. Springer, 2014. P. 1–4. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16793-1.

4. Edlén, B. The Refractive Index of Air / B. Edlén // *Metrologia*. 1966. No 2. P. 71–80. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/2/2/002>.
5. Jones, F. E. The Refractivity of Air / F. E. Jones // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1981. Vol. 86, No 1. P. 27–32. <https://doi.org/10.6028/JRES.086.002>.
6. Schmidt, I. Beiträge zur Verringerung der Positionierungsunsicherheit in der Nanopositionier und Nanomessmaschine / I. Schmidt. Ilmenau University of Technology, 2009. 25 p.
7. Багдун, А. А. Определение погрешности измерения диаметра наночастиц методом динамического рассеяния света / А. А. Багдун, В. Л. Соломахо // *Незрушаючий контроль і діагностика*. 2021. № 4. С. 32–37.
8. Garnaes, J. Diameter Measurements of Polystyrene Particles with Atomic Force Microscopy / J. Garnaes // *Measurement Science and Technology*. 2011. Vol. 22, Iss. 9. P. 22–094001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094001>.
9. Measuring Sub Nanometre Sizes Using Dynamic Light Scattering / M. Kaszuba [et al.] // *Journal of Nanoparticle Research*. 2008. No 10. P. 823–829. <https://doi.org/10.1007/s11051-007-9317-4>.
10. Uncertainty Analysis of Measurements of the Size of Nanoparticles in Aqueous Solutions Using Dynamic Light Scattering / S. Y. Kwon [et al.] // *Metrologia*. 2011. Vol. 48, Iss. 5. P. 417–425. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/5/024>.
11. Mohr, P. J. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998 / P. J. Mohr, B. N. Taylor // *Reviews of Modern Physics*. 2000. Vol. 72, No 2. P. 351–495. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.72.351>.
12. Solomakho, V. L. Determination of the Error in Transferring of Length Unit's Size when Measuring the Nanoparticles' Diameter Using an Analyzer of Particles' Differential Electrical Mobility / V. L. Solomakho, A. A. Bagdun // *Приборы и методы измерений*. 2021. Т. 12, № 3. P. 194–201. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2021-12-3-194-201>.
13. Precise Measurement of the Size of Nanoparticles by Dynamic Light Scattering with Uncertainty Analysis / K. Takahashi [et al.] // *Particle & Particle Systems Characterization*. 2008. Vol. 25, No 1. P. 31–38. <https://doi.org/10.1002/ppsc.200700015>.
14. Bipolar Charge Distribution of a Soft X-Ray Diffusion Charger / L. Tigges [et al.] // *Journal of Aerosol Science*. 2015. Vol. 90. P. 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.07.002>.
15. Slip Correction Measurements of Certified PSL Nanoparticles Using a Nanometer Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA) for Knudsen Number from 0.5 to 83 / J. H. Kim [et al.] // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2005. Vol. 110, No 1. P. 31–54. <https://doi.org/10.6028/jres.110.005>.
2. Bagdun A. A., Solomakho V. L. (2022) The Error of Transferring the Size of a Unit of Length – a Meter in the Nanometer Range Using the Nanomeasuring Machine. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 67 (1), 86–93. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-86-93> (in Russian).
3. Leach R. (2014) Abbe Error/Offset. Laperrière L., Reinhart G. (eds.) *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, 1–4. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16793-1.
4. Edlén B. (1966) The Refractive Index of Air. *Metrologia*, (2), 71–80. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/2/2/002>.
5. Jones F. E. (1981) The Refractivity of Air. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 86 (1), 27–32. <https://doi.org/10.6028/JRES.086.002>.
6. Schmidt I. (2009) *Beiträge Zur Verringerung der Positionierungsunsicherheit in der Nanopositionier und Nanomessmaschine*. Ilmenau University of Technology. 25 (in German).
7. Bagdun A. A., Solomakho V. L. (2021) Determination of the Measurement Error of the Diameter of Nanoparticles by the Method of Dynamic Light Scattering. *Nerazrushayushchiy Kontrol i Diagnostika* [Non-Destructive Testing and Diagnostics], (4), 32–37 (in Russian).
8. Garnaes J. (2011) Diameter Measurements of Polystyrene Particles with Atomic Force Microscopy. *Measurement Science and Technology*, 22 (9), 22–094001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094001>.
9. Kaszuba M., McKnight D., Connah M. T. [et al.] (2008) Measuring Sub Nanometre Sizes Using Dynamic Light Scattering. *Journal of Nanoparticle Research*, 10, 823–829. <https://doi.org/10.1007/s11051-007-9317-4>.
10. Kwon S. Y., Kim Y.-G., Lee S. H., Moon J. H. (2011) Uncertainty Analysis of Measurements of the Size of Nanoparticles in Aqueous Solutions Using Dynamic Light Scattering. *Metrologia*, 48 (5), 417–425. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/5/024>.
11. Mohr P. J., Taylor B. N. (2000) CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998. *Reviews of Modern Physics*, 72 (2), 351–495. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.72.351>.
12. Solomakho V. L., Bagdun A. A. (2021) Determination of the Error in Transferring of Length Unit's Size when Measuring the Nanoparticles' Diameter Using an Analyzer of Particles' Differential Electrical Mobility. *Pribyori i Metody Izmereniy = Devices and Methods of Measurements*, 12 (3), 194–201. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2021-12-3-194-201>.
13. Takahashi K., Kato H., Saito T., Matsuyama S., Kinugasa S. (2008) Precise Measurement of the Size of Nanoparticles by Dynamic Light Scattering with Uncertainty Analysis. *Particle & Particle Systems Characterization*, 25 (1), 31–38. <https://doi.org/10.1002/ppsc.200700015>.
14. Tigges L., Wiedensohler A., Weinhold K., Gandhi J., Schmid H.-J. (2015) Bipolar Charge Distribution of a Soft X-Ray Diffusion Charger. *Journal of Aerosol Science*, 90, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.07.002>.
15. Kim J. H., Mulholland G. W., Kukuck S. R., Pui D. Y. H. (2005) Slip Correction Measurements of Certified PSL Nanoparticles Using a Nanometer Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA) for Knudsen Number from 0.5 to 83. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 110 (1), 31–54. <https://doi.org/10.6028/jres.110.005>.

Поступила 06.06.2022

Подписана в печать 09.08.2022

Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Solomakho V. L., Bagdun A. A. (2020) Current State of Traceability in the Field of Nanoparticle Measurement. *Kachestvo, Standartizatsiya, Kontrol' – Teoriya i Praktika: Mater. XX Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Quality, Standardization, Control – Theory and Practice: Proceedings of the 20th International Scientific and Technical Conference]. Kyiv, ATM Ukraine, 15–17 (in Russian).

Received: 06.06.2022

Accepted: 09.08.2022

Published online: 30.11.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-480-489>

УДК 627.81:626.81/.84

Методика расчета подачи воды на орошение из водохранилищ многофункционального назначения (на примере Китая и Беларуси)

Докт. техн. наук, проф. Э. И. Михневич¹⁾, асп. Ли Цзэмин¹⁾

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

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

Реферат. В качестве источников воды на орошение наиболее часто используются водохранилища, имеющие многофункциональное назначение. В Китае создано большое количество водохранилищ, предназначенных для предотвращения наводнений, орошения, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения. В Беларуси для орошения используют водохранилища Солигорское, Любанское, Петровическое, Погостское и др. Полезный (регулирующий) объем водохранилища многофункционального назначения рассчитывается с учетом каждого потребителя на основе гидрологического и технико-экономического обоснования. Для каждого потребителя назначается требуемая расчетная обеспеченность и используется соответствующая методика определения водопотребления. Так, полезный объем воды, предназначенный для подачи на орошение, должен обеспечить требуемую оросительную способность и мощность оросительной системы. Водохранилища, предназначенные для водоснабжения, рассчитывают на 95–97%-ю обеспеченность стока, а для целей орошения – на 75–80%-ю обеспеченность в зонах умеренного и избыточного увлажнения. В засушливых, пустынных и полупустынных регионах Китая, где недостаток воды в засушливые годы может привести к большим потерям урожая, водохранилища для целей орошения рассчитывают на 90–95%-ю обеспеченность. Объемы и расходы воды в водохранилище для целей орошения должны покрывать потребности растений в воде в установленные сроки для года расчетной обеспеченности. В статье приведена формула для определения средневзвешенной оросительной нормы и объема воды, необходимого для орошения. Излагается методика по вычислению полезного объема водохранилища, предназначенного для промышленного водоснабжения и орошения, для которого регулирование стока рассчитывается на две обеспеченности водопотребления. Предложен метод определения расхода влекомых наносов для различных стадий их движения. Представлена формула для суммарного объема поступающих в водохранилище взвешенных и донных наносов.

Ключевые слова: системы орошения, водохранилища, регулирование стока, водопотребление, наносы

Для цитирования: Михневич, Э. И. Методика расчета подачи воды на орошение из водохранилищ многофункционального назначения (на примере Китая и Беларуси) / Э. И. Михневич, Ли Цзэмин // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 480–489. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-480-489>

Methodology for Calculating Water Supply for Irrigation from Reservoirs of Multifunctional Purpose (on the Example of China and Belarus)

E. I. Mikhnevich¹⁾, Li Ziming¹⁾

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

Abstract. Reservoirs with multifunctional purposes are the most widely used as sources of water for irrigation. In China, a large number of irrigation systems have been created using reservoirs as sources for flood prevention, irrigation, industrial and agricultural water supply. In Belarus, the Soligorsk, Lyuban, Petrovich, Pogost and other multifunctional reservoirs are

Адрес для переписки

Михневич Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-10
fes@bntu.by

Address for correspondence

Mikhnevich Eduard I.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-10
fes@bntu.by

used for irrigation. The useful (regulating) volume of a multifunctional reservoir consists of separate components calculated for each consumer in the basis of a hydrological and feasibility study. Thus, the useful volume of water intended for irrigation should provide the required irrigation capacity and capacity of the irrigation system. When determining the useful (regulating) volume of a multifunctional reservoir, the total water requirements for various purposes (water supply, irrigation, hydropower, etc.) are calculated. For each consumer, the required design supply is assigned and the appropriate method for determining water consumption is used. Reservoirs intended for water supply count on 95–97 % availability of runoff, and for irrigation purposes – on 75–80 % availability in zones of moderate and excessive moisture. In arid, desert and semi-desert regions of China, where lack of water in dry years can lead to large crop losses, irrigation reservoirs are expected to be 90–95 % secure. The volumes and costs of water in the reservoir for irrigation purposes must cover the needs of plants in water within the established time frame for the year of estimated availability. The paper provides a formula for determining the weighted average irrigation rate and the volume of water required for irrigation. A methodology is presented for calculating the useful volume of a reservoir intended for industrial water supply and irrigation, for which flow regulation is calculated for two supply of water consumption. A method is proposed for determining the flow rate of entrained sediments for various stages of their movement. A formula is presented for the total volume of suspended and bottom sediments entering the reservoir.

Keywords: irrigation systems, reservoirs, flow regulation, water consumption, sediments

For citation: Mikhnevich E. I., Li Ziming (2022) Methodology for Calculating Water Supply for Irrigation from Reservoirs of Multifunctional Purpose (on the Example of China and Belarus). *Science and Technique*. 21 (6), 480–489. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-480-489> (in Russian)

Введение

Обширные территории Китая, предназначенные для сельскохозяйственного использования, испытывают недостаток влаги. Особенно это характерно для засушливых, пустынных и полупустынных регионов, где, несмотря на обилие теплоты и света, очень трудно возделывать сельскохозяйственные культуры из-за дефицита влаги. Поэтому для таких земель орошение имеет исключительно важное значение. Китай – страна с самой большой площадью орошаемых земель в мире, которая превышает 1 млрд му (му – китайская единица измерения площади), или 70 млн га. В Беларуси также недостаток влаги испытывают многие влаголюбивые культуры даже в средние по водности годы, особенно в западных и южных регионах. В засушливые периоды (обеспеченность 80 % и более) дефицит влаги резко возрастает и орошение становится необходимым практически для всех сельскохозяйственных культур [1, 2].

Основной источник воды для орошения – реки. Для небольших участков орошения может использоваться незарегулированный речной сток. Однако его применение крайне ограничено в связи с низкой водностью рек в летний, самый напряженный, период орошения. На малых реках такого стока просто недостаточно, а забор воды на орошение в летнее время из больших рек может ухудшить условия для судоходства и нарушить экологическую обстановку. Поэтому в качестве источников воды на орошение наиболее широкое распространение

получили водохранилища, созданные только для орошения или имеющие многофункциональное назначение в разном сочетании: орошение, гидроэнергетика, водоснабжение, обводнение, рыбоводство, судоходство, борьба с наводнениями, рекреация [3].

На территории Беларуси построено около 160 водохранилищ различного хозяйственного назначения. Многие из них используются для орошения. Так, из Солигорского водохранилища подается вода на орошение земель площадью 3,5 тыс. га, из Любанского орошаются 600 га, из Петровичского – 5 тыс. га. Всего площадь орошения в 2020 г. составила 30,3 тыс. га, что почти в пять раз меньше по сравнению с 1990 г. (148,9 тыс. га). В связи с потеплением климата и развитием овощеводства в Беларуси уже в ближайшей перспективе потребуется значительное увеличение площадей орошаемых земель.

В Китае более 98000 водохранилищ, в том числе 4700 больших и средних и около 94000 малых. Большие водоемы имеют общую вместимость более 100 млн м³, водоемы среднего размера – 10–100 млн м³, малые водоемы – 1–10 млн м³, пруды – 100 тыс. – 1 млн м³. Роль водохранилищ в основном отражается в пяти аспектах: борьба с наводнениями, водоснабжение, сельскохозяйственное орошение, рыбоводство, улучшение экологической обстановки. В настоящее время Китай в течение года на различные нужды составляет более 270 млрд м³ воды из крупных и средних водохранилищ. Многие небольшие водохранилища стали важными источниками

воды для орошения в сельских районах и сыграли активную роль в борьбе с засухой и обеспечении питьевой водой сельского населения. Порядка 19 % от общего объема воды, подаваемого на орошение, поступает из подземных источников.

Орошение земель в Китае из поверхностных источников

Располагаясь на огромной территории, сельскохозяйственные земли в КНР значительно различаются по климатическим и почвенно-мелиоративным условиям. Соответственно различны по своим целям и размерам оросительные системы (ОС) Китая, которые делятся на четыре категории: очень крупные ОС – более 500000 му (33333 га), крупные – 300000–500000 му (20000–33333 га), средние – 10000–300000 му (667–20000 га), малые – менее 10000 му (667 га). Некоторые ОС имеют огромные размеры. Так, зона орошения Хэтао в среднем течении реки Хуанхэ – это одна из крупнейших ирригационных систем в Китае. Площадь орошения составляет: планируемая – 680 тыс. га, фактическая – 574 тыс. га. В 2021 г. суммарный объем водозабора оросительной зоны Хэтао составил 4,77 млрд м³.

Общая протяженность главного магистрального канала, подающего воду из реки Хуанхэ на ирригационную систему Хэтао, 188,6 км; от главного канала воду в зону орошения отводят 16 магистральных каналов. Расход воды на входе в главный канал составляет 565 м³/с, а в конце канала – 9 м³/с. При отдаче воды по трассе главного канала в отводящие магистральные каналы происходит ступенчатое снижение расхода по длине русла и соответственно уменьшается его поперечное сечение.

В зоне орошения Хэтао расположено семь водохранилищ среднего размера и девять небольших. В основном водохранилища предназначены для предотвращения наводнений. Из-за нестабильного количества воды их только частично используют в качестве источников сезонного орошения сельскохозяйственных угодий. Общая емкость водохранилищ среднего размера в зоне орошения на конец 2020 г. составляла 276,6 млн м³.

Зона орошения из водохранилища Сяохайцзы. Крупный ирригационный район Сяохайцзы расположен в пустыне Такла-Макан в нижнем течении бассейна реки Ерцян (Северо-Западный регион Китая). Сельское хозяйство в данном регионе является основной отраслью экономики и соответственно главным источником дохода населения. Этот район имеет теплый, умеренно континентальный, сухой ветреный климат с большим количеством света, скудными осадками, сильным испарением, а также с очень хрупкой экологической средой. Сельскохозяйственное производство здесь полностью зависит от орошения. Единственный регулируемый источник орошения – водохранилище Сяохайцзы емкостью 700 млн м³ и площадью водной поверхности 155 км² (рис. 1).



Рис. 1. Водохранилище Сяохайцзы для орошения земель в Северно-Западном регионе Китая

Fig. 1. Xiaohaizi Reservoir for land irrigation in the Northwest region of China

Водоохранилище окружено пустынными холмами, в отдельных местах – со скудными лесополосами. В настоящее время в зоне мелиорации планируемая площадь орошения составляет 83,3 тыс. га, из которых 60 тыс. га приходится на пахотные земли.

В Китае также создано большое количество сравнительно небольших систем орошения с использованием в качестве источников водохранилищ многофункционального назначения среднего и малого размеров: для предотвращения наводнений, орошения, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения. Для примера приведем сведения о среднем водохранилище Меншань и малых водохранилищах в округе Чжанву.

Зона орошения из водохранилища Меншань. Водохранилище Меншань (рис. 2) расположено в среднем течении реки Фаньян – притока первого порядка реки Сену (бассейн реки Хуанхэ), имеет площадь водосбора 288 км². Реализация проекта по орошению территории завершена в 1975 г. На системе имеется шесть магистральных каналов протяженностью 43,8 км, 31 распределительный канал протяженностью 93,3 км и многочисленные сооружения различных типов, основными из которых являются плотина, водосброс и водовыпуск для подачи воды потребителям. Водохранилище общей емкостью 90,25 млн м³ обеспечивает площадь орошения 6453,3 га, на которую подается вода в объеме 5,1 млн м³.

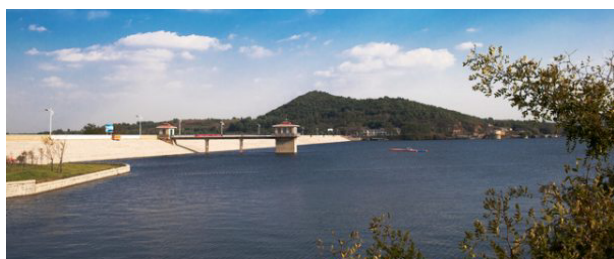


Рис. 2. Водохранилище Меншань, Китай

Fig. 2. Mengshan Reservoir, China

Зона орошения из водохранилищ в округе Чжанву. В округе Чжанву орошение осуществляется из ряда малых водохранилищ. Орошаемая площадь 3593 га. Среднегодовое количество осадков в округе Чжанву 488 мм, распределение их по территории и во времени крайне неравномерно. Так, в самый влажный год (1998) максимальное количество осадков составило 909 мм, в сухой (1982) их минимальное количество было 183 мм.

Регулирование стока для создания водохранилищ комплексного использования

Для комплексного использования водохранилища рассчитывают баланс водных ресурсов бассейна реки, на которой оно создается, и суммарное водопотребление, в соответствии с которым определяют требуемый расход воды. Приток воды находят гидрологическим расчетом. По данным многолетнего ряда наблюдений за стоком реки строят кривую обеспеченности и на основании технико-экономических

показателей выбирают расчетную обеспеченность. Наиболее напряженными периодами по снабжению водой орошаемых земель являются в многолетнем разрезе маловодные годы, а в течение года – летняя межень. Поэтому гидрологические расчеты выполняют для многолетнего и внутригодового распределения стока. При расчете регулирования стока выбирается маловодный год с высокой обеспеченностью.

Кроме того, проверяется возможность осуществления в годы малой обеспеченности сброса максимальных паводковых расходов. В многоводные годы объем стока больше емкости водохранилища, поэтому часть стока сбрасывают через водосбросное сооружение. Уровень подъема воды в водохранилище над нормальным подпорным уровнем (НПУ) обычно принимается в пределах 0,5–1,0 м [4]. Размеры водосбросного сооружения определяют гидравлическим расчетом на пропуск расчетного максимального расхода 5%-й обеспеченности (нормальные условия эксплуатации) и проверяют на пропуск расхода 1%-й обеспеченности (чрезвычайные условия эксплуатации) [5].

Определение емкости водохранилища

Полный объем водохранилища $V_{\text{плн}}$ складывается из полезного (регулирующего) $V_{\text{плз}}$ и мертвого $V_{\text{мо}}$ объемов, из потерь воды на испарение $V_{\text{исп}}$ и фильтрацию $V_{\text{ф}}$ за расчетный период [6, 7]

$$V_{\text{плн}} = V_{\text{плз}} + V_{\text{мо}} + V_{\text{исп}} + V_{\text{ф}}. \quad (1)$$

Мертвый объем не участвует в регулировании стока, глубину и объем $V_{\text{мо}}$ назначают исходя из санитарно-технических требований (обычно глубину принимают не менее 2 м) и проверяют по условиям заиливания (срок заиливания порядка 50 лет), а также увязывают с требованиями рыбного хозяйства и судоходства. В отличие от полезного объема, значения $V_{\text{мо}}$ и его глубина в меньшей степени зависят от вида потребителей. При назначении величин из санитарно-технических требований во многих случаях соблюдаются и другие условия.

Более сложной задачей является определение полезного объема водохранилища многофункционального назначения, который со-

стоит из отдельных составляющих, рассчитываемых для каждого потребителя на основе гидрологического и технико-экономического обоснования. При определении полезного (регулирующего) объема водохранилища многофункционального назначения рассчитывают суммарные потребности в воде для различных целей (водоснабжение, орошение и др.). Для каждого потребителя назначается требуемая расчетная обеспеченность и используется соответствующая методика определения водопотребления. Так, объем воды, предназначенный для водоснабжения, определяют для года 95–97%-й обеспеченности, а для целей орошения – 75–80%-й обеспеченности в зонах умеренного и избыточного увлажнения (к этим зонам можно отнести Беларусь, восточные и юго-восточные регионы Китая) и 90–95%-й – в засушливых, пустынных и полупустынных регионах Китая, где недостаток воды в засушливые годы может привести к большим потерям урожая.

Более 70 % общего объема воды на техническое (промышленное) водоснабжение в Беларуси подается из водохранилищ. Часто создаются водохранилища комплексного назначения – для целей ирригации и промышленного водоснабжения. Рассмотрим методику расчета таких водохранилищ. Для подачи воды на орошение примем обеспеченность $p = 80\%$, а для промышленного водоснабжения $p = 95\%$. Следовательно, регулирование стока необходимо рассчитывать на две обеспеченности водопотребления. Особенностью такой задачи является то, что подача воды на орошение будет полностью обеспечена при $p \leq 80\%$. При $p > 80\%$ подача воды на орошение уменьшается и достигает максимального снижения для засушливого года обеспеченностью $p = 95\%$. Степень уменьшения подачи воды на орошение можно оценить по кривой зависимости модульных коэффициентов K_i от обеспеченности стока p_i , которую строят по данным многолетнего ряда наблюдений о средних значениях расходов воды, представленных в виде статистического ряда, размещая значения годовых расходов воды в убывающем порядке от наибольшего к наименьшему [8, 9]. По полученным данным p_i и K_i наносят точки эмпирической кривой (рис. 3).

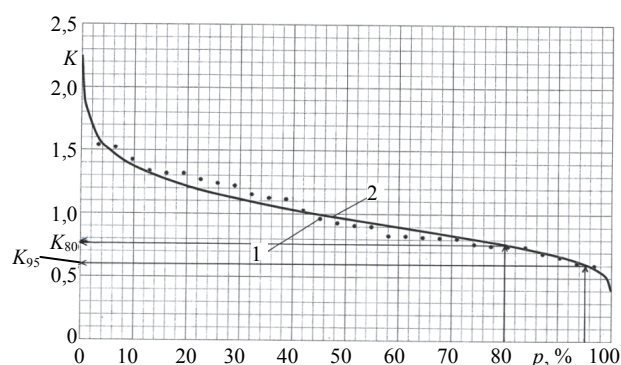


Рис. 3. Кривая связи модульных коэффициентов и обеспеченности годового стока:

1 – точки эмпирической кривой; 2 – аналитическая кривая

Fig. 3. Modular coefficients relationship curve and security of annual runoff:

1 – empirical curve points; 2 – analytical curve

При недостаточной продолжительности ряда наблюдений для определения значения расхода с обеспеченностью, выходящей за пределы экспериментальной кривой, используют теоретические (аналитические) кривые трехпараметрического гамма-распределения. Параметры аналитической кривой обеспеченности – коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s – находят с помощью метода наибольшего правдоподобия [6, 10]. Зная значение модульного коэффициента K_p , можно вычислить расход воды расчетной обеспеченностью $Q_p = K_p \bar{Q}$ ($\bar{Q}$ – среднегодовой расход воды).

Степень снижения подачи воды на орошение при расчетной обеспеченности промышленного водоснабжения $p = 95\%$ можно оценить отношением модульных коэффициентов K_{95}/K_{80} , которое для речных бассейнов Беларуси близко к 0,8. Аналогично определяется снижение подачи и в другие годы в диапазоне обеспеченностей $p = 80–95\%$. На рис. 3 показаны значения K_{95} и K_{80} .

Потребность в воде для целей орошения

Полезный объем воды, предназначенной для подачи на орошение, должен обеспечить требуемую оросительную способность (необходимую площадь орошения при расчетном режиме орошения сельскохозяйственных культур), а также мощность оросительной системы (потребность в оросительной воде в критические периоды вегетации растений) [1, 2]. При этом рассчитывают суммарное количество

воды, которое может дать источник (за месяц (декаду), оросительный период, год), и его колебания во времени.

Объем воды $V_{ор}$, необходимый для орошения, рассчитывают по формуле [1, 2]

$$V_{ор} = \frac{M_{ср} F}{\eta}, \quad (2)$$

где $M_{ср}$ – средневзвешенная оросительная норма брутто, м³/га; F – площадь орошения нетто, га; η – КПД оросительной системы,

$$\eta = \frac{W_{п}}{W_{в}}, \quad (3)$$

$W_{п}$ – объем воды, поступившей на поля ОС; $W_{в}$ – то же, забранной в ОС из водоисточника.

Для расчета средневзвешенной оросительной нормы $M_{ср}$ предварительно определяется оросительная норма M_i для каждой культуры, занимающей заданную площадь F_i [1, 11]:

$$M_i = E - P - \Delta W - Q_{к.п}, \quad (4)$$

где E – максимальная эвапотранспирация (водопотребление культуры при оптимальном водном режиме) за весь период вегетации; P – атмосферные осадки за этот же период за вычетом потерь на сток; ΔW – используемые запасы влаги в расчетном слое почвы: $\Delta W = W_{н} - W_{ни}$; $W_{н}$ – влагозапасы в расчетном слое почвы на начало вегетации; $W_{ни}$ – нижний предел заданного увлажнения почвы на день биологической спелости; $Q_{к.п}$ – капиллярная подпитка корнеобитаемого слоя от грунтовых вод.

Тогда

$$M_{ср} = \frac{\sum M_i F_i}{\sum F_i}. \quad (5)$$

Следует отметить, что потребности воды на орошение тесно связаны с метеорологическими характеристиками. В более влажные годы эти потребности уменьшаются, а в засушливые – значительно увеличиваются. В то же время некоторые потребители воды не зависят от показателя влажности в году. Так, потребности воды на техническое водоснабжение опре-

деляются главным образом технологией производства.

Потребности в воде на промышленное водоснабжение состоят из хозяйственно-бытового водопотребления рабочими и потребления воды на технологические нужды [12]. Дополнительно предусматривается запас воды на пожаротушение. Водоснабжение является практически постоянным по годам и может приниматься равномерным в течение года.

Суммарные необходимые для потребителей расходы и объемы воды определяют для каждого месяца маловодного года и всего года. Используя внутригодовое распределение стока для данного речного бассейна, находят приток воды в каждом месяце. Сопоставление величины притока с суммарными потребностями в воде показывает возможность обеспечения их водными ресурсами.

Если суммарные потребности U меньше стока расчетного маловодного года $W_{год.95}$, то регулирование стока обеспечивают созданием водохранилища сезонного регулирования, при $U > W_{год.95}$ применяют многолетнее регулирование. При многолетнем регулировании объем водохранилища увеличивают на сумму дефицитов стока в маловодные годы.

Чтобы определить, при каких отметках водного зеркала водохранилище будет заполнено необходимым объемом воды, на основании топографической характеристики речной долины, представляющей зависимость площади горизонталей Ω от уровня H , строят морфометрические характеристики водохранилища: кривую площадей водной поверхности $\Omega = f(H)$ и кривую объемов водохранилища $V = f(H)$ [7, 8, 13].

Полезный объем водохранилища без учета потерь определяют на основе балансовых расчетов таблично-цифровым способом: сопоставляют помесечно сток и отдачу и вычисляют избытки и дефициты [6, 13]. Объем воды, представляющий наибольшую сумму дефицитов, является полезным объемом водохранилища $V_{плз}$.

Расчет объема наносов, поступающих в водохранилище

Среднемноголетний объем наносов V_n реки, на которой создано водохранилище, представ-

ляет сумму объемов взвешенных $V_{взв}$ и влекомых (донных) наносов $V_{вл}$: $V_n = V_{взв} + V_{вл}$ [6, 7, 13]. Среднегодовой расход взвешенных наносов R_n определяют по формуле [6, 7]

$$R_n = S \bar{Q}_{год}, \quad (6)$$

где S – среднегодовая мутность воды, кг/м^3 ; $\bar{Q}_{год}$ – среднегодовой расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$.

Транзитная часть взвешенных наносов, выносимых в нижний бьеф, принимается в среднем $\delta = 0,20\text{--}0,30$, соответственно $(1 - \delta)$ – та часть наносов, которая отложится в водохранилище.

Принимая нормативный срок службы водохранилища $t_{сл}$ (обычно 50 лет), можно определить отложившийся в водохранилище за этот срок объем взвешенных наносов

$$V_{взв} = 31,54 S \bar{Q}_{год} t_{сл} \frac{1 - \delta}{\rho_{взв}}, \quad (7)$$

где 31,54 – продолжительность года, млн с; $\rho_{взв}$ – плотность взвешенных наносов, в среднем $1000\text{--}1500 \text{ кг/м}^3$.

Для определения мутности воды S существуют надежные способы и приборы, поэтому можно с достаточной степенью точности по (6) рассчитать расход взвешенных наносов. Более сложная задача – определение расхода влекомых (донных) наносов, которые зависят от физико-механических характеристик грунта, слагающего дно русла реки, и соотношения фактической и неразмывающей скоростей течения воды в русле [14, 15]. Надежных способов и приборов определения расхода влекомых наносов не имеется. В практических расчетах используют эмпирические и полуэмпирические зависимости, полученные на основе обобщения опытных данных [16, 17]. Исходя из их анализа, авторы статьи для определения расхода влекомых наносов предлагают следующую методику.

Вначале определяется стадия движения донных наносов в русле с помощью полученной ранее формулы для различных стадий движения наносов [15]

$$v_{доп} = a \left(\frac{R}{d} \right)^x \sqrt{\frac{n_y}{\rho_b} P_s}, \quad (8)$$

где $v_{доп}$ – допускаемая средняя скорость потока, м/с ; a , x – коэффициент и показатель степени соответственно, принимается в зависимости от стадии движения наносов: $a = 2,06$, $x = 0,167$ – для начала влечения отдельных зерен грунта; $a = 3,18$, $x = 0,14$ – для начала образования гряд; $a = 5,96$, $x = 0,10$ – для начала взвешивания грунта; d – расчетный диаметр грунта, м, в однородных грунтах (коэффициент неоднородности $\eta = d_{85}/d_{10} \leq 4$) принимается равным среднему диаметру, т. е. $d = d_{50}$, в неоднородных ($\eta > 4$) $d = d_{85}$ – диаметр крупной фракции, образующей естественную отмостку; n_y – коэффициент условий работы, который при мутности потока $S < 0,1 \text{ кг/м}^3$ принимается $n_y = 1$, а при $S \geq 0,1 \text{ кг/м}^3$ $n_y = 1 + 2S$; P_s – показатель прочности (размывоустойчивости) грунта, Па, определяется по формуле

$$P_s = \gamma_1 df + c_p = g \rho_1 df + c_p; \quad (9)$$

c_p – удельное структурное сцепление грунта, Па; g – ускорение силы тяжести, м/с^2 ; f – коэффициент внутреннего трения грунта в воде; γ_1 , ρ_1 – соответственно удельный вес, Н/м^3 , и плотность, кг/м^3 , грунта, взвешенного водой,

$$\rho_1 = (\rho_s - \rho_b)(1 - n_s); \quad (10)$$

ρ_s , ρ_b – плотность частиц грунта и воды, кг/м^3 ; n_s – пористость грунта, доли ед.

Скорость, которая соответствует стадии начала влечения грунта на дне, называют допускаемой неразмывающей $v_{н.доп}$. Формула для ее определения с учетом приведенных значений a и x имеет вид

$$v_{н.доп} = 2,06 \left(\frac{R}{d} \right)^{0,167} \sqrt{\frac{n_y}{\rho_b} P_s}. \quad (11)$$

Далее проводится сравнение фактической скорости течения воды v и допускаемой $v_{доп}$ по (8), принимая значения $a = 3,18$, $x = 0,14$ – для стадии грядообразования. Если окажется, что $v < v_{доп}$, то в русле гряды отсутствуют

и передвижение по дну наносов происходит путем перекачивания, скольжения и сальтации за счет скорости $(v - v_{н.доп})$. В этом случае расход влекомых наносов $q_{вл}$, кг/(с·м), небольшой (порядка 2–5 % от взвешенных) и может быть определен по формуле И. И. Леви (приведена в [16]). То есть расход наносов на единицу ширины русла

$$q_{вл} = 2,0 \left(\frac{v}{\sqrt{gd}} \right)^3 d (v - v_{н.доп}) \left(\frac{d}{h} \right)^{0,25}, \quad (12)$$

где d – средний диаметр частиц грунта, м; h – глубина потока, м; $v_{н.доп}$ – допускаемая неразмывающая скорость, определяемая по (11), м/с.

Расход влекомых наносов для всего русла будет определяться произведением $q_{вл}B$ (где B – ширина русла, соответствующая среднемугодовому годовому расходу $\bar{Q}_{год}$).

Если $v > v_{доп}$ ($v_{доп}$ – для стадии грядообразования), то в русле образуются гряды и расход влекомых наносов можно определять исходя из скорости их движения C_r . Значения C_r можно рассчитывать по формуле Г. В. Железнякова и В. К. Дебольского (приведена в [16]) или Б. Ф. Снисченко и З. Д. Копалиани (приведена в [17]) соответственно:

$$C_r = 0,001 \sqrt{gh} \left(\frac{v}{v_{н.доп}} \frac{h}{h_r} \sqrt{\frac{u}{v_{н.доп}}} \right)^2; \quad (13)$$

$$C_r = 0,032 (v - v_{н.доп}) \left(\frac{v}{v_{н.доп}} \right) \left(\frac{d}{h_r} \right)^{0,7}, \quad (14)$$

где u – гидравлическая крупность наносов, м/с; h_r – высота гряд, м.

Элементарный расход донных наносов на единицу ширины русла $q_{вл}$, перемещаемых в виде гряд, с учетом коэффициента полноты профиля гряды, равного 0,6, определяется по формуле

$$q_{вл} = 0,6 C_r h_r. \quad (15)$$

Высоту гряд в [17] рекомендуется принимать $h_r = 0,25h$ при глубине потока $h < 1$ м и $h_r = 0,20 + 0,1h$ при $h \geq 1$ м.

Если $v > v_{доп}$ ($v_{доп}$ – для стадии начала взвешивания грунта, для которой $a = 5,96$,

$x = 0,10$), то в русле формируются большие гряды и могут наблюдаться другие макроформы; скорость потока может в 1,6–1,8 раза и более превышать $v_{н.доп}$. В этом случае имеют место интенсивное влечение грунта и начало его взвешивания. При этом скорость смещения гряд в меньшей степени зависит от допускаемой неразмывающей скорости, а является главным образом функцией скорости потока v и числа Фруда Fr . Для такой стадии на основании обобщения натурных и лабораторных опытов в [17] получена зависимость

$$C_r = 0,019 v Fr^{2,9}, \quad (16)$$

$$\text{где } Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}.$$

Соответственно элементарный расход донных наносов

$$q_{вл} = 0,011 h_r \frac{v^{3,9}}{(gh)^{1,45}}. \quad (17)$$

Отношение массы влекомых наносов к массе взвешенных наносов β при таком режиме руслового процесса увеличивается и для равнинных рек Беларуси достигает $\beta = 0,10–0,15$.

Объем влекомых наносов, поступающих в водохранилище в течение срока его службы:

$$V_{вл} = 31,54 q_{вл} B t_{сл} / \rho_{вл}, \quad (18)$$

где $\rho_{вл}$ – плотность влекомых (донных) наносов, в среднем $\rho_{вл} = 1500–1600$ кг/м³.

Помимо взвешенных и влекомых наносов, поступающих в водохранилище с речным потоком, в водоем дополнительно поступают наносы за счет разрушения берегов, а также склоновой и ветровой эрозии. Как показывают натурные наблюдения, это количество наносов можно учесть с помощью коэффициента $\varphi = 1,10–1,20$ [6], на который умножают суммарный объем взвешенных и влекомых наносов $(V_{взв} + V_{вл})$. Тогда объем V_n заиления водохранилища за период его эксплуатации с учетом (7) и (18) можно выразить формулой

$$V_n = 31,54 t_{сл} \left(S \bar{Q}_{год} \frac{1-\delta}{\rho_{взв}} + \frac{q_{вл} B}{\rho_{вл}} \right) \varphi. \quad (19)$$

В течение срока службы водохранилища наносами заполняется большая часть мертвого

объема $V_{\text{мо}}$, но при этом обеспечивается необходимая подача воды потребителям из регулирующей емкости. Из условия заиливания водохранилища принимают $V_{\text{мо}} \geq V_{\text{н}}$. Исходя из санитарно-технических требований, необходимый мертвый объем водохранилища (с учетом опыта эксплуатации водоемов в Беларуси) принимается $V_{\text{мо}} \geq 0,25V_{\text{плз}}$ [6, 13]. Окончательно за объем $V_{\text{мо}}$ берут большее значение, рассчитанное согласно указанным условиям и требованиям.

Располагая данными о полезном объеме водохранилища, рассчитанном без учета потерь воды, и принятом мертвом объеме, определяют потери на испарение с водной поверхности и фильтрацию [6, 13] и полезный объем водохранилища с учетом потерь балансовым таблично-цифровым способом, описанным выше, с тем отличием, что находят значения избытков и дефицитов воды, суммируя помесечное потребление (отдачу) воды и потери. Диспетчерский график работы водохранилища строится по данным таблично-цифрового расчета, на котором отмечаются зоны использования объемов воды для водоснабжения и орошения.

ВЫВОДЫ

1. В качестве источников воды на орошение земель в Китае и Беларуси наиболее широкое распространение получили водохранилища, которые чаще всего имеют многофункциональное назначение для целей промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения, орошения, гидроэнергетики, предотвращения наводнений.

2. При определении суммарных потребностей в воде для каждого потребителя назначается требуемая расчетная обеспеченность и используется соответствующая методика определения водопотребления. Так, объем воды для целей водоснабжения следует рассчитывать на сток 95–97%-й обеспеченности, а для орошения – 75–80%-й обеспеченности в зонах умеренного и избыточного увлажнения, в которых находится Беларусь, восточные и юго-восточные регионы Китая, и 90–95%-й обеспеченности – в засушливых, пустынных и полупустынных регионах Китая, где недостаток воды в засушливые годы может привести к большим

потерям урожая. Приведена формула для определения средневзвешенной оросительной нормы и объема воды, необходимого для орошения.

3. Представлена методика расчета регулирования стока на две обеспеченности для определения полезного объема водохранилища, создаваемого для целей промышленного водоснабжения и орошения.

4. Предложены методика определения расхода донных наносов, учитывающая стадии их движения, и формула для расчета суммарного объема заиливания водохранилища взвешенными и донными наносами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лихацевич, А. П. Сельскохозяйственные мелиорации / А. П. Лихацевич, М. Г. Голченко, Г. И. Михайлов; под ред. А. П. Лихацевича. Минск: ИВЦ Минфина, 2010. 464 с.
2. Мелиорация и водное хозяйство: справочник в 8 т. / под ред. Б. Б. Шумакова. М.: Агропромиздат, 1990. Т. 6: Орошение. 415 с.
3. Гидрологический мониторинг Республики Беларусь / под общ. ред. А. И. Полищука, Г. С. Чекана. Минск: Книгосбор, 2009. 268 с.
4. Богославчик, П. М. Проектирование и расчеты гидротехнических сооружений / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов. Минск: Вышэйш. шк., 2018. 366 с.
5. Мелиоративные системы и сооружения. Нормы проектирования: ТКП 45-3.04-8–2005 (02250). Введ. 01.07.2006. Минск: Минстройархитектуры, 2006. 130 с.
6. Михневич, Э. И. Гидрология / Э. И. Михневич. Минск: БНТУ, 2021. 151 с.
7. Железняков, Г. В. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока / Г. В. Железняков, Т. А. Неговская, Е. Е. Овчаров; под ред. Г. В. Железнякова. М.: Колос, 1984. 205 с.
8. Парахневич, В. Т. Гидравлика, гидрология, гидрометрия водотоков / В. Т. Парахневич. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. 368 с.
9. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения: ТКП 45-3.04-168–2009 (02250). Введ. 01.07.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 64 с.
10. Определение расчетных гидрологических характеристик: ПП-98 к СНиП 2.01.14–83. Минск: Минстройархитектуры, 1998. 174 с.
11. Оросительные системы. Правила проектирования: ТКП 45-3.04-178–2009 (02250). Введ. 01.07.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 76 с.
12. Михневич, Э. И. Водопроводные сети / Э. И. Михневич, С. В. Андреюк. Минск: ИВЦ Минфина, 2021. 256 с.
13. Михневич, Э. И. Расчет водохранилища сезонного регулирования / Э. И. Михневич. Минск: БНТУ, 2021. 55 с.

14. Копалиани, З. Д. Проблема предельных условий для начала движения донных частиц в водных потоках / З. Д. Копалиани, О. А. Петровская // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. / под ред. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова. СПб.: ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2019. Вып. 4. С. 80–122.
15. Михневич, Э. И. Открытые водотоки: пропускная способность и устойчивость / Э. И. Михневич. Минск: БНТУ, 2021. 311 с.
16. Барышников, Н. Б. Динамика русловых потоков / Н. Б. Барышников. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: РГГМУ, 2016. 342 с.
17. Кондратьев, Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Смищенко. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 271 с.

Поступила 11.08.2022

Подписана в печать 18.10.2022

Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Likhatsevich A. P., Golchenko M. G., Mikhaylov G. I. (2010) *Agricultural Melioration*. Minsk, Publishing House of Information and Computing Center of Ministry of Finance. 464 (in Russian).
2. Shumakov B. B. (ed.) [et al.] (1990) *Reclamation and Water Management: Reference Book. Vol. 6: Irrigation*. Moscow, Agropromizdat Publ. 415 (in Russian).
3. Polishchuk A. I., Chekan G. S. (eds.) (2009) *Hydrological Monitoring of the Republic of Belarus*. Minsk, Knigobor Publ. 268 (in Russian).
4. Bogoslavchik P. M., Kruglov G. G. (2018) *Design and Calculations of Hydraulic Structures*. Minsk, Vysheyskaya Shkola Publ. 366 (in Russian).
5. TKP [Technical Code of Common Practice] 45-3.04-8–2005 (02250) *Ameliorative Systems and Structures. Design Standards*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2006. 130 (in Russian).
6. Mikhnevich E. I. (2021) *Hydrology*. Minsk, Belarusian National Technical University. 151 (in Russian).
7. Zheleznyakov G. V., Negovskaya T. A., Ovcharov E. E. (1984) *Hydrology, Hydrometry and Flow Regulation*. Moscow, Kolos Publ. 205 (in Russian).
8. Parakhnevich V. T. (2016) *Hydraulics, Hydrology, Hydrometry of Watercourses*. Minsk, Novoye Znanie Publ.; Moscow, INFRA-M Publ. 368 (in Russian).
9. TKP [Technical Code of Common Practice] 45-3.04-168–2009 (02250). *Estimated Hydrological Characteristics*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 64 (in Russian).
10. P1-98 for SNiP [Construction Standards and Regulations] 2.01.14–83. *Determination of Calculated Hydrological Characteristics*. Minsk: Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 1998. 174 (in Russian).
11. TKP [Technical Code of Common Practice] 45-3.04-178–2009 (02250). *Irrigation Systems. Design Rules*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 76 (in Russian).
12. Mikhnevich E. I., Andreyuk S. V. (2021) *Water Networks*. Minsk, Publishing House of Information and Computing Center of Ministry of Finance, 2021. 256 (in Russian).
13. Mikhnevich E. I. (2021) *Calculation of the Reservoir of Seasonal Regulation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 55 (in Russian).
14. Kopaliani Z. D., Petrovskaya O. A. (2019) Problem of Limiting Conditions for the Beginning of the Movement of Bottom Particles in Water Flows. *Vodnye Puti i Ruslovyye Protsessy. Gidrotekhnicheskie Sooruzheniya Vodnykh Putei: Sb. Nauch. Tr.* [Waterways and Riverbed Processes. Hydraulic Structures of Waterways: Collection of Research Papers]. Saint-Petersburg, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Iss. 4, 80–122 (in Russian).
15. Mikhnevich E. I. (2021) *Open Watercourses: Carrying Capacity and Sustainability*. Minsk, Belarusian National Technical University. 311 (in Russian).
16. Baryshnikov N. B. (2016) *Channel Flow Dynamics*. 2nd ed. Saint-Petersburg, Russian Hydrometeorological University. 342 (in Russian).
17. Kondratiev N. E., Popov I. V., Snishchenko B. F. (1982) *Fundamentals of the Hydromorphological Theory of the Channel Process*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 271 (in Russian).

Received: 11.08.2022

Accepted: 18.10.2022

Published online: 30.11.2022

Thermodynamic Approaches in Assessing Quality, Efficiency and Environmental Friendliness of Asphalt Concrete

Zhang Qing^{1,2)}, V. N. Romaniuk³⁾, Yu. G. Aliakseyeu³⁾, Hou Qiang^{1,2)}

¹⁾Henan Gaoyuan Highway Maintenance Technology Co. Ltd. (Henan, People's Republic of China),

²⁾Henan Key Laboratory of High Grade Highway Detection and Maintenance Technology (Henan, People's Republic of China),

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

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

Abstract. The experience of developed countries shows that the development of the road network and transport infrastructure determines the intensity of economic ties and is one of the most important conditions for the development of the state's economy. Optimization of the composition and production technology of asphalt concrete mixture – the basis of paved roads, is of great importance, both from an economic and environmental point of view. The production of asphalt concrete mixture directly (during the production process at asphalt concrete plants) and indirectly (during delivery from the plant to the place of installation) determines the energy costs for the production of asphalt concrete. At asphalt-concrete plants the specific energy consumption per ton of hot asphalt concrete mixture varies from 0.3 to 0.7 GJ. The range in energy costs is large. This situation indicates the presence of a significant energy-saving potential of asphalt concrete mixture thermal technology. The exergy analysis of technical systems proposed in this paper, which are operated in the asphalt concrete mixture production processes, makes it possible to judge the efficiency of energy use in their thermal units. This approach is expedient not only in the primary production of asphalt concrete mixture, but also for more environmentally friendly, energy- and resource-saving production processes for the operation of equipment during the regeneration of road asphalt concrete.

Keywords: asphalt concrete mixture, bitumen, sand-gravel mixture, mineral powder, intensive energy saving, thermodynamic analysis, exergy method, concentration component of flow exergy

For citation: Zhang Qing, Romaniuk V. N., Aliakseyeu Yu. G., Hou Qiang (2022) Thermodynamic Approaches in Assessing Quality, Efficiency and Environmental Friendliness of Asphalt Concrete. *Science and Technique*. 21 (6), 490–498. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-490-498>

Термодинамические подходы при оценке качества, эффективности и экологичности асфальтобетона

Канд. техн. наук, доц. Чжан Цин^{1,2)}, докт. техн. наук, проф. В. Н. Романюк³⁾,
канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев³⁾, магистр Хоу Цян^{1,2)}

¹⁾Хэнаньская компания «Гаююань» по технологическому обслуживанию автомагистралей (Хэнань, Китайская Народная Республика),

²⁾Хэнаньская ключевая лаборатория высококачественных технологий по диагностике и обслуживанию автомагистралей (Хэнань, Китайская Народная Республика),

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

Аннотация. Опыт передовых стран показывает, что состояние дорожной сети и транспортной инфраструктуры определяет интенсивность экономических связей и является одним из важнейших условий развития экономики государства. Оптимизация состава и технологии производства асфальтобетонной смеси – основы дорог с твердым покрытием имеет большое значение как с экономической, так и с экологической точки зрения. Затраты энергии на создание асфальтобетона включают непосредственные (получение смеси на асфальтобетонных заводах) и косвенные (доставка с завода на место укладки) затраты. На асфальтобетонных заводах удельные затраты энергии на тонну горячей асфальтобетонной смеси изменяются от 0,3 до 0,7 ГДж, т. е. в широком диапазоне. Данная ситуация указывает на наличие значительного энергосберегающего потенциала теплотехнологии производства асфальтобетонной смеси. В статье предложен эксергетический анализ технических систем, эксплуатируемых в процессах производства асфальтобетонной смеси.

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

который позволяет судить об эффективности использования энергии в их тепловых агрегатах. Данный подход целесообразен не только в первичном производстве асфальтобетонной смеси, но и в экологически более чистых, энерго- и ресурсосберегающих производственных процессах, например в работе оборудования при регенерации дорожных асфальтобетонных покрытий.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, битум, песчано-щебеночная смесь, минеральный порошок, интенсивное энергосбережение, термодинамический анализ, эксергетический метод, концентрационная составляющая эксергии потока

Для цитирования: Термодинамические подходы при оценке качества, эффективности и экологичности асфальтобетона / Чжан Цин [и др.] // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 6. С. 490–498. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-490-498>

Introduction

One of the factors in the growth of the economy in the People's Republic of China is the colossal development of its transport infrastructure. The length of the road network in 2021 exceeded 5 million kilometers [1]. The road network in the Republic of Belarus is 87 thousand kilometers, including 75.6 thousand kilometers of paved roads [2]. Most of these roads are roads with asphalt concrete pavement. The main energy costs for creating an asphalt concrete pavement are determined by the energy spent on the production of asphalt concrete mixture (ACM) at the plant and the energy costs associated with its transportation and installation. The specific energy consumption per tonne of hot asphalt concrete mixture at asphalt mixing plants (AMP) is about 0.4 GJ. In China and the Commonwealth of Independent States (CIS) at asphalt-concrete plants (ACP), the specific energy consumption per ton of hot ACM, depending on the moisture content of the feedstock, ranges from 0.3 GJ to 0.7 GJ [3, 4]. In a comparative assessment of the specific energy intensity of various materials and processes, the ACM production can not be classified as energy-intensive. At the same time, the ACM production is a large-scale production at the plants. Consumers and producers of the asphalt concrete mixture are increasingly aware of the fact that the cost of energy resources is rising. This leads to a change in the ACM cost structure, to an increase in its energy component, which has already exceeded 35 % in the creation of the road surface.

The ACM composition is different, first of all, on the granulometric composition of mineral materials (MM). In research, we focus on the ACM of the generalized mass composition. The resulting error of this approach is comparable to the error in determining some of the initial data and most of the calculation methods. In this regard, in the context of this work, the ACM is used, while its mass composition is calculated on the total mass (Fig. 1).

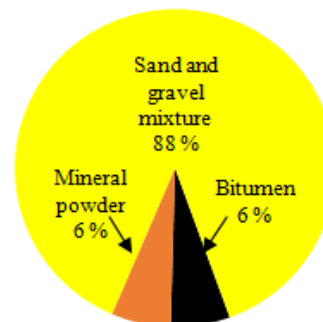


Fig. 1. Structure of generalized composition of asphalt concrete mixture

The theoretical energy costs for obtaining ACM can be determined by the difference between the sum of the enthalpies of the finished ACM and the removed moisture, on the one hand, and the total initial enthalpies of the ACM components, on the other hand. The moisture content of the sand-gravel mixture (SGM) in the initial state, ideally, should not exceed the equilibrium moisture content of 4 %. Energy costs caused by SGM over 4 % and bitumen water cut are unjustified additional costs [5]. At the same time, their value is such that it eliminates all measures to improve the operation of heat-technological units (Fig. 2, 3).

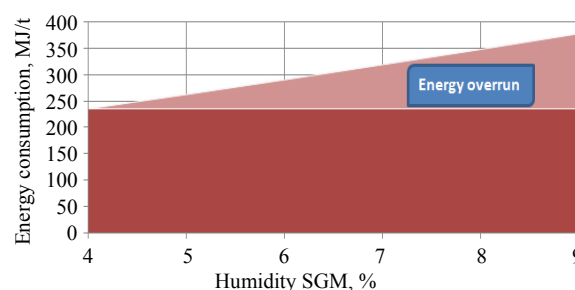


Fig. 2. Energy consumption for heating sand-gravel mixture depending on humidity

For further analysis, it is convenient to assume that the initial temperature of the ACM components is 0 °C. This is close enough to the average ambient temperature during the asphalt paving season and will not greatly affect the result and conclusions. In this case, the theoretical energy costs

for preparation of ACM and their structure are determined by the value and structure of the ACM enthalpy for a specific temperature of the mixture, taking into account the costs of heating and evaporation of the equilibrium SGM moisture.

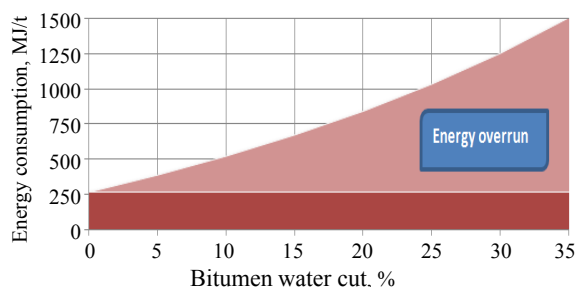


Fig. 3. Energy consumption for removing water from bitumen depending on its water content

For further analysis, it is convenient to assume that the initial temperature of the ACM components is 0 °C. This is close enough to the average ambient temperature during the asphalt paving season and will not greatly affect the result and conclusions. In this case, the theoretical energy costs for preparation of ACM and their structure are determined by the value and structure of the ACM enthalpy for a specific temperature of the mixture, taking into account the costs of heating and evaporation of the equilibrium SGM moisture.

According to technological requirements ACM temperature should be such that at the time of laying and compaction it is in the range of 80–120 °C [6]. Taking into account the delivery time and weather conditions, the ACM temperature should be within 140–180 °C after the mixing unit. In this case, the value equal to 160 °C can be taken as a characteristic value of the ACM temperature when making a general description. At this temperature, the ACM enthalpy is 0.15 GJ/t, and its structure is shown in Fig. 4.

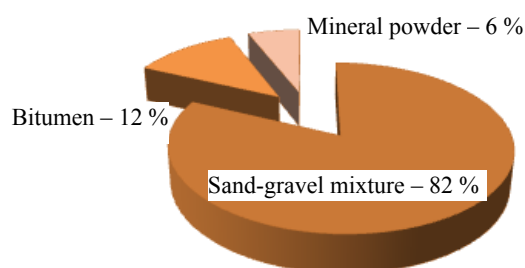


Fig. 4. Structure of asphalt concrete mixture enthalpy

Theoretical energy costs for ACM with a temperature of 160 °C, taking into account the cost of heating bitumen to 100 °C and evaporation of

equilibrium moisture from SMG (≈ 4 %), will be 0.24 GJ/t (Fig. 5).

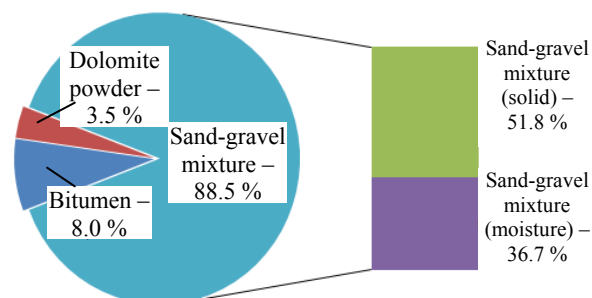


Fig. 5. Structure of theoretical energy costs for preparation of asphalt concrete mixture

The structure of real costs at asphalt-concrete plants is shown in Fig. 6.

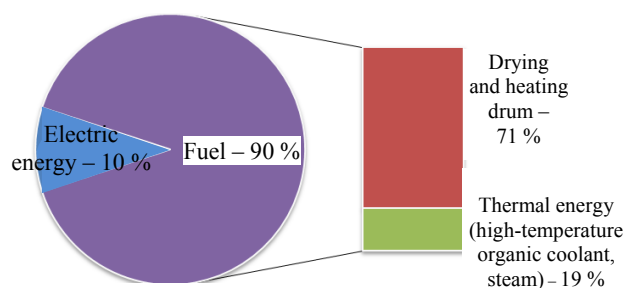


Fig. 6. Structure of incoming part of asphalt-concrete plant energy balance

An analysis of ACP energy consumption reveals a discrepancy in the technical level of heat treatment of each of the heat-technological stages of production: heating of MM requires 92 % of fuel costs, and 79 % is spent [7]. This means that there is a disproportionate over-expenditure of energy in comparison with theoretical costs in the technological stages of ACM production. There is a certain discrepancy between the levels of energy supply of subsystems: a vehicle – an asphalt-concrete mixing plant. The energy efficiency of the process of obtaining ACM against the background of the production of other materials is low. Naturally, this situation requires analysis and correction.

Another distinguishing feature of the organization of energy supply of the ACM heat technology is that heat treatment at each stage is carried out autonomously and leads to excessive consumption of energy resources. Such a decision is a common practice for enterprises built in the past period of energy abundance. Its introduction was connected:

with the ease of implementation of the technological chain; with simple operation of the equipment; with its service by low-skilled personnel. The internal organization of each of the selected sections of the ACM is considered below when analyzing the energy supply for heat technology at the ACP. Taking into account high requirements for ecology, reducing environmental pollution from thermal and harmful emissions into the atmosphere when working with ACM, this work on optimizing its production technologies is particularly relevant [8–10].

Energy components of asphalt concrete mixture

The exergy of the ACM flow contains all components of the exergy of the substance flow and is determined by the relation, MJ/t:

$$e_{ACM} = e_{pT, ACM} + e_{r, ACM} + e_{k, ACM}, \quad (1)$$

where $e_{k, ACM}$ – concentration component of the exergy of the ACM flux, MJ/t; $e_{pT, ACM}$ – thermo-mechanical component of the ACM exergy, MJ/t:

$$e_{pT, ACM} = \sum \left(g_j \bar{c}_{p,j} \Big|_0^{t_{abc}} \right) \times \\ \times \left((t_{ACM} - t_0) - T_0 \ln(T_{ACM}/T_0) \right), \quad (2)$$

where g_j – mass fraction ACM composition per total weight; $\bar{c}_{p,j} \Big|_0^{t_{abc}}$ – heat capacities of ACM components – specific mass, isobaric, average in the temperature range $t_0 - t_{abc}$, MJ/(tK); T_0 , t_0 – ambient temperature, K; T_{ACM} , t_{ACM} – temperature ACM, °C; $e_{r, ACM}$ – the reaction component of the exergy of the ACM flux, MJ/t:

$$e_{r, ACM} = \sum g_j e_{\mu, j}, \quad (3)$$

where $e_{\mu, j}$ – specific mass chemical components of exergy of ACM components, MJ/t.

In general, ACM consists of: mineral aggregate SGM, mineral filler (mineral powder (MP)) and bitumen (B). The chemical component of the exergy of the mineral aggregate is zero ($e_{\mu, SGM} = 0$), since SGM is represented primarily by silicon SiO_2 , whose chemical exergy is zero [11]. From the same sources, the specific mass exergy

of the mineral filler $e_{\mu, MP} = 1045$ MJ/t is found, which is most often represented by dolomite CaCO_3 . The value of the specific mass chemical component of the bitumen exergy $e_{\mu, B}$ cannot be calculated using methods intended for pure chemical compounds. The main difficulty in the calculation is that the exact molecular structure of bitumen is unknown. By its structure, bitumen is a colloidal system in which asphaltenes are dispersed, and resins and oils are the dispersion medium – a mixture of hydrocarbons and their nitrogenous, oxygenated, sulfurous and their derivatives. The chemical composition of bitumen is very complex. So, they contain saturated hydrocarbons from C_9H_{20} to $\text{C}_{30}\text{H}_{62}$. The elemental composition of bitumen varies within the limits: carbon 70–80 %, hydrogen 10–15, sulfur 2–9, oxygen 1–5, nitrogen 0–2 %.

The calculation of the chemical component of bitumen exergy is complicated by the fact that, until recently, CIS refineries produced bitumen not as a target product, for example, with light oil products, but as a residual, by-product. According to the known group composition of bitumen, the method recommended for calculating the chemical component of crude oil exergy is suitable for determining the chemical component of exergy, MJ/t [12]:

$$e_{\mu} = e_c (1066 + 67,4\omega + \\ + 1875\nu + 3784\sigma + 177,8\xi), \quad (4)$$

where $e_c = 7,817C$ – minimum specific mass exergy of liquid hydrocarbon substances, MJ/t; $\omega = 6H/C$; $\nu = 3/7 \cdot (N/C)$; $\sigma = 1 + 3(H - (O - S)/8)/C$; $\xi = 3/8 \cdot (S/C)$ – dimensionless coefficients depending on bitumen composition; C, H, O, N – mass fractions of components, $C + H + O + N = 1$.

The composition of bitumen in this case can be averaged: $C \approx 0,70\text{--}0,85$ – mass fraction of carbon; $H \approx 0,08\text{--}0,12$ – the same of hydrogen; $O \approx 0,002\text{--}0,05$ – the same of oxygen; $S \approx 0,005\text{--}0,7$ – the same of sulfur; $N \approx 0,002\text{--}0,01$ – the same of nitrogen.

Calculations of the value of the specific mass chemical component of bitumen exergy give $e_{\mu} = 38\text{--}44$ GJ/t. Taking into account the errors of the calculation chain, we can write $e_{\mu} = 41$ GJ/t,

which is consistent with the values of chemical exergy e_μ of other petroleum products: unrefined gasoline $e_\mu = 46$ GJ/t, fuel oil $e_\mu = 42$ GJ/t. Taking into consideration the step of change in e_μ during the transition to a heavier fraction of oil products, the given value should be considered acceptable.

The quantity $e_{k,ACM}$ included in relation (1), represents the exergy component of the ACM flux, which is commonly called the concentration component. Its value is determined by the minimum thermodynamic work required to separate the components [12]. The indicated work in this case is required to overcome the adhesive interaction of bitumen with MM [6, 13]. The value of this component affects the quality of the finished ACM. It is necessary to consider the exergy transformations that occur during the process of creating ACM. Let us turn to a graphical representation of the balance of exergy of the mixing unit, in which the process of creating ACM takes place (Fig. 7).

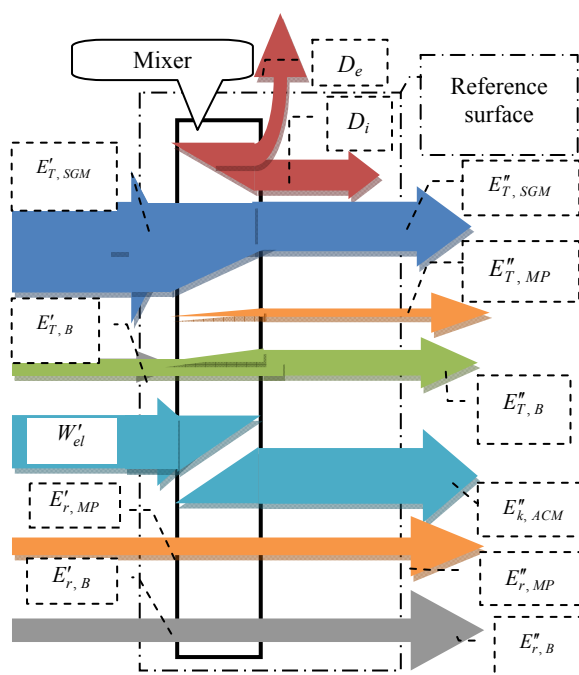


Fig. 7. Exergy transformations of asphalt concrete mixture formation process

At the Fig. 7 $E_{T,SGM}$, $E_{T,MP}$, $E_{T,B}$ – thermal components of exergy of sand-gravel mixture, mineral powder, bitumen flow, respectively, MJ; $E_{r,MP}$, $E_{r,B}$ – reaction components of exergy of

mineral powder, bitumen flow, respectively, MJ; W_{el} – energy spent on mixing, MJ; $E_{k,ACM}$ – concentration component of exergy of asphalt concrete mix flow, MJ; D_e , D_i – external and internal exergy losses, respectively, MJ; upper indices ('), (") – to denote input and output streams, respectively.

The block diagram of the mixer is shown in Fig. 8.

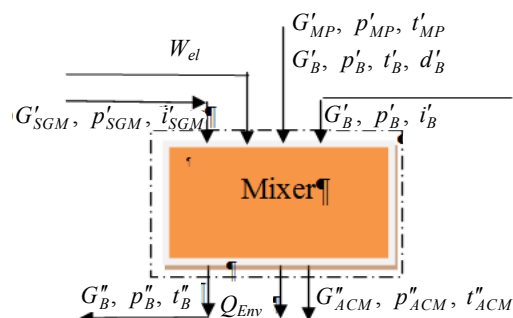


Fig. 8. Mixer flow diagram: G_B , p_B , t_B , i_B , d_B – flow rate, pressure, temperature, specific enthalpy of flow and bitumen density, respectively); G_{SGM} , p_{SGM} , i_{SGM} – flow rate, pressure, specific enthalpy of flow of sand-gravel mixture, respectively; G_{MP} , p_{MP} , t_{MP} – flow rate, pressure, temperature of mineral powder, respectively; G_{ACM} , p_{ACM} , t_{ACM} – flow rate, pressure, temperature of asphalt concrete mixture; Q_{Env} – heat flow to the environment

From the analysis of the Grassmann diagram, it follows that during the ongoing mixing process, the ACM components do not change and, therefore, are the terms of the transit exergy: $E''_{T,SGM}$ – thermal component of the exergy of the SGM outlet stream, MJ; $E'_{T,B}$ – the same of the bitumen input stream, MJ; $E'_{r,MP} = E''_{r,MP}$ – reaction component of the exergy of the MP flow, MJ; $E'_{r,B} = E''_{r,B}$ – reaction component of the exergy of the bitumen flow, MJ.

Part of the beneficial effect of the transformations in the mixer are:

- change in the thermal component of the exergy of the MP flow, in this case equal to the value of the thermal component of the exergy of the output MP flow – $E''_{T,MP}$, MJ. This fact follows from the fact that at the input the value of the thermal component of the MP flow exergy is equal to zero (thermal MP parameters are equal to the parameters

of the environment – Env) and the output value determines the corresponding beneficial effect;

- change in the thermal component of the exergy of the bitumen flow, determined by the difference $E''_{T,B} - E'_{T,B}$, MJ;

- determining component of the beneficial effect – $E''_{k,ACM}$, MJ, – the concentration component of the ACM exergy, the appearance of which is associated with the preparation of a mixture from the initial ingredients [12].

Thus, the concentration component of ACM exergy acquires a completely new aspect – technological, reflecting the minimum required energy consumption to ensure the required product quality. Determination of $E_{k,ACM}$ – the concentration component of the exergy of the ACM flow gives a quantitative estimate of the minimum required energy impact in the mixer on the initial ACM components [6]. Thermodynamic approaches in assessing the quality of asphalt concrete are becoming more widespread [14]. The proposed quantitative assessment of the energy impact in the mixing unit based on the concentration component of exergy is proposed for the first time.

Physically, the possibility and legitimacy of its use follows from the following. No chemical relations occur during the creation process in the mixer, nor during laying, nor during compaction of the ACM. This allows us to speak about the invariance of the reactive component of ACM and asphalt concrete in relation to the reactive components of the elements included in their composition. It is obvious that the minimum energy of separation into the initial ACM components is determined by the energy of the adhesive interaction between MM and the bituminous binder. On the other hand, it determines the concentration component of ACM and asphalt concrete [12]. For the onset of complete adhesive interaction, one of the necessary conditions is to ensure contact of the bituminous binder with all particles of SGM and MP, including aggregated into complexes, which is achieved, first of all, in the mixer. To ensure the required contact of the entire surface of the MM and the binder, it is necessary to expend energy in the mixer. The minimum value of which, as follows from the presented Grassmann diagram (Fig. 7), is determined by the concentration component of

exergy ACM – $E_{k,ACM}$. External D_e and internal D_i exergy losses are determined by the excess of the mechanical energy expended in the mixer over its minimum value, equal to the exergy change in the ongoing process. The exergy required for the occurrence of the concentration component of ACM is contributed by input streams and nothing else (Fig. 7). As a result of the redistribution of exergy in the course of transformations with ACM stirring, its required value is provided. As follows from the analysis of the Grassmann diagram, it can only be associated with the flow of mechanical work (Fig. 7). The work of mechanical mixing $L = W'$ can not be less $E_{k,ACM}$, since only in this case the key condition of exergy balance is fulfilled in the form of the relation $\sum E' > \sum E''$. This is the determining factor that makes it possible to relate the concentration of ACM exergy to the energy consumption for mixing. Thus, the adhesive interaction of the ACM components is provided through the introduction of the necessary mechanical energy for mixing in the mixer. In the ideal case, the minimum energy consumption for the formation of a mixture is determined by the adhesive interaction energy and heat treatment.

To confirm the connection between the adhesive interaction and the concentration component of ACM exergy, it is necessary to consider the process of ACM compaction and subsequent cooling of the resulting asphalt concrete sheet to ambient temperature [15]. A thermodynamic theory has been developed to estimate the duration of the overhaul period of an asphalt concrete pavement with traffic intensity which is to be established at the design stage [14, 16]. During the laying of the roadway, the quasi-dispersed material, which is ACM, is transformed into a monolithic material, which is asphalt concrete. The exergy balance of the processes for producing asphalt concrete is presented in the form of a Grassmann diagram in Fig. 9, where $E_{T,ACM}$ – thermal component of the asphalt concrete mixture exergy, MJ; $E_{r,MP}$, $E_{r,B}$ – reaction components of the exergy of the flow of mineral powder and bitumen included in the asphalt mix, respectively, MJ; L'_{ME} – mechanical energy

for sealing, MJ; $E''_{m, ACM}$ – mechanical component of asphalt concrete exergy, MJ.

We restrict ourselves to a qualitative image of flows without a quantitative analysis of the energy transformations of ACM into asphalt concrete. The mechanical energy expended on compaction of the ACM layer ensures a reduction in the porosity of the dispersed material to values at which the cohesive interaction is switched on. In combination with adhesive interaction, the required strength of the resulting asphalt concrete monolith is formed.

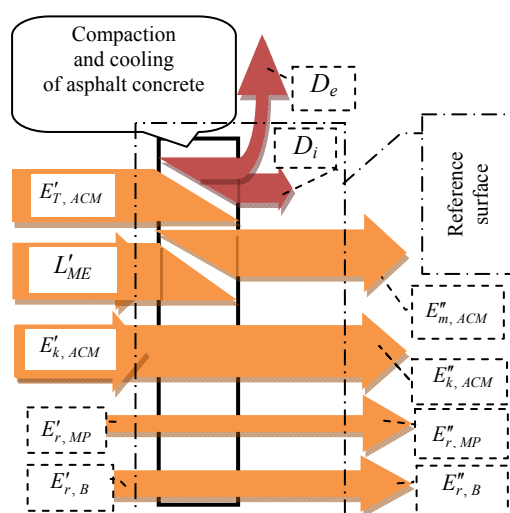


Fig. 9. Exergy transformations of the process of formation of asphalt concrete during compaction of the asphalt concrete mixture and cooling of the road bed

The cohesive bond depends on the temperature and pressure of the material. This indicates the need to attribute the energy of cohesive interaction of bitumen volumes in asphalt concrete to the thermomechanical component of the asphalt concrete exergy. The adhesive interaction in this case can be considered as the factor that determines the concentration component of the exergy which is not related to the temperature and pressure at which the substance is located. The above picture of the interactions of the components of ACM and asphalt concrete is in good agreement with the physical model of these materials (Fig. 10, 11) [17, 18]. Free bitumen fills the intergranular ACM space, defining a cohesive bond. Structured bitumen forms a film on the surface of MM, defining an adhesive bond.

In order to obtain a qualitative physical model, an energy consideration of the transformations of the transition process from ACM to asphalt concrete has been carried out in the paper. The model allows us to separate the role of cohesion and adhesion in the asphalt concrete exergy, to associate the first with the thermomechanical component, to confirm the relationship between the adhesive interaction of mineral materials with bituminous binder and the concentration component of the ACM exergy.

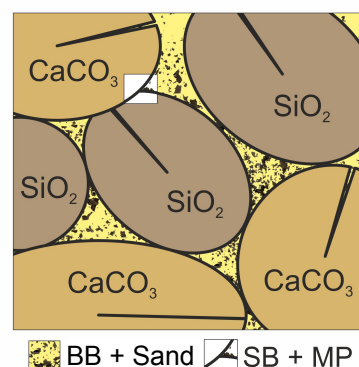


Fig. 10. Physical model of volume of asphalt concrete mixture [17, 18]: BB – bulk bitumen; SB – structured bitumen; MP – mineral powder

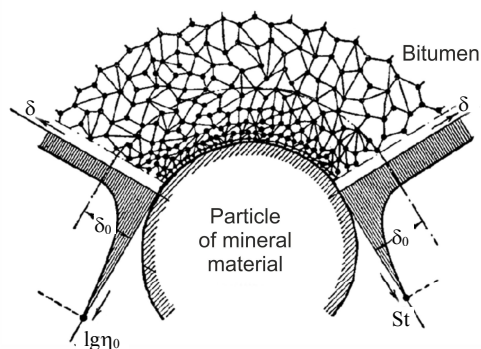


Fig. 11. Interaction of mineral materials and bitumen [17, 18]: δ – normal distance from mineral materials surface; δ_0 – thickness of structured bitumen layer; St – strength; η – viscosity

An important aspect that needs to be emphasized is the independence of the concentration component of ACM exergy from the amount of bitumen in the mixture, if it does not exceed a certain threshold value. In ACM, bitumen is divided into two types: structured or filmy and loose or bulk. The threshold minimum amount of bitumen in ACM is determined by the required amount of structured bitumen, which ensures that the entire

MM surface is covered with a film. There is a transition zone between structured bitumen (SB) and bulk bitumen (BB). In the transitional or diffuse zone, bitumen has a partially ordered structure. Its thickness varies from one to several microns. In the diffuse zone, there is a smooth transition from the properties of the bitumen of the structured film to the properties of the bitumen of the bulk zone. The structured layer of bitumen both in composition and thickness depends on the mineral substrate, which affects the composition of the bitumen film. The most active components of bitumen in relation to MM are asphaltenes containing active functional groups, due to which asphaltenes are accumulated in the structured zone. In it, high-molecular-weight bitumen compounds are ordered and form a solid-like layer, extremely saturated with asphaltenes, adjoining the mineral substrate. Asphaltenes are oriented among themselves by polar groups in chains. The film thickness depends on the size of the mineral particles and the material of the particles and, most often, does not exceed one micron. The relationship between the amount of SB and BB in ACM is considered in sufficient detail in a number of works, from which one can single out [19]. The data given in it allows you to calculate the threshold value of the bitumen content in ACM. The threshold value depends on a number of factors, primarily on the composition and size of the MM particles included in the ACM. The optimal technological thickness of the bitumen film in a mixture with optimized granulometry is the one at which the material with the highest strength is formed. The ratios between SB and BB in ACM, corresponding to the optimal technological thickness of the bitumen film, determined in [19], are shown in Fig. 12. From the analysis of the given data, it follows that in real ACM, the amount of bitumen always exceeds the threshold value determined by the amount of SB, and the reliability of determining the concentration component of exergy does not depend on it [20]. For this reason, further the question of the relationship between the value of the concentration component and the bitumen content in ACM in the context of the problem posed should be considered resolved.

The results of the evaluation according to the proposed method in finding the concentration component of the ACM exergy indicate a slight

influence of the error on the results of the thermodynamic efficiency of the ACM production process and is sufficient to solve the problems of resource saving and improve the environmental situation at the ACP [21, 22].

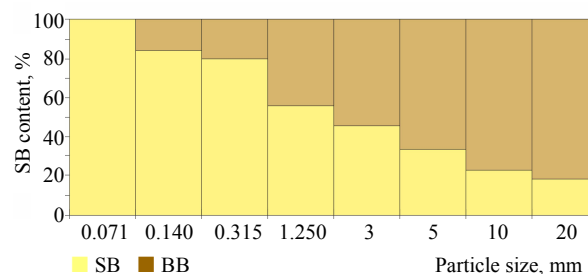


Fig. 12. Content of oriented layer of bitumen in total technological bitumen film on mineral grains in asphalt systems with increasing particle size:
BB – bulk bitumen; SB – structured bitumen

CONCLUSION

According to the results of the proposed exergy method of thermodynamic analysis, it is possible to determine the concentration component of the asphalt concrete mixture flow exergy $E_{k, ACM}$ and provide an objective assessment of the operation of the mixer in terms of its energy consumption ($E_{k, ACM}$ determines the energy minimum cost of an ideal mixer); obtain a quantitative assessment of the asphalt concrete mixture quality for technological purposes; calculate exergy flows of asphalt concrete mixture heat technology; determine absolute and relative exergy characteristics of asphalt concrete mixture production required for energy efficiency assessment.

This work has been carried out within the framework of the project on cooperation between Belarusian and Chinese scientists and specialists: “Outstanding Foreign Scientist Studio of Green Low-Carbon Technology for Pavement Construction and Maintenance” (Grant No GZS2022004) – 道路绿色低碳建养技术杰出外籍科学家工作室(项目号 GZS2022004).

REFERENCES

1. *List of Countries by Length of Road Network*. Available at: <https://clck.ru/9q6ij> (accessed 4 February 2022) (in Russian).
2. On the State Program “Roads of Belarus” for 2021–2025. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of April 9, 2021 No 212. *National Legal*

- Internet Portal of the Republic of Belarus. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100212&ysclid=la2jzkvw6k357408400> (accessed 14 March 2022) (in Russian).
3. Khalturin R. A. (2011) Status and Experience of Road Network Construction in Russia and Abroad. *Ekonomika i Upravlenie = Economics and Management*, (1), 223–226 (in Russian).
 4. Saenko S. S. (2016) Analysis of Energy Costs for Preparation of Bitumen at Asphalt Concrete Plant of Low Productivity. *Izvestiya Vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*, (3), 93–101 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2016-3-93-101>.
 5. Liu Tingguo, Zankavich V. N., Aliakseyeu Yu. G., Khroustalev B. M. (2019) Recycling of Materials for Pavement Dressing: Analytical Review. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 18 (2), 104–112. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-104-112>.
 6. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1033–2002. *Asphalt Concrete Mixes for Road, Airfield and Asphalt Concrete. Technical Specifications*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2002. 30 (in Russian).
 7. Romanyuk V. N. (2009) *Intensive Energy Saving in Industrial Heat Technologies*. Minsk, Belarusian National Technical University. 380 (in Russian).
 8. Wunder M., Hiete M., Stengel J., Schultmann F., Simmler N. (2012) Potential Supply Chain Cost Savings From Innovative Cold Bitumen Handling. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 15 (5), 337–350. <https://doi.org/10.1080/13675567.2012.742044>.
 9. Brazianus J., Sivilevicius H. (2014) Heat Transfer and Energy Loss in Bitumen Batching System of Asphalt Mixing Plant. *The 9th International Conference “Environmental Engineering”, 22–23 May 2014*. Vilnius. <https://doi.org/10.3846/enviro.2014.146>.
 10. Simons A., Otoo H. (2014) Minimization of Heat Transfer Losses at the Shell Bitumen Plant, Takoradi, Ghana. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*, 1 (5), 93–102.
 11. Stepanov V. S. (1985) *Chemical Energy and Exergy of Substances*. Novosibirsk, Nauka Publ. 100 (in Russian).
 12. Brodyansky V. M., Fratscher V., Mikhalek K. (1998) *The Exergy Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
 13. Khroustalev B. M., Romaniuk V. N. (2009) Determination of the Required Energy Action at Formation of Asphalt Concrete Mixture. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 42–48 (in Russian).
 14. Zavyalov M. A. (2008) *Formation and Assessment of the Road Surface Based on Thermodynamic Theory (From Design to Renovation)*. Omsk. 42 (in Russian).
 15. Kovalev Ya. N. (2002) On the Choice of a Strategy for the Repair of Road Asphalt Concrete Pavements: Theoretical Aspect. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (2), 22–23 (in Russian).
 16. Khroustalev B. M., Liu T., Akeliev V. D., Aliakseyeu Yu. H., Shi J., Zankovich V. V. (2018) Specific Features of Heat and Mass Transfer Processes in Road Dressings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 517–526. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-517-526>.
 17. Kovalev Ya. N. (2007) *Physical and Chemical Foundations of Building Materials Technology*. Minsk, Belarusian National Technical University. 265 (in Russian).
 18. Rebinder P. A., Shalyt S. Ya., Mikhailov N. V. (1957) Influence of Active Filler and Solvent on the Structural and Mechanical Properties of Bitumen. *Kolloidnyi Zhurnal = Colloid Journal*, XIX (2), 244–248.
 19. Korolev I. V. (1986) *Ways to Save Bitumen in Road Construction*. Moscow, Transport Publ. 149 (in Russian).
 20. Khroustalev B. M., Liu T., Aliakseyeu Yu. H., Li Z., Akeliev V. D., Minchenya V. T. (2022) Thermodynamic Aspects of Pavement Engineering. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (1), 28–35. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-28-35>.
 21. Lupanov A. P. (2012) *Processing of Asphalt Concrete at the Asphalt Plant*. Moscow, Ekon-Inform Publ. 210 (in Russian).
 22. Khroustalev B. M., Liu T., Akeliev V. D., Li Z., Aliakseyeu Yu. H., Zankovich V. V. (2019) Heat Resistance and Heat-and-Mass Transfer in Road Pavements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 536–546. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-536-546>.

Received: 30.08.2022

Accepted: 22.10.2022

Published online: 30.11.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503>

УДК 691.32:69.04:693.554-486:691.327

Оптимизация состава наноприбробетона по вязкости разрушения модификацией матрицы

Е. А. Садовская¹⁾, докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾

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

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

Реферат. Бетон – квазихрупкий строительный материал, который имеет низкую прочность при растяжении. Процесс его разрушения при нагружении носит неоднородный характер, обусловленный сущностью структуры бетонной массы, состоящей из компонентов с различными физико-механическими свойствами. Постепенное деформирование и разрушение можно охарактеризовать как процесс образования и развития микротрещин. Наличие в бетоне разных по размеру компонентов позволяет рассматривать его строение как многоуровневую систему. В этой системе каждый уровень представляет собой матрицу со своими структурными включениями, которые играют как структурообразующую роль, так и роль концентраторов напряжений при действии механических нагрузок. Критический коэффициент интенсивности напряжений является хорошим показателем трещиностойкости (вязкости разрушения) материала. Нанобетон, с точки зрения многоуровневой системы, представляет собой бетонный композит с ингибиторами распространения трещин на уровне цементирующего вещества (в качестве ингибиторов рассматриваются углеродные нанотрубки). Присутствие фибровых волокон на последующих масштабных уровнях позволяет рассматривать бетон как композит с многоуровневым дисперсным армированием (наноприбробетон). В статье рассмотрено изменение показателя вязкости разрушения (трещиностойкости) бетона при дисперсном армировании матрицы на разных структурных уровнях. Приведены результаты испытаний на нормальный отрыв образцов-кубов с надрезами при внецентренном сжатии с определением коэффициента интенсивности напряжений для бетона, модифицированного углеродными нанотрубками, выступающими в качестве ингибиторов распространения трещин на уровне цементирующего вещества (нанобетон), а также для наноприбробетонов с дисперсным армированием на уровне мелкозернистого бетона. На основании экспериментальных исследований неравновесными методами механики разрушения предложены композиции наноприбробетона максимальной трещиностойкости (вязкости разрушения) с различной концентрацией фибры и несколькими типами матриц, модифицированных наноприбробетонными добавками.

Ключевые слова: наноприбробетон, трещиностойкость, вязкость разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, фибра, наноприбробетон, прямой отрыв, нанотрубки, дисперсное армирование

Для цитирования: Садовская, Е. А. Оптимизация состава наноприбробетона по вязкости разрушения модификацией матрицы / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 499–503. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503>

Optimization of Composition of Nanofiber Concrete in Terms of Fracture Toughness by Matrix Modification

Е. А. Sadovskaya¹⁾, S. N. Leonovich¹⁾

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

Abstract. Concrete is a quasi-brittle building material that has low tensile strength. The process of its destruction under loading is inhomogeneous, due to the nature of the concrete structure mass, consisting of components with different physical and mechanical properties. Gradual deformation and destruction can be characterized as a process of formation and development of microcracks. The presence of different-sized components in concrete makes it possible to consider its structure as a multi-level system. In this system, each level is a matrix with its own structural inclusions, which play both a structure-forming role and the role of stress concentrators under the action of mechanical loads. The critical stress intensity factor is a good indicator of the crack resistance (fracture toughness) of a material. Nanoconcrete, from the point of view of a multilevel system, is a concrete composite with crack propagation inhibitors at the level of the cementing substance (carbon nanotubes are considered as inhibitors). The presence of fiber fibers at subsequent scale levels allows us to consider concrete as a composite with multi-level dispersed reinforcement (nanofiber concrete). The paper discusses the change of concrete fracture toughness indicator (crack resistance) with dispersed reinforcement of the matrix at different structural levels. The results of tests are

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

presented for normal separation of notched cubes under eccentric compression with the determination of the stress intensity factor for concrete modified with carbon nanotubes acting as crack propagation inhibitors at the level of cementing substance (nanconcrete), as well as for nanofiber concrete with dispersed reinforcement at the level of fine-grained concrete. Based on experimental studies by non-equilibrium methods of fracture mechanics, compositions of nanofiber-reinforced concrete of maximum crack resistance (fracture toughness) with different fiber concentrations and several types of matrices modified with nanocarbon additives are proposed in the paper.

Keywords: nanofibre concrete, crack resistance, fracture toughness, stress intensity factor, fiber, nanocarbon, direct separation, nanotubes, dispersed reinforcement

For citation: Sadovskaya E. A., Leonovich S. N. (2022) Optimization of Composition of Nanofiber Concrete in Terms of Fracture Toughness by Matrix Modification. *Science and Technique*. 21 (6), 499–503. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503> (in Russian)

Введение

Бетон представляет собой сбалансированную смесь наполнителя (крупного и мелкого) и вяжущего вещества, затворенного водой. Наличие в бетоне разных по размеру компонентов позволяет рассматривать его строение как многоуровневую систему [1, 2]. Структурную модель бетона можно отобразить в виде нескольких масштабных уровней: отдельного кристалла, кристаллического сростка, цементующего вещества, цементного микробетона, мелкозернистого бетона, крупнозернистого бетона. Каждый уровень представляет собой матрицу со своими структурными элементами (включениями). Включения играют как структурообразующую роль, так и роль концентраторов напряжений при действии механических нагрузок [3, 4].

Нанобетон, с точки зрения многоуровневой системы, представляет собой бетонный композит с ингибиторами распространения трещин на уровне цементирующего вещества. В качестве ингибиторов рассматриваются углеродные нанотрубки [5–7]. Углеродные нанотрубки – протяженные структуры, представляющие собой свернутые в одно- или многослойную трубку графитовые слои (рис. 1). Присутствие тончайших волокон в твердеющем цементном камне создает условия для эффекта «наноармирования» структуры новообразований в виде спонтанно формирующейся системы гидроксидов клинкерных минералов [8, 9].

В качестве ингибиторов распространения трещин на уровне мелкозернистого бетона могут рассматриваться различные фибровые волокна макроразмера (рис. 2).



Рис. 1. Углеродные нанотрубки [8]

Fig. 1. Carbon nanotubes [8]

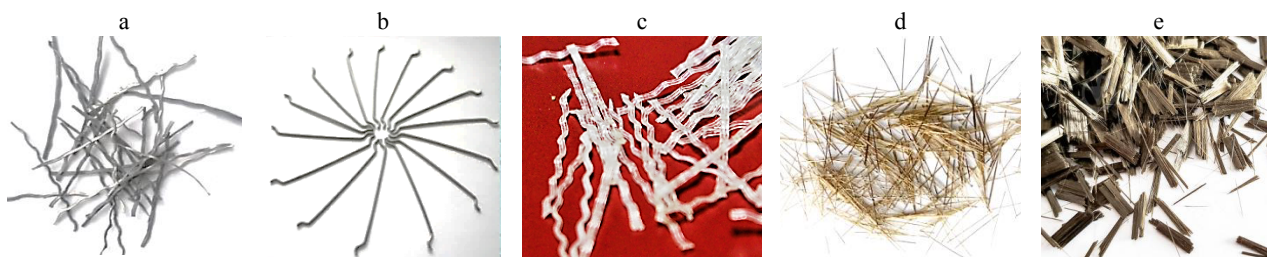
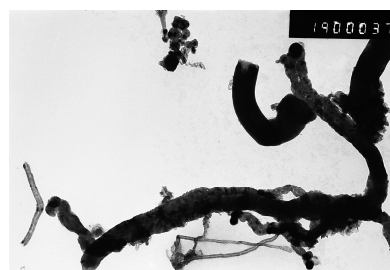


Рис. 2. Фибра: а – из листовой стали волнового профиля (ФЛВ-0,9-50); б – из стальной проволоки с анкерами (ФПА-1,0); в – полимерная волнистая (ФПВ-0,6-40); д – микрофибра прямая из проволоки (ФСВ-М-0,20/12); е – базальтовая (12 мм)

Fig. 2. Fiber: a – from sheet steel of a wave profile (ФЛВ-0.9-50); б – made of steel wire with anchors (ФПА-1.0); в – polymeric wavy (ФПВ-0.6-40); д – straight microfiber from wire (ФСВ-М-0.20/12); е – basalt (12 mm)

Целью исследования являлся подбор нанофибробетонных составов с повышенными показателями трещиностойкости методом сравнительной оценки показателя вязкости разрушения K_{IC} нанофибробетона с разными матрицами и типом дисперсного армирования [10, 11].

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования использовали: портландцемент 500Д20 ОАО «Красносельскстройматериалы», строительный песок I класса, гранитный щебень III группы, сульфаталюминатную добавку РСАМ, конденсированный уплотненный микрокремнезем (МКУ-85), химическую добавку «Реламикс ПК», наномодифицированную химическую добавку «АРТ-Конкрет Р» (водная суспензия наноструктурированного углерода (0,01–20,00 мкм) и пласти-

фикатора), наномодифицированную химическую добавку «РуФикс-500Б».

Образцы изготавливали из составов бетонных смесей, представленных в табл. 1, с добавлением различного типа и количества дисперсных волокон: Ф1 (фибра стальная волновая из листа, 80 кг); Ф2 (фибра стальная проволоочная анкерная, 80 кг); Ф3 (фибра полимерная волнистая, 4 кг); Ф4 (фибра базальтовая, 2 кг), микрофибры стальной прямой (20 кг), фибры стальной анкерной (20 кг); Ф20 (Ф40, Ф60) (фибра стальная волновая из листа, 20, 40, 60 кг).

Для испытаний использовали образцы-кубы размерами 100×100×100 мм с симметричными надрезами глубиной $h/4$ (h – высота куба), выполненными режущими инструментами с алмазным напылением. Испытания проводили при внецентренном сжатии (рис. 3).

Таблица 1

Рецептуры исследуемых составов
Formulations of the studied compositions

Состав	Цемент, кг	РСАМ/МКУ-85, кг	Щебень, кг, фракции		Песок, кг	Химическая добавка, кг (% от массы вяжущего)		
			5–20 мм	5–10 мм		«АРТ-Конкрет Р»	«РуФикс-500Б»	«Реламикс ПК»
А-Ф0	400	–	1020	–	820	3,20 (0,80)	–	–
Б-Ф0	445	–	1035	–	820	2,22 (0,50)	–	–
В-Ф0	460	–	–	880	950	3,22 (0,70)	–	–
Г-Ф0	485	40/45	–	825	800	4,65 (0,70)	–	–
Д-Ф0	400	–	1020	–	800	–	1,70 (0,40)	–
Ж-Ф0	445	–	1035	–	820	–	4,00 (0,90)	–
И-Ф0	485	55/0	830	–	835	–	4,32 (0,80)	–
К-Ф0	485	40/45	–	825	800	–	5,82 (1,00)	–
С-Ф0	425	–	1070	–	750	–	–	2,4 (0,5)

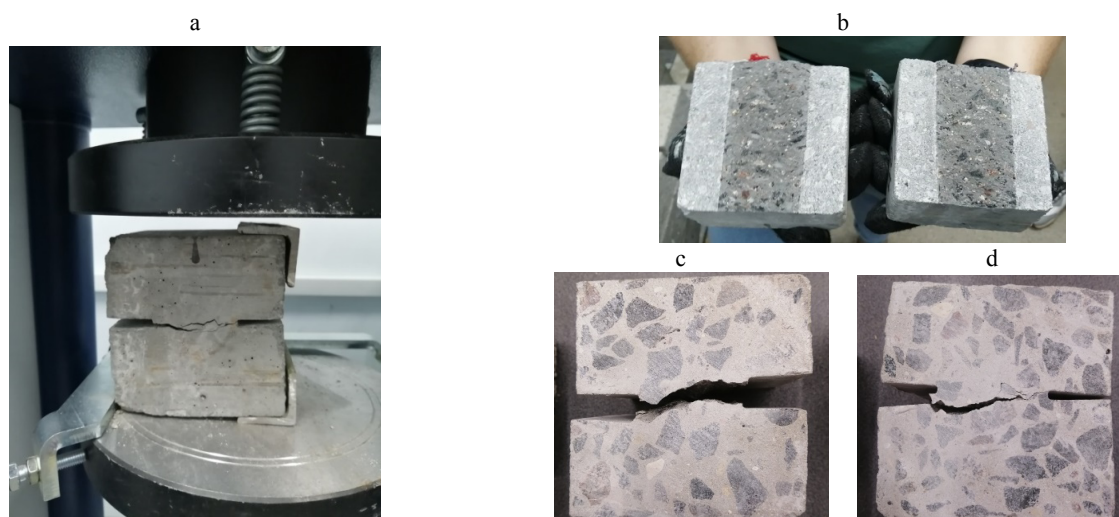


Рис. 3. Испытание на нормальный отрыв по кубам с надрезом: а – внешний вид испытания; б – половинки образца после испытаний; в – испытанный бетонный образец; д – испытанный нанофибробетонный образец
Fig. 3. Normal pull test on notched cubes: a – appearance of the test; б – sample halves after testing; в – tested concrete sample; д – tested nanofiber concrete sample

Нагружение осуществляли до момента разделения образца на две части или образования трещины, регистрировали значение разрушения F_{IC} . Рассчитаем критический коэффициент интенсивности напряжения на нормальный отрыв

$$K_{IC} = \frac{F_{IC}}{bh^{1/2}} \left[18,3 \left(\frac{a}{h} \right)^{1/2} - 430 \left(\frac{a}{h} \right)^{3/2} + 3445 \left(\frac{a}{h} \right)^{5/2} - 11076 \left(\frac{a}{h} \right)^{7/2} + 12967 \left(\frac{a}{h} \right)^{9/2} \right], \quad (1)$$

где F_{IC} – нагрузка, при которой происходит разрушение, МН; b – ширина образца, м; h – высота образца, м; a – глубина надреза, м, $a = h/4$.

Результаты испытаний

На рис. 4, 5 приведены результаты испытаний коэффициентов интенсивности напряжений нанобетона и бетона. Видно, что их изменение находится в пределах от 0,68 до 1,66 МПа $\sqrt{м}$.

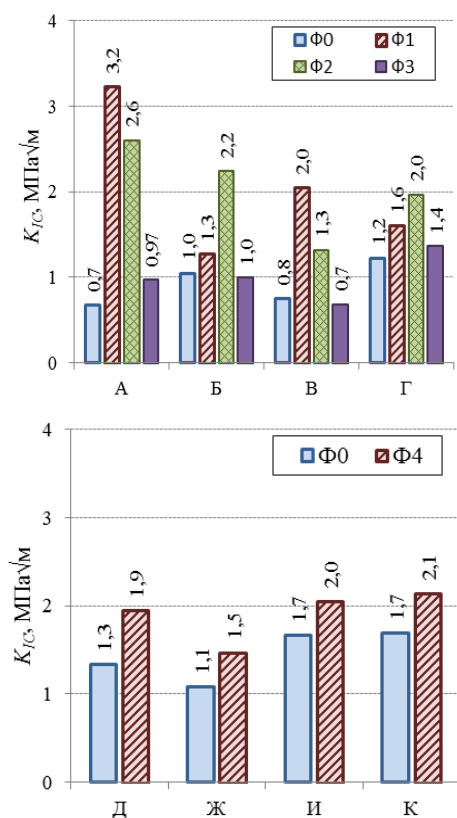


Рис. 4. Коэффициент интенсивности напряжений нанобетона с разным типом дисперсного армирования

Fig. 4. Stress intensity factor of nanoconcrete with different types of dispersed reinforcement

В нанобетонных матрицах с добавкой «Ру-Фикс-500Б» (Д, Ж, И, К) показатель вязкости разрушения в среднем на 35 % больше, чем в матрицах с добавкой «АртКонкрет Р» (А, Б, В, Г). В составе А наибольшее значение K_{IC} удалось получить при использовании стальных дисперсных волокон Ф1 (3,37 МПа $\sqrt{м}$ – на 390 %) и волокон из стальной проволоки Ф2 (2,60 МПа $\sqrt{м}$ – на 280 %). В составе Б наилучший показатель вязкости разрушения получен в случае применения стальной проволоочной фибры Ф2 (2,24 МПа $\sqrt{м}$ – на 110 %). В составе В максимальное значение K_{IC} получено при фибровом армировании типа Ф1 (2,05 МПа $\sqrt{м}$ – на 110 %). Фибровое армирование в составе Г оказало немного меньший прирост K_{IC} , чем в предыдущих составах. Наибольший прирост показателя трещиностойкости получен с фибрами Ф2 (1,97 МПа $\sqrt{м}$ – на 74 %) и Ф1 (1,61 МПа $\sqrt{м}$ – на 38 %). Комплексное фибровое армирование Ф4 способствовало приросту показателя вязкости разрушения в составах Д, Ж, И, К на 23, 36, 23, 27 % соответственно.

Величина коэффициента интенсивности напряжений бетона на 32–137 % меньше, чем нанобетона. Повышение количества фибровых волокон в составе С способствует увеличению на 32 % значения K_{IC} – до 0,7 МПа $\sqrt{м}$ при Ф40 и Ф60.

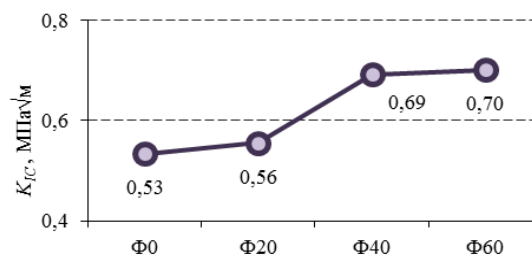


Рис. 5. Коэффициент интенсивности напряжений бетона (состав С) с разной концентрацией фибры

Fig. 5. Stress intensity factor of concrete (composition C) with different fiber concentrations

ВЫВОД

На основании экспериментальных исследований неравновесными методами механики разрушения предложены композиции нанобетона максимальной трещиностойкости (вязкости разрушения) с различной концентрацией фибры и несколькими типами матриц, модифицированных нанополлмерными добавками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовская, Е. А. Многоуровневая структура бетона: анализ и классификация уровней организации структуры конгломератных строительных композитов / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Проблемы современного строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 28 мая 2019 г. Минск: БНТУ, 2019. С. 285–297.
2. Баженов, Ю. М. Наноматериалы и нанотехнологии в современной технологии бетонов / Ю. М. Баженов, В. Р. Фаликман, Б. И. Булгаков // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 125–133.
3. Чернышов, Е. М. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 2. К проблеме концептуальных моделей наномодифицирования структуры / Е. М. Чернышов, О. В. Артамонова, Г. С. Славчева // Строительные материалы. 2014. № 4. С. 73–83.
4. Optimum Compositions of Crack-Stability and Waterproof Concrete for the Reliability and Durable Constructions of Bridges [Electronic Resource] / A. Plugin [et al.] // 7th International Conference on Bridges Across the Danube 2010. Sofia. Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/331473908>.
5. Фаликман, В. Р. «Простор за пределом», или Как нанотехнологии могут изменить мир бетона. Ч. 2 [Электронный ресурс] / В. Р. Фаликман, К. Г. Соболев // Нанотехнологии в строительстве. 2011. № 2. Режим доступа: https://www.nanonewsnet.ru/files/nanobuild_1_2011.pdf.
6. Садовская, Е. А. Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Бетон и железобетон. 2021. № 4. С. 20–28.
7. Fracture Toughness of Carbon Nanotubes Cement Based Materials Modified / S. A. Zhdanok [et al.] // Вестник БрГТУ. 2021. № 3. С. 48–53. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53>.
8. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / С. А. Жданок [и др.] // Вестник Белорусского национального технического университета. 2009. № 3. С. 5–22.
9. Влияние пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода в самоуплотняющейся бетонной смеси на ее технологические свойства / С. А. Жданок [и др.] // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92, № 2. С. 391–396.
10. Критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве для нанофибробетона / Е. А. Садовская [и др.] // Строительные материалы. 2021. № 9. С. 41–46. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46>.
11. Прочность нанофибробетона на растяжение / Е. А. Садовская [и др.] // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93, № 4. С. 1051–1055.
12. Поступила 14.04.2022
Подписана в печать 29.06.2022
Опубликована онлайн 30.11.2022
- tion of Levels on Organization of Conglomerate Building Composite Structure. *Problemy Sovremennogo Stroitel'stva: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.*, 28 Maya 2019 g. [Problems of Modern Construction: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, May 28, 2019]. Minsk, Belarusian National Technical University, 285–297 (in Russian).
2. Bazhenov Yu. M., Falikman V. R., Bulgakov B. I. (2012) Nanomaterials and Nanotechnologies in Modern Concrete Technology. *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering], (12), 125–133 (in Russian).
3. Chernyshov E. M., Artamonova O. V., Slavcheva G. S. (2014) Concepts and Foundations of Technologies for Nanomodification of Building Composite Structures. Part 2. On the Problem of Conceptual Models of Structure Nanomodification. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, (4), 73–83 (in Russian).
4. Plugin A., Plugin A., Romanenko O., Kalinin O. (2010) Optimum Compositions of Crack-Stability and Waterproof Concrete for the Reliability and Durable Constructions of Bridges. *7th International Conference on Bridges Across the Danube 2010*. Sofia. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/331473908>.
5. Falikman V. R., Sobolev K. G. (2011) “Space Beyond”, or How Nanotechnology Can Change the World of Concrete. Part 2. *Nanotekhnologii v Stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*, (2). Available at: https://www.nanonewsnet.ru/files/nanobuild_1_2011.pdf (in Russian).
6. Sadovskaya E. A., Leonovich S. N., Budrevich N. A. (2021) A Multiparametric Method for Evaluating the Quality Indicators of Nano-Fiber-Concrete for a Construction Site. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (4), 20–28 (in Russian).
7. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Sadovskaya E. A., Leonovich S. N. (2021) Fracture Toughness of Carbon Nanotubes Cement Based Materials Modified. *Vestnik BrGTU = Vestnik of Brest State Technical University. Civil Engineering and Architecture*, (3), 48–53. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53>.
8. Zhdanok S. A., Khrustalev B. M., Batyanovskii E. I., Leonovich S. N. (2009) Nanotechnologies in Building Materials Science: Reality and Prospects. *Vestnik Belorusskogo Natsionalnogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian National Technical University], (3), 5–22 (in Russian).
9. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khrustalev B. M., Koleda E. A. (2019) Influence of the Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture in a Self-Compacting Concrete Mixture on its Technological Properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92 (2), 376–382. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01941>.
10. Sadovskaya E. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Potapov V. V. (2021) Critical Stress Intensity factor at Normal Separation for Nanofiber-Concrete. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, (9), 41–46. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46> (in Russian).
11. Sadovskaya E. A., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Polonina E. N. (2020) Tensile Strength of Nanofibrous Concrete. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (4), 1015–1119. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02202-8>.

REFERENCES

1. Sadovskaya E. A., Polonina E. N., Leonovich S. N. (2019) Multilevel Structure of Concrete: Analysis and Classifica-

Received: 14.04.2022

Accepted: 29.06.2022

Published online: 30.11.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-504-510>

УДК 625.74:656.13.08

Основания дорожных одежд из вторичных материалов

Асп. А. К. Каюмов¹⁾, канд. техн. наук, доц. С. И. Зиневич¹⁾,
докт. тех. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾

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

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

Реферат. Дорожные основания – главные несущие слои дорожной одежды, назначение которых – восприятие нагрузок от автомобилей и распределение ее на грунт земляного полотна. Конструкция основания определяется по расчету в зависимости от планируемой транспортной нагрузки и интенсивности движения и состоит, как правило, из нескольких слоев. Причем у капитальных покрытий верхний слой основания устраивается из материалов, укрепленных вяжущими. Основание дорожного покрытия – достаточно дорогостоящая конструкция, и важно при его устройстве, где возможно, использовать местные, а также вторичные материалы (отходы промышленной и строительной индустрии). В процессе строительно-ремонтных дорожных работ применение вторичного сырья позволяет значительно снизить затраты на их выполнение. При этом уменьшаются не только затраты, но и негативное воздействие на окружающую среду. В статье рассмотрена возможность устройства основания дорожных покрытий из таких вторичных материалов, как отработанные формовочные смеси (отходы литейного производства), цементогранулят (продукт дробления старых цементобетонных конструкций, строительного мусора) и асфальтогранулят (продукт фрезерования изношенных асфальтобетонных покрытий). В этом случае значительно уменьшается стоимость основания при обеспечении необходимой его прочности. Отработанные формовочные смеси использовали в качестве выравнивающего слоя, цементогранулят рассматривали как материал для нижнего слоя основания, а асфальтогранулят – для укрепления щебня непрочных пород (гравийного щебня) верхнего слоя основания. Нижний слой основания, устроенный из цементогранулята, должен обладать достаточной прочностью, поскольку остатки старого цементного раствора, находящиеся на каменной составляющей последнего, при уплотнении слоя способствуют лучшей его заклинке. Зерна асфальтогранулята тоже покрыты раствором, но уже асфальтовым, и при уплотнении это должно создать эффект заклинивания (скрепления) слоя. Поэтому в проводимых экспериментах вместо вяжущего при изготовлении образцов использовали асфальтогранулят. Исследованиями подтверждено, что устройство основания дорожных одежд из цемента- и асфальтогранулята обеспечивает достаточную прочность слоев основания, а отработанные формовочные смеси могут быть использованы для устройства выравнивающих слоев.

Ключевые слова: основание, асфальтогранулят, цементогранулят, прочность, температура, разрушающая нагрузка, предел прочности, сжатие, отработанная формовочная смесь, выравнивающий слой, цемент, растяжение при изгибе

Для цитирования: Каюмов, А. К. Основания дорожных одежд из вторичных материалов / А. К. Каюмов, С. И. Зиневич, Я. Н. Ковалев // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 504–510. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-504-510>

Pavement Bases from Recycled Materials

A. K. Kayumov¹⁾, S. I. Zinevich¹⁾, Y. N. Kovalev¹⁾

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

Abstract. Road bases are the main bearing layers of the road pavement, the purpose of which is the perception of the load from cars and its distribution on the subgrade soil. The base structure is determined by calculation depending on the planned traffic load and traffic intensity and usually consists of two layers, and for capital coatings, the upper layer of the two-layer base is made of materials reinforced with binders. The base of the pavement is a rather expensive construction and it is important for its construction, where possible, to use local materials, as well as secondary materials, i. e. industrial and construction industry waste. In the process of construction and repair works, the use of secondary raw materials can significantly reduce the cost of their implementation. Moreover, this practice not only reduces the cost of work, but also reduces the negative impact on the environment. The paper considers the possibility of constructing a pavement base from such secondary materials as spent molding sands (foundry waste), cement granulate (a product of crushing old cement concrete structures, construction waste) and asphalt granulate (a product of milling worn asphalt concrete pavements). In this case, the cost of the base is significantly reduced while ensuring its necessary strength. Spent sands were used as a leveling layer, cement granulate

Адрес для переписки

Зиневич Сергей Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-38-81
Zinev2018@gmail.com

Address for correspondence

Zinevich Sergey I.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-38-81
Zinev2018@gmail.com

was considered as a material for the bottom layer of the base and asphalt granulate as a material for strengthening crushed stone of weak rocks (gravel crushed stone) of the upper layer of the base. The bottom layer of the base, made of cement granulate, must have sufficient strength, since the remnants of the old cement mortar, located on the stone component of the latter, when compacting the layer, contribute to its better wedging. Asphalt granulate grains are also covered with a solution, but already with asphalt mortar, and during compaction this should create the effect of jamming (fastening) of the layer. Therefore, in the experiments, asphalt granulate was used instead of a binder in the manufacture of samples. Studies have confirmed that the construction of the pavement base from cement and asphalt granulate provides sufficient strength of the base layers and spent sands can be used for leveling layers.

Keywords: base, asphalt granulate, cement granulate, strength, temperature, breaking load, tensile strength, compression, waste molding sand, leveling layer, cement, tensile bending

For citation: Kayumov A. K., Zinevich S. I., Kovalev Y. N. (2022) Pavement Bases from Recycled Materials. *Science and Technique*. 21 (6), 504–510. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-504-510> (in Russian)

Введение

Дорожные основания – главные несущие слои дорожной одежды, назначение которых – восприятие нагрузки от автомобилей и распределение ее на грунт земляного полотна. Конструкция основания определяется по расчету в зависимости от планируемой транспортной нагрузки и интенсивности движения и состоит, как правило, из нескольких слоев. Причем у капитальных покрытий верхний слой основания устраивается из материалов, укрепленных вяжущими. Для сборных бетонных покрытий требуется еще и выравнивающий слой [1, 2].

Основание дорожного покрытия – достаточно дорогостоящая конструкция, и важно при его устройстве, где возможно, использовать местные, а также вторичные материалы (отходы промышленной и строительной индустрии) [3, 4]. В процессе строительно-ремонтных дорожных работ применение вторичного сырья позволяет значительно снизить затраты на их выполнение. При этом уменьшаются не только затраты, но и негативное воздействие на окружающую среду [5–7].

В статье рассмотрена возможность устройства основания из вторичных материалов: нижний слой – из цементогранулята (продукт дробления старых цементобетонных конструкций, строительного мусора), верхний – из щебня, расклиненного асфальтогранулятом (продукт фрезерования изношенных асфальтобетонных покрытий), а выравнивающий слой – из отработанных формовочных смесей (отхода промышленной индустрии, где имеется литейное производство) [3, 8, 9]. Такое решение значительно уменьшит стоимость основания при обеспечении необходимой его прочности, а также снизит негативное воздействие этих отходов на окружающую среду.

Цементогранулят для нижнего слоя основания

Использование цементогранулята (продукта переработки различных дефектных или отработавших свой срок цементобетонных изделий, а также строительного мусора, образовавшегося при разборке зданий, бетонных покрытий автомобильных дорог и взлетно-посадочных полос аэродромов) для устройства слоя основания должно обеспечить достаточную его прочность, так как остатки бетонного раствора, находящиеся на каменной составляющей, при уплотнении будут способствовать лучшей заклинке. Для подтверждения этого методом формования (сжатия) изготовили образцы из цементогранулята и, для сравнения, из рядового щебня [10, 11]. Сжимали образцы в стальных цилиндрах диаметром 100 мм с одинаковым усилием для обоих материалов. В случае рядового щебня образец не сформовался (он просто рассыпался), а образец из цементогранулята, выдавленный из металлического цилиндра, при объеме $V = 376,8 \text{ см}^3$ имел плотность $\rho = 2,12 \text{ г/см}^3$. В процессе испытания этого образца разрушающее усилие $p = 39,52 \text{ кН}$, что соответствует пределу прочности $R = 50,07 \text{ МПа}$ (рис. 1).



Рис. 1. Образцы формования: а – цементогранулят; б – рядовой щебень

Fig. 1. Molding samples: a – cement granulate; b – ordinary crushed stone

Таким образом, используя цементогранулят, можно получать прочные основания под

дорожные одежды или нижние слои оснований для капитальных дорожных одежд.

Асфальтогранулят для верхнего слоя основания

Как отмечалось выше, верхний слой основания в соответствии с [1] должен устраиваться с использованием вяжущих материалов. Авторы статьи изучали вопрос создания верхнего слоя основания из щебня, расклиненного асфальтогранулятом. Зерна асфальтогранулята покрыты асфальтовым раствором, значит, при уплотнении это создаст эффект заклинивания (скрепления) слоя. Поэтому в процессе испытаний вместо вяжущего было принято решение использовать асфальтогранулят для укрепления слоя щебня.

Чтобы узнать, укрепляет ли асфальтогранулят щебень, а также для получения зависимости прочности образцов от количества асфальтогранулята в них методом формования (сжатия) изготавливали образцы из щебня фракции 10–20 мм, в который в разном количестве добавляли асфальтогранулят. После перемешивания компонентов смесь сжимали в стальных цилиндрах диаметром 100 мм с одинаковым усилием для образцов с различным количеством асфальтогранулята (рис. 2).



Рис. 2. Образец формования щебня, укрепленный асфальтогранулятом

Fig. 2. Crushed stone molding sample reinforced with asphalt granulate

При формовании образцов количество асфальтогранулята изменяли в следующем порядке: сначала щебень без асфальтогранулята, а затем с добавлением его в количестве 5, 10, 15, 30, 50 %. В конечном итоге, был сформован образец, состоящий из 100 % асфальтогранулята.

Зависимость разрушающей нагрузки от количества асфальтогранулята в щебне для ис-

пытанных образцов представлена в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов из асфальтогранулята на разрушающую нагрузку

Sample test results from asphalt granulate for breaking load

Количество асфальтогранулята в щебне, %	0	5	10	15	30	50	100
Разрушающая нагрузка F , кН	0	0	13,52	18,52	43,80	46,70	50,78



Рис. 3. Зависимость разрушающей нагрузки от количества асфальтогранулята в щебне

Fig. 3. Breaking load dependence on the amount of asphalt granulate in crushed stone

Анализируя данные табл. 1 и рис. 3, можно заключить следующее:

- с увеличением количества асфальтогранулята в щебне прочность образцов повышается;
- возрастание прочности образцов с увеличением количества асфальтогранулята в рядовом щебне в интервале 0–30 % происходит более интенсивно, чем в интервале 30–100 %;
- при устройстве слоя из чистого асфальтогранулята разрушающая нагрузка образца составила 50,78 кН, что соответствует пределу прочности $R = 64,36$ МПа.

В процессе выполнения эксперимента было замечено, что образцы получаются прочнее, если предварительно асфальтогранулят нагреть до 30–35 °С. Образцы с различной температурой асфальтогранулята (15 и 30 °С) испытывали при температуре воздуха 20–25 °С. Данные для двух вариантов испытаний приведены ниже.

Испытание 1. Температура асфальтогранулята 15 °С:

- состав 1: асфальтогранулят 10 % (80 г) + щебень 90 % (720 г). Образец сформовался, но разрушился до испытаний;
- состав 2: асфальтогранулят 15 % (120 г) + щебень 85 % (680 г). Образец сформовался. Разрушающая нагрузка 12,04 кН;

– состав 3: асфальтогранулят 30 % (240 г) + щебень 70 % (560 г). Образец сформовался. Разрушающая нагрузка 25,87 кН;

– состав 4: асфальтогранулят 50 % (400 г) + щебень 50 % (400 г). Образец сформовался. Разрушающая нагрузка 45,80 кН.

Испытание 2. Температура асфальтогранулята 30 °С:

– состав 1: асфальтогранулят 10 % (80 г) + щебень 90 % (720 г). Образец сформовался. Разрушающая нагрузка 9,77 кН;

– состав 2: асфальтогранулят 15 % (120 г) + щебень 85 % (680 г). Образец сформовался. Разрушающая нагрузка 16,20 кН;

– состав 3: асфальтогранулят 30 % (240 г) + щебень 70 % (560 г). Образец сформовался. Разрушающая нагрузка 30,93 кН;

– состав 4: асфальтогранулят 50 % (400 г) + щебень 50 % (400 г). Образец сформовался. Разрушающая нагрузка 47,28 кН.

Результаты испытаний представлены в виде графиков на рис. 4.

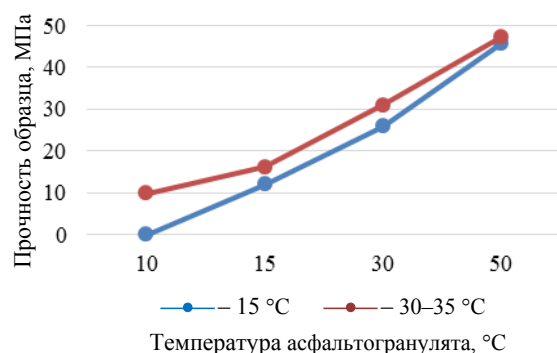


Рис. 4. Зависимость прочности образцов от температуры асфальтогранулята при их изготовлении

Fig. 4. Dependence of sample strength on the temperature of asphalt granulate during their manufacture

Отработанная формовочная смесь для устройства выравнивающего слоя под бетонные плиты

Отработанная формовочная смесь (ОФС) – это отходы литейного производства. Этот вторичный материал имеется в больших количествах на предприятиях с литейным производством, где возникают проблемы с его утилизацией.

Более 80 % всего объема литья изготавливается в формах. Исходные формовочные материалы включают: огнеупорную основу (кварцевый песок формовочный), связующие материалы и вспомогательные добавки.

В процессе литейного производства формовочные смеси подвергаются интенсивной температурной обработке. Стенки формы при заливке металла нагреваются до температуры, равной температуре металла. При заливке стали эта температура составляет 1823–1853 К. Под действием высоких температур, а также в результате взаимодействия между отливкой и формой в смесях происходят следующие процессы. Благодаря высокой температуре и химическим реакциям на границе «металл – форма» образуются легкоплавкие силикаты металла, проникающие в поры песчаной формы. На поверхности формы появляется пригар. Зерна формовочного песка под действием температуры последовательно меняют свою кристаллическую структуру и увеличиваются в объеме. Быстрое расширение зерен песка, т. е. зерен кварца, вызывает появление внутренних напряжений в песчинках, что приводит к их растрескиванию и превращению их части в пыль.

Таким образом, ОФС – это кварцевый песок, зерна которого покрыты оболочкой из связующих композиций, оставшихся после температурного воздействия в процессе литья (рис. 5).



Рис. 5. Отработанная формовочная смесь

Fig. 5. Waste molding sand

Анализ показывает, что ОФС по своему зерновому составу относится к однородным мелким и очень мелким пескам с модулем крупности, равным 0,50–1,78 [3, 12].

В момент выбора вяжущего материала для укрепления слоя из ОФС исходили из того, что отработанная формовочная смесь – это песок, хотя и с примесями. К примеру, для стабилизации супесей при строительстве оснований используют минеральные (цемент, известь) либо органические (битум, битумные эмульсии) вяжущие. В последнее время разрабатываются особые стабилизаторы – битумо-полимерные композиции. Изучим возможность укрепления отработанной формовочной смеси минеральным (цемент) и органическим (битум) вяжущим и зависимость прочности полу-

чаемого материала от количества в нем этих вяжущих.

Укрепление отработанной формовочной смеси цементом

Были изготовлены три партии образцов-балочек размером 40×40×160 мм по три образца в каждой партии (всего 9 образцов) со следующим составом:

1) цемент 25 % (300 г) + ОФС 75 % (900 г) + вода (150 мл);

2) цемент 20,83 % (250 г) + ОФС 79,17 % (950 г) + вода (125 мл);

3) цемент 16,67 % (200 г) + ОФС 83,33 % (1000 г) + вода (100 мл).

После изготовления и набора прочности образцы были испытаны на растяжение при изгибе, а затем на сжатие.

Определение предела прочности на растяжение при изгибе. Проводились стандартные испытания данных образцов на растяжение при изгибе по ГОСТ 10180–2012 [13]. Предел прочности при изгибе определяется после испытания трех образцов, при этом вычисляется среднее арифметическое значение из двух наибольших результатов.

Результаты испытаний образцов при изгибе приведены в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов из отработанной формовочной смеси с цементом на растяжение при изгибе

Test results of samples from the spent molding sand with cement for tensile bending

№ партии образцов	Предел прочности на изгиб $R_{изг}$, МПа	
	Через 7 сут.	Через 28 сут.
1	2,73	4,68
2	1,04	1,79
3	0,52	0,89

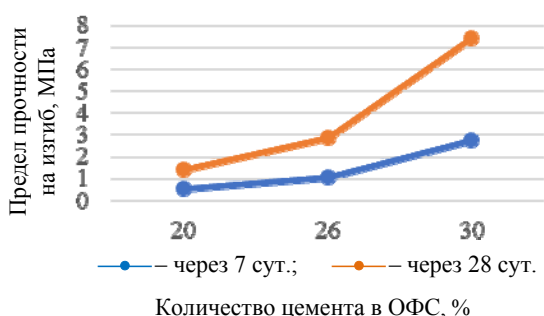


Рис. 6. Зависимость предела прочности образцов на изгиб, МПа, от количества в отработанной формовочной смеси цемента, %

Fig. 6. Dependence of flexural strength of samples for bending, MPa, on the amount of spent molding sand cement, %

Испытание образцов на сжатие. Испытания на сжатие также проводились по ГОСТ 10180–2012 [13]. Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ отдельного образца, МПа, определяют по формуле

$$R_{сж} = F/A,$$

где F – разрушающая сила, кН; A – площадь рабочей поверхности нажимной пластинки, равная 2500 мм².

Среднее арифметическое четырех наибольших результатов испытаний из шести является значением предела прочности при сжатии. Результаты испытаний образцов на сжатие приведены в табл. 3 и на рис. 7.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов из отработанной формовочной смеси с цементом на сжатие

Test results of samples from the spent molding sand with cement for compression

№ партии образцов	Предел прочности на сжатие $R_{сж}$, МПа	
	Через 7 сут.	Через 28 сут.
1	7,73	13,23
2	3,52	6,03
3	1,42	2,44

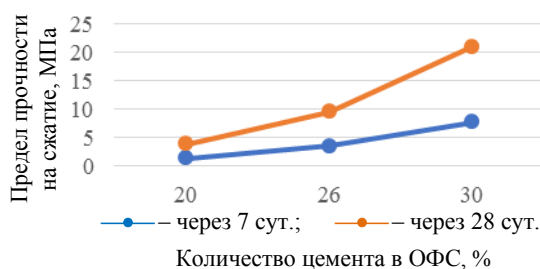


Рис. 7. Зависимость предела прочности образцов на сжатие, МПа, от количества в отработанной формовочной смеси цемента, %

Fig. 7. Dependence of tensile strength of samples for compression, MPa, on the amount of spent molding sand cement, %

Из рис. 6 и 7 видно, что повышение прочности образцов на изгиб и на сжатие с увеличением количества цемента в пределах 26–30 % происходит быстрее, чем в пределах 20–30 %. Особенно это заметно у образцов в 28-суточном возрасте.

Укрепление отработанной формовочной смеси битумом

Для испытаний укрепления ОФС битумом были изготовлены методом формования образцы, имеющие состав:

1) 450 г ОФС + 22,5 г битума;

2) 450 г ОФС + 36 г битума;

- 3) 450 г ОФС + 45 г битума;
- 4) 450 г ОФС + 67,5 г битума;
- 5) 450 г ОФС + 90 г битума.

После перемешивания компонентов смесь сжимали в стальных цилиндрах диаметром 70 мм с одинаковым усилием для образцов с различным количеством битума.

Зависимость разрушающей нагрузки от количества битума в ОФС для испытанных образцов представлена в табл. 4 и на рис. 8.

Таблица 4

Результаты испытаний образцов из отработанной формовочной смеси с битумом на разрушающую нагрузку

Test results of samples from the spent molding sand with bitumen for breaking load

Количество битума в ОФС, %	5	8	10	15	20
Разрушающая нагрузка F , кН	7,89	8,73	9,30	6,62	3,96



Рис. 8. Зависимость разрушающей нагрузки от количества битума в отработанной формовочной смеси

Fig. 8. Dependence of breaking load on the amount of bitumen in the spent molding sand

Анализируя данные табл. 4 и рис. 8, можно заключить следующее: повышение прочности образцов с увеличением количества битума в ОФС происходит в пределах примерно 10–12 %, а следующее добавление битума только ухудшает прочность образцов, так как смесь становится текучей.

ВЫВОДЫ

1. При устройстве нижнего слоя основания из цементогранулята обеспечивается достаточная его прочность, так как остатки старого бетонного раствора, находящиеся на каменной составляющей, при уплотнении способствуют лучшей заклинке. Это подтверждает тот факт, что из рядового щебня невозможно сформировать образцы посредством его сжатия, а из цементогранулята – можно, причем пре-

дел прочности сформованных образцов составил 50,07 МПа.

2. В случае устройства верхнего слоя основания из недостаточно прочных минеральных материалов, например из гравийной смеси, для его укрепления можно использовать асфальтогранулят, перемешивая и распределяя эти компоненты с последующим уплотнением. При этом нужно учитывать следующее:

- повышение прочности образцов с увеличением количества асфальтогранулята в минеральном материале в интервале 0–30 % происходит более интенсивно, чем в интервале 30–100 %;
- при устройстве слоя из чистого асфальтогранулята предел прочности изготовленных образцов наибольший;
- укрепляя минеральный материал асфальтогранулятом, последний желательно прогреть хотя бы до 25–30 °С.

3. Использование для сооружения верхнего и нижнего слоев основания дорожной одежды цемента- и асфальтогранулята, являющихся вторичными материалами, позволит сократить общую стоимость строительства, снизив негативное воздействие этих отходов на окружающую среду при уменьшении их складирования.

4. Отработанную формовочную смесь можно использовать в качестве выравнивающего слоя, при том что он будет укреплен вяжущим материалом. Однако следует учесть, что при укреплении цементом слой получается прочным, но одновременно жестким, а при укреплении битумом прочность ниже, но слой будет более упругим. Помимо всего прочего, отработанная формовочная смесь может быть использована для улучшения гранулометрического состава песчано-гравийной смеси при нехватке в ней мелких частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобильные дороги. Правила устройства: ТКП 059.1–2020 (33200). Введ. 01.09.2020. Минск: Минтранс, 2020. 76 с.
2. Автомобильные дороги / Я. Н. Ковалев [и др.]. Минск: Арт Дизайн, 2006. 351 с.
3. Бусел, А. В. Получение активированных минеральных порошков из отработанных формовочных смесей и их применение в дорожном асфальтобетоне / А. В. Бусел. Минск, 1983. 23 с.

4. Шумчик, В. К. Инновационные технологии при строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог / В. К. Шумчик, С. Е. Кравченко // Автомобильные дороги, мосты и подземные сооружения: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию Белор. нац. техн. ун-та, 21–22 окт. 2010 г. / отв. ред. И. И. Леонович [и др.]. Минск: БНТУ, 2010. Ч. 1. С. 213–223.
5. Реут, Ж. В. Цементогранулят как альтернатива природному сырью / Ж. В. Реут, С. И. Зиневич, Д. М. Ковалев // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / редкол. С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. Минск: БНТУ, 2020. С. 65–70.
6. Инновации в строительстве и эксплуатации дорожно-строительного комплекса: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых, аспирантов, магистрантов и студ., Минск, 22–23 нояб. 2017 г. / ред. А. В. Бусел и др. Минск: БНТУ, 2017. 90 с.
7. Зиневич, С. И. Использование цементогранулята в дорожном строительстве / С. И. Зиневич, А. К. Каюмов, Д. М. Ковалев // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 2. С. 134–141. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-134-141>.
8. Асфальтогранулят для транспортного строительства. Технические условия: СТБ 1705–2015. Введ. 01.03.2016. Минск: Госстандарт, 2015. 14 с.
9. Борукаев, С. Б. Применение вторичных материалов в ходе дорожных работ / С. Б. Борукаев // Молодой ученый. 2019. № 28. С. 20–22.
10. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний: ГОСТ 8269.0–97. Введ. 01.07.1998. Минск: Минстройархитектуры, 1998. 78 с.
11. Автомобильные дороги. Цементобетонные основания и покрытия. Правила устройства: ТКП 45-3.03-88–2007 (02250). Введ. 01.07.2008. Минск: Минстройархитектуры, 2017. 58 с.
12. Веренько, В. А. Новые материалы в дорожном строительстве / В. А. Веренько. Минск: Технопринт, 2004. 169 с.
13. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. Введ. 01.02.2016. Минск: Гос. комитет по стандартизации Респ. Беларусь, 2016. 36 с.
3. Busel A. V. (1983) *Obtaining Activated Mineral-Powders From Spent Molding Sands and Their Use in Road Asphalt Concrete*. Minsk. 23 (in Russian).
4. Shumchik V. K., Kravchenko S. E. (2010) Innovative Technologies in the Construction, Reconstruction, Repair and Maintenance of Highways. *Avtomobil'nye Dorogi, Mosty i Podzemnye Sooruzheniya: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Posvyashch. 90-Letiyu Belor. Nats. Tekhn. Un-ta, 21–22 Okt. 2010 g.* [Highways, Bridges and Underground Structures: Proceedings of International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 90th Anniversary of the Belarusian National Technical University, October 21–22, 2010]. Minsk, Belarusian National Technical University. Part 1. 213–223 (in Russian).
5. Reut Zh. V., Zinevich S. I., Kovalev D. M. (2020) Cement Granulate as an Alternative to Natural Raw Materials. *Dorozhnoe Stroitel'stvo i Ego Inzhenernoe Obespechenie: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Road Construction and Its Engineering Support: Proceedings of International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University. 65–70 (in Russian).
6. Busel A. V. (ed.) [et al.] (2017) *Innovations in the Construction and Operation of the Road Construction Complex: Proceedings of International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Graduate Students, Undergraduates and Students, Minsk, Novem. 22–23, 2017*. Minsk, Belarusian National Technical University. 90 (in Russian).
7. Zinevich S. I., Kayumov A. K., Kovalyov D. M. (2022) Use of Cement Granulate in Road Construction. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (2), 134–141. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-134-141> (in Russian).
8. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1705–2015. *Granular Asphalt for Transport Construction. Technical Specifications*. Minsk, Gosstandart Publ., 2015. 14 (in Russian).
9. Borukaev S. B. (2019) Use of Recycled Materials during Roadworks. *Molodoy Ucheny* [Young Scientist], (28), 20–22 (in Russian).
10. State Standard 8269.0–97. *Crushed Stone and Gravel From Dense Rocks and Industrial Waste for Construction Work. Methods of Physical and Mechanical Tests*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 1998. 78 (in Russian).
11. TKP [Technical Code of Common Practice] 45-3.03-88–2007 (02250). *Car roads. Cement Concrete Bases and Coatings. Device Rules*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2017. 58 (in Russian).
12. Verenko V. A. (2004) *New Materials in Road Construction*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 169 (in Russian).
13. State Standard 10180–2012. *Concrete. Methods for Determining the Strength of Control Samples*. Minsk, State Committee for Standardization of the Republic of Belarus, 2016. 36 (in Russian).

Поступила 27.06.2022

Подписана в печать 30.08.2022

Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. TKP [Technical Code of Common Practice] 059.1–2020 (33200). *Car Roads. Device Rules*. Minsk, Publishing House of Ministry of Transport, 2020. 76 (in Russian).
2. Kovalev Ya. N., Leonovich I. I., Yaromko V. N., Veren'ko V. A., Minin A. V., Cheptsov G. V., Yatsевич I. K. (2006) *Car roads*. Minsk, Art Dizayn Publ. 351 (in Russian).

Received: 27.06.2022

Accepted: 30.08.2022

Published online: 30.11.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-511-516>

УДК 69.059.25

Тепловая реабилитация фасадов эксплуатируемых панельных зданий

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

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

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

Реферат. Натурные исследования панельных зданий показали, что после 30 лет эксплуатации техническое состояние конструктивных элементов (закладные детали, сварные швы и др.) находятся в рабочем состоянии. При этом тепло-технические характеристики наружного стенового ограждения снизились более чем на 30 % по сравнению с принятыми при проектировании и не соответствуют нормативным требованиям. Одна из основных причин этого – деградация материала теплоизоляционного слоя стеновых панелей под влиянием атмосферных воздействий. Следовательно, проведение тепловой реабилитации наружных стеновых панелей позволяет обеспечить дальнейшую эксплуатацию панельных зданий без ограничений. По итогу выполненных исследований предлагается для тепловой реабилитации фасадов эксплуатируемых панельных зданий применить теплоизоляционную облицовочную плиту заводского изготовления. В публикации приведены результаты лабораторных экспериментов по выбору эффективно-го решения конструкции соединения (стыка) отдельных теплоизоляционных плит в теплоизоляционную облицовочную плиту требуемых размеров. Изложена технология изготовления теплоизоляционных облицовочных плит. Основными преимуществами предлагаемого конструктивно-технологического решения тепловой реабилитации наружных стеновых панелей являются: существенное сокращение ручных технологических процессов на строительной площадке, возможность производства работ без отселения жильцов, исключение появления «мостиков холода» в межпанельных швах в процессе эксплуатации зданий за счет применения стыка типа фолдинг.

Ключевые слова: теплоизоляционная облицовочная плита, стык типа фолдинг, деревянные штифты, фасадный клей-герметик СЕММIX, двухместные электрифицированные люльки

Для цитирования: Черноиван, В. Н. Тепловая реабилитация фасадов эксплуатируемых панельных зданий / В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 511–516. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-511-516>

Thermal Rehabilitation of Facades of Operated Panel Buildings

V. N. Chernoiivan¹⁾, N. V. Chernoiivan¹⁾

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

Abstract. Field studies of panel buildings have shown that after 30 years of operation, the technical condition of structural elements (embedded parts, welds, etc.) are in working condition. At the same time, the thermal characteristics of the external wall fencing have decreased by more than 30 % compared to those adopted during the design and do not meet regulatory requirements. One of the main reasons for this is the destruction of the material of the thermal insulation layer of wall panels under the influence of atmospheric influences. Consequently, the thermal rehabilitation of external wall panels allows for further operation of panel buildings without restrictions. According to the results of the studies carried out, it is proposed to use a factory-made thermal insulation cladding plate for thermal rehabilitation of the facades of operated panel buildings. The publication presents the results of laboratory studies on the choice of an effective solution for the design of the connection (joint) of individual thermal insulation plate into a thermal insulation facing plate of the required dimensions. The technology of manufacturing thermal insulation facing plates is described. The main advantages of the proposed structural

Адрес для переписки

Черноиван Вячеслав Николаевич
Брестский государственный технический университет
ул. Московская, 267,
224017, г. Брест, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 526-53-46
chernoiivan@inbox.ru

Address for correspondence

Chernoiivan Vyacheslav N.
Brest State Technical University
267, Moskovskaya str.,
224017, Brest, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 526-53-46
chernoiivan@inbox.ru

and technological solution for the thermal rehabilitation of external wall panels are: a significant reduction in manual technological processes on the construction site; the possibility of performing work without eviction of residents; eliminating the appearance of cold bridges in the inter-panel seams during the operation of buildings through the use of a folding type joint.

Keywords: thermal insulation facing plate, folding type joint, wooden pins, CEMMIX facade adhesive sealant, double electric cradles

For citation: Chernoiivan V. N., Chernoiivan N. V. (2022) Thermal Rehabilitation of Facades of Operated Panel Buildings. *Science and Technique*. 21 (6), 511–516. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-511-516> (in Russian)

Введение

Результаты обследования панельных зданий, эксплуатируемых более 30 лет, показали, что техническое состояние бетона и узлов конструктивных элементов (закладные детали, сварные швы и др.) находится в рабочем состоянии. Установлено, что ухудшение эксплуатационных характеристик этих зданий вызвано существенным (почти на 35 %) снижением теплотехнических характеристик стенового ограждения по сравнению со значениями, принятыми при проектировании. Причина этого – разрушение материала теплоизоляционного слоя стеновых панелей [1–3]. Низкие эксплуатационные характеристики (разгерметизация) межпанельных швов (стыков) также оказывают негативное влияние на комфортность проживания в панельных зданиях [4–7]. Кроме того, необходимость проведения текущего ремонта стыков через каждые 8–10 лет существенно удорожает эксплуатацию панельных зданий.

Следовательно, выполнив тепловую реабилитацию эксплуатируемых наружных стеновых панелей, реально обеспечить комфортное проживание в панельных зданиях [6, 8]. Сегодня основным, массово применяемым решением тепловой реабилитации стенового ограждения является устройство легкой штукатурной системы [9, 10] – это трудоемкий полумеханизированный технологический процесс, полностью выполняемый на строительной площадке [11]. Наряду с высокой трудоемкостью устройства легкой штукатурной системы, для обеспечения высокого качества теплоизоляционного покрытия должны быть соблюдены технологические перерывы (более 10 сут.).

Как показывает практика, определенные трудности возникают при установке анкерных устройств для крепления плитного утеплителя к подоснове. Использование молотка для установки дюбелей в просверленные отверстия и пробойника, чтобы заглубить сердечник до проектного положения, создает локальные динамические воздействия, которые могут привести к повреждению (разрушению структуры)

плитного утеплителя и появлению дефектов (трещин) в материале подосновы (стены).

Сегодня в Республике Беларусь основной объем работ по тепловой модернизации фасадов выполняется в зданиях с наружными стенами из искусственных штучных материалов. Легкая штукатурная система для тепловой модернизации фасадов панельных зданий применяется в ограниченных объемах. Основными причинами, сдерживающими внедрение этой технологии, являются:

- существенное увеличение трудоемкости производства работ за счет большой протяженности стыков между стеновыми панелями;

- локальные динамические воздействия на подоснову и плитный утеплитель при установке анкерных устройств.

Таким образом, разработка эффективно-конструктивно-технологического решения утепления фасадов эксплуатируемых панельных зданий представляется актуальной задачей.

Разработка конструктивно-технологического решения тепловой реабилитации фасадов зданий

Анализ публикаций и поисковые исследования [8, 11] позволяют в качестве базы для тепловой реабилитации фасадов эксплуатируемых панельных зданий рекомендовать применение теплоизоляционных облицовочных плит заводского изготовления (рис. 1) [12]. Для обеспечения качественного изготовления теплоизоляционных облицовочных плит все работы необходимо выполнять в производственных помещениях (цехах) с температурой воздуха не ниже 5 °С. Это позволит существенно сократить трудоемкость работ по тепловой реабилитации фасадов, так как из технологического процесса исключаются ручные операции: установка анкерных устройств, устройство армированного и декоративно-защитного слоев.

Устройство горизонтальных и вертикальных стыков типа фолдинг между теплоизоляционными облицовочными плитами позволяет исключить из производства работ герметизацию

межпанельных швов (стыков), что также существенно сократит трудоемкость производства работ и позволит увеличить срок эксплуатации стенового ограждения без ремонта (рис. 2).

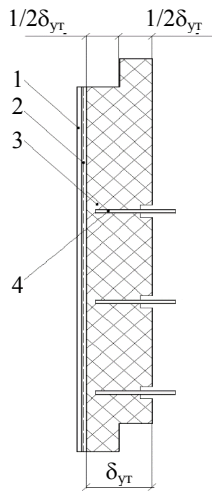


Рис. 1. Теплоизоляционная облицовочная плита:

- 1 – декоративно-защитный слой (включает штукатурку и окраску); 2 – армирующий слой (стеклосетка ССШ-160);
- 3 – теплоизоляция из плитного утеплителя;
- 4 – стеклопластиковый анкер-кронштейн

Fig. 1. Thermal insulation facing plate:

- 1 – decorative and protective layer (includes plaster and paint); 2 – reinforcing layer (ССШ-160);
- 3 – thermal insulation from plate insulation;
- 4 – fiberglass anchor-bracket

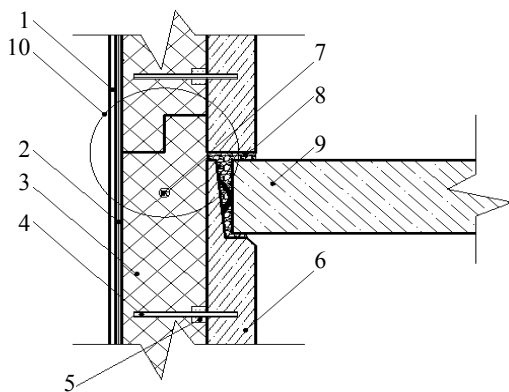


Рис. 2. Конструктивное решение стыка типа фолдинг:

- 1 – декоративно-защитный слой; 2 – армирующий слой (стеклосетка ССШ-160); 3 – теплоизоляция из плитного утеплителя; 4 – стеклопластиковый анкер-кронштейн; 5 – втулка; 6 – бетонный несущий слой;
- 7 – штифты соединения плитного утеплителя в блоки;
- 8 – цементный раствор; 9 – железобетонная плита перекрытия; 10 – стык типа фолдинг

Fig. 2. Constructive solution of the folding type joint:

- 1 – decorative and protective layer; 2 – reinforcing layer (ССШ-160); 3 – thermal insulation made of plate insulation;
- 4 – fiberglass anchor bracket; 5 – sleeve; 6 – concrete bearing layer; 7 – pins connecting plate insulation into blocks;
- 8 – cement mortar; 9 – reinforced concrete floor slab;
- 10 – folding type joint

Разработка конструкции

соединения (стыка) заготовок из плитных утеплителей заводского изготовления

Сегодня для тепловой изоляции наружных стен массово выпускаются минераловатные плиты размерами 500×1000 мм или 600×1200 мм. В связи с этим для изготовления теплоизоляционных облицовочных плит любых требуемых типоразмеров необходимо разработать конструкцию соединения (стыка) заготовок из плит заводского изготовления в теплоизоляционные облицовочные плиты проектного размера.

Анализ литературных источников позволил сделать вывод, что в слабонагруженных соединениях двух полимеров, какими являются теплоизоляционные плиты, целесообразно применять соединение на штифтах [1]. Оно позволяет минимизировать влияние малой прочности материала плитного утеплителя на сдвиг (срез), а также полностью исключает возникновение кромочных напряжений вблизи отверстий под соединения и, как следствие, обеспечивает герметичность стыка в процессе эксплуатации стенового ограждения. Как показывает практика, основными причинами, которые могут привести к появлению деформаций в штифтовом соединении стыка, являются:

- местное смятие или разрушение (срез) материала плитного утеплителя на участке установки штифта;
- разрушение штифта.

Известно, что на характер напряженно-деформированного состояния в соединениях большое влияние оказывает соотношение модулей упругости соединяемых в узле материалов. Чем это соотношение ближе к единице, тем соединение эффективней. Выполненные поисковые исследования показали, что наиболее полно данному критерию из всех местных недефицитных материалов отвечает древесина (соотношение $E_{др}/E_{мин.вата} = 1,3$). Простота технологии защиты древесины антипиренами и антисептиками позволяет обеспечить негорючесть и долговечность стыка на деревянных штифтах. Следовательно, использование древесины можно рекомендовать в качестве штифтов.

Базируясь на исследованиях В. С. Деревягина [13], при разработке стыка было принято соотношение между длиной деревянного штифта l и его толщиной d , равное $l/d = 4,0$. Исходя из требуемой по теплотехническим расчетам толщины минераловатных плит, рекомендуется принять деревянные штифты диаметром 10 мм. Для разработки эффективного соединения минераловатных плит на деревянных штифтах выполнены лабораторные испытания образцов двух типов [14]:

- тип 1 – шаг штифтов 75 мм;
- тип 2 – шаг штифтов 100 мм.

Испытания образцов проводили на статический изгиб согласно ГОСТ 17177 [15] на прессе марки ИР 5145-500-11.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ технического состояния соединения минераловатных плит на деревянных штифтах после завершения испытаний образцов показал, что при шаге штифтов 75 мм разрушений материала минераловатных плит и деформаций штифтов не произошло [14]. Установлено, что $R_{\text{стыка}}$ для образцов типа 1 практически равно пределу прочности материала минераловатных плит при изгибе (0,25–0,30 МПа). Следовательно, стык минераловатных плит на деревянных штифтах $d = 10$ мм и $l = 40$ мм с шагом расстановки 75 мм можно рекомендовать к применению.

Технология производства работ по тепловой реабилитации фасадов состоит из двух технологических процессов:

- изготовление теплоизоляционных облицовочных плит – выполняется в цеху;
- закрепление плит на фасадах (стеновых панелях) эксплуатируемых зданий – выполняется на объекте.

Рекомендуется следующая технологическая последовательность изготовления теплоизоляционных облицовочных плит. На первом этапе, согласно проектной документации, из теплоизоляционных плит заводского изготовления нарезаются заготовки. На торцевых поверхностях заготовок размечают места установки деревянных штифтов.

С помощью ручной электродрели сверлом диаметром 6 мм просверливают отверстия глубиной $(20 + 5)$ мм. Штифты в отверстия устанавливают с помощью киянки без использования клея. После установки штифтов в проектное положение выполняется герметизация стыка с использованием нейтрального силиконового герметика Soudal. Проектное положение отдельных минераловатных плит при изготовлении теплоизоляционной плиты обеспечивается за счет наклеивания на стыки с помощью клеевого полимерного состава КС-1 двусторонних полосок из армирующего материала (стеклосетка ССШ-160) шириной 200 мм.

Следующая технологическая операция – отделка наружной поверхности плитного утеплителя, включающая:

- наклеивание армированного слоя из стеклосетки;
- устройство декоративно-защитного слоя.

Отделка наружной поверхности выполняется по технологии, аналогичной устройству легкой штукатурной системы [11].

Затем на тыльной стороне теплоизоляционной облицовочной плиты с помощью шаблона размечают места установки анкеров-кронштейнов и сверлят под них отверстия диаметром 8 мм. Использование в качестве анкеров-кронштейнов рифленной стеклопластиковой арматуры диаметром 10 мм позволяет обеспечить ее сцепление (работу на выдергивание) с материалом минеральной ваты без применения клея.

Технологический процесс закрепления теплоизоляционных облицовочных плит к стеновому ограждению выполняется в такой последовательности. Рекомендуется работы по закреплению теплоизоляционных облицовочных плит на фасадах (стеновых панелях) производить с двухместных электрифицированных люлек. До крепления плит поверхности стеновых панелей необходимо очистить от загрязнений и выполнить их грунтование. Монтаж теплоизоляционных облицовочных плит к стеновому ограждению начинают с разметки на фасаде мест установки стеклопластиковых анкеров-кронштейнов и сверления отверстий под них. Крепление плит к стеновому ограждению осуществляют в полном соответствии с технологией, приведенной в [11].

Устройство стыка типа фолдинг рекомендуется выполнять по следующей технологии. До закрепления теплоизоляционной облицовочной плиты в проектное положение на соединяемые поверхности (пазы) стыков типа фолдинг с помощью валика (кисти) наносят слой фасадного клея-герметика СЕММИХ, который применяется в широком диапазоне температур (в том числе при отрицательных температурах) и быстро отверждается под влиянием влаги из воздуха.

ВЫВОД

По результатам выполненных исследований предложено эффективное конструктивно-технологическое решение тепловой реабилитации эксплуатируемых панельных зданий, позволяющее:

- существенно снизить трудоемкость и повысить качество работ при утеплении фасадов зданий;
- обеспечить герметичность межпанельных стыков без ремонта в течение всего срока эксплуатации панельного здания;
- проводить работы без отселения жильцов;
- исключить появление «мостиков холода» в межпанельных швах в процессе эксплуатации здания за счет применения стыка типа фолдинг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бартенев, Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Бартенев. М.: Наука, 1984. 279 с.
2. Архиреев, В. П. Старение и стабилизация полимеров / В. П. Архиреев. Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2002. 85 с.
3. Желдаков, Д. Ю. Химическая деструкция минеральной ваты / Д. Ю. Желдаков // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 5. С. 26–33. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.05.26-33>.
4. Данель, В. В. Решение проблемы вертикальных стыков наружных стеновых панелей / В. В. Данель // Жилищное строительство. 2014. № 3. С. 44–45.
5. Плотников, В. В. Влияние конструктивных решений стыков крупных панелей на энергоэффективность зданий / В. В. Плотников, А. И. Голенок // Инновации в строительстве – 2020: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию строит. ин-та ФГБОУ ВО «БГИТУ», Брянск, 25 декаб. 2020 г. Брянск: Брянск. гос. инж.-технол. ун-т, 2020. С. 235–239.
6. Варламова, Л. А. Герметизация крупнопанельных жилых домов / Л. А. Варламова, М. В. Рынькова // Теория и практика современной науки: материалы Междунар. (заочн.) науч.-практ. конф., Минск, 8 июня 2017 г. Минск: Навуковы свет, 2017. С. 20–26.
7. Разработка стыкового соединения ограждающих конструкций для крупнопанельных энергоэффективных жилых зданий в Брянской области / В. В. Плотников [и др.] // Инновации в строительстве – 2020: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию строит. ин-та ФГБОУ ВО «БГИТУ», г. Брянск, 25 декаб. 2020 г. Брянск: Брянск. гос. инж.-технол. ун-т, 2020. С. 230–234.
8. Леонова, А. Н. Методы повышения энергоэффективности зданий при реконструкции / А. Н. Леонова, М. В. Курочка // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7. С. 805–813. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.7.805-813>.
9. Новосельцева, Е. Л. Повышение энергоэффективности стыков панельных домов новых и старых серий / Е. Л. Новосельцева, Н. В. Шалагинова, М. С. Чарушина // Общество. Наука. Инновации: сб. ст. Всерос. ежегод. науч.-практ. конф., Киров, 1–29 апр. 2017 г. Киров: Науч. изд-во Вятск. гос. ун-та, 2017. С. 1640–1649.
10. Андрейко, И. В. Проблемы модернизации жилых домов 1950–1970-х годов / И. В. Андрейко, Е. А. Кайдановская // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: сб. науч. ст. Гродно, 2020. С. 3–5.
11. Технологическая карта на устройство легкой штукатурной системы «Илмакс»: ТК-100289293.1211–2020. Введ. 03.08.2020. Минск: ОАО «Стройкомплекс», 2020. 174 с.
12. Теплоизоляционная облицовочная стеновая панель: пат. № 8892 Респ. Беларусь, МПК (2012) Е 04В 1/76 / В. Н. Черноиван, В. Г. Новосельцев, Н. В. Черноиван. Опубл. 30.12.2012.
13. Деревягин, В. С. Безметалльные составные балки и металло-деревянные сборные фермы / В. С. Деревягин. М.: Стройиздат, 1947. 80 с.
14. Разработка научно обоснованных принципов осуществления тепловой реабилитации ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий на основе термического экрана: отчет о НИР, № ГР 20063374 (пром.) / БрГТУ; рук. В. Н. Черноиван. Брест, 2007. 32 с.
15. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний: ГОСТ 17177–94. Введ. 01.04.1996. М.: Межгос. науч.-техн. комис. по стандартиз. и технич. нормир. в стр-тве, 1996. 40 с.

Поступила 17.07.2022

Подписана в печать 04.10.2022

Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Bartenev G. M. (1984) *Strength and Mechanism of Polymer Destruction*. Moscow, Nauka Publ. 279 (in Russian).
2. Arkhireev V. P. (2002) *Aging and Stabilization of Polymers*. Kazan: Publishing House of Kazan State Technological University. 85 (in Russian).
3. Zheldakov D. Yu. (2021) Chemical Destruction of Mineral Wool. *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*, (5), 26–33. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.05.26-33> (in Russian).
4. Danel, V. V. (2014) Solution of Problem of Vertical Joints of External Wall Panels. *Zhilishchnoe Stroitelstvo = Housing Construction*, (3), 44–45 (in Russian).
5. Plotnikov V. V., Golenok A. I. (2020) Influence of Design Solutions of Joints of Large Panels on the Energy Efficiency of Buildings. *Innovatsii v Stroitel'stve – 2020: Sb. Dokl. Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Posvyashch. 60-Letiyyu Stroit. In-ta FGBOU VO «BGITU», Bryansk, 25 Dekab. 2020 g.* [Innovations in Construction – 2020: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 60th Anniversary of the Construction Institute of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Bryansk State University of Engineering and Technology”, Bryansk, December 25, 2020]. Bryansk, Bryansk State University of Engineering and Technology. 235–239 (in Russian).
6. Varlamova L. A., Rynkova M. V. (2017) Sealing of Large-Panel Residential Buildings. *Teoriya i Praktika Sovremennoi Nauki: Materialy Mezhdunar. (Zaochn.) Nauch.-Prakt. Konf., Minsk, 8 Iyunya 2017 g.* [Theory and Practice of Modern Science: Proceedings of the International (Correspondence) Scientific and Practical Conference, Minsk, June 8, 2017]. Minsk, Navukovy Svet Publ. 20–26 (in Russian).
7. Plotnikov V. V., Basharin E. S., Dubovskoi P. V., Kireenkova E. A., Ryzhenok M. S., Sinitsyna A. V., Plotnikova S. V., Golenok A. I. (2020) Development of Butt Joint of Enclosing Structures for Large-Panel Energy-Efficient Residential Buildings in the Bryansk Region. *Innovatsii v Stroitel'stve – 2020: Sb. Dokl. Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Posvyashch. 60-Letiyyu Stroit. In-ta FGBOU VO «BGITU», Bryansk, 25 Dekab. 2020 g.* [Innovations in Construction – 2020: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 60th Anniversary of the Construction Institute of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Bryansk State University of Engineering and Technology”, Bryansk, December 25, 2020]. Bryansk, Bryansk State University of Engineering and Technology. 230–234 (in Russian).
8. Leonova A. N., Kurochka M. V. (2018) Methods to Improve Energy Efficiency of Buildings During Reconstruction. *Vestnik MGSU = Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 13 (7), 805–813. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.7.805-813> (in Russian).
9. Novoseltseva E. L., Shalaginova N. V., Charushina M. S. (2017) Improving the Energy Efficiency of the Joints of Panel Houses of New and Old Series. *Obshchestvo. Nauka. Innovatsii: Sb. St. Vseros. Ezhegod. Nauch.-Prakt. Konf., Kirov, 1–29 Apr. 2017 g.* [Society. Science. Innovations: Proceedings of the All-Russian Annual Scientific and Practical Conference, Kirov, April 1–29, 2017]. Kirov, Scientific Publishing House of Vyatka State University. 1640–1649 (in Russian).
10. Andreyko I. V., Kaydanovskaya E. A. (2020) Problems of Modernization of Residential Buildings in the 1950s–70s. *Traditsii, Sovremennyye Problemy i Perspektivy Razvitiya Stroitel'stva: Sb. Nauch. St.* [Traditions, Modern Problems and Prospects of Construction Development: Collection of Scientific Articles]. Grodno, 3–5 (in Russian).
11. TK 100289293.1211–2020. *Manufacturing Plan for the Production of a Light Plaster System “Ilmax”*. Minsk, JSC “Stroykompleks”. 174 (in Russian).
12. Chernoiyan V. N., Novoseltsev V. G., Chernoiyan N. V. (2012) *Thermal Insulation Cladding Wall Panel*. Patent No 8892 Republic of Belarus (in Russian).
13. Derevyagin V. S. (1947) *Metal-Free Composite Beams and Metal-Wood Prefabricated Trusses*. Moscow, Stroyizdat Publ. 80 (in Russian).
14. Chernoiyan V. N. (2007) (Head) *Development of Scientifically Based Principles for the Implementation of Thermal Rehabilitation of Enclosing Structures of Operated Buildings on the Basis of a Thermal Shield*: Research Report, No GR [State Registration] 20063374 (Industry). Brest, Brest State Technical University. 32 (in Russian).
15. State Standard 17177–94. *Materials and Products for Building Heat-Insulating. Test Methods*. Moscow, Interstate Scientific and Technical Commission for Standardization and Technical Regulation in Construction, 1996. 40 (in Russian).

Received: 17.07.2022

Accepted: 04.10.2022

Published online: 30.11.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-517-524>

UDC 656.021.8

Organization of Logistics Operations for Transportation of Household Electronic Waste in Cities

D. V. Kapskiy¹⁾, O. N. Larin²⁾, Nguyen Thi Thu Huong³⁾, L. V. Khmel'nitskaya¹⁾

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

²⁾Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation),

³⁾Plekhanov Russian University of Economics (Moscow, Russian Federation)

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

Abstract. The paper presents the methodological provisions for the organization of logistics operations during the transportation of household electronic waste in large cities. Human activity is accompanied by the formation of waste, the amount of which has recently increased. In modern conditions, households actively use electronic and electrical devices. Therefore, a lot of household electronic and electrical waste is generated, which is hazardous to the environment and must be disposed of in accordance with legal requirements. The efficiency of disposal of household electronic waste depends on the organization of logistics operations for the collection, accumulation and removal of such waste. The main methodological stages of logistical support for the recycling process include the formation of a hierarchy of territorial formations (taxons), standardization of waste generation indicators for taxa of each level in the hierarchy, designing the configuration of a network of collection points for acceptance and temporary storage of waste within the boundaries of the service area, substantiating the rational storage capacity of each point and deadlines for waste storage; planning the transportation of waste from accumulation points to objects of their further processing. When planning the transportation of waste, the actual volume of waste accumulation at each collection point is taken into account, transportation routes are designed for the shortest distances, taking into account the capacity of vehicles. The main feature of the developed method of waste removal is the operational adjustment of routes so that the car drives only to those accumulation points where the actual volume of waste has reached the maximum storage capacity. This approach ensures timely waste collection and lower transportation costs compared to existing methods that organize waste collection at a specified frequency. The developed methodology was tested on the basis of statistical data from Hanoi (Vietnam). The results of numerical experiments show that the application of methods provides a reduction in transport costs for the removal of household electronic waste, and also increases the level of their collection and disposal.

Keywords: recycling, logistics operations, household electronic waste, waste collection points, waste disposal

For citation: Kapskiy D. V., Larin O. N., Nguyen Thi Thu Huong, Khmel'nitskaya L. V. (2022) Organization of Logistics Operations for Transportation of Household Electronic Waste in Cities. *Science and Technique*. 21 (6), 517–524. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-517-524>

Организация логистических операций при перевозке электронных бытовых отходов в городах

Докт. техн. наук Д. В. Капский¹⁾, докт. техн. наук, проф. О. Н. Ларин²⁾,
асп. Нгуен Тхи Тху Хыонг³⁾, Л. В. Хмельницкая¹⁾

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

²⁾Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация),

³⁾Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова (Москва, Российская Федерация)

Реферат. В статье представлены методические положения организации логистических операций при перевозке электронных бытовых отходов в крупных городах. Жизнедеятельность человека сопровождается формированием

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-70
oapdd_atf@bntu.by

Address for correspondence

Kapskiy Denis V.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-70
oapdd_atf@bntu.by

отходов, количество которых в последнее время возрастает. В современных условиях домохозяйства активно используют электронные и электрические устройства. Поэтому образуется много электронных и электрических бытовых отходов, которые представляют опасность для окружающей среды и должны быть утилизированы с соблюдением законодательных требований. Эффективность утилизации электронных бытовых отходов зависит от организации логистических операций по сбору, накоплению и вывозу таких отходов. Основные методические этапы логистической поддержки процесса утилизации включают: формирование иерархии территориальных образований (таксонов), нормирование показателей генерации отходов для таксонов каждого уровня в иерархии, проектирование конфигурации сети сборных пунктов для приемки и временного хранения отходов в границах обслуживаемой территории, обоснование рациональной складской емкости каждого пункта и предельных сроков хранения отходов, планирование перевозки отходов от пунктов накопления до объектов их последующей обработки. При планировании перевозки отходов учитывается фактический объем накопления отходов в каждом пункте сбора, проектируются маршруты перевозок по кратчайшим расстояниям с учетом вместимости транспортных средств. Главная особенность разработанной методики вывоза отходов заключается в оперативной корректировке маршрутов, чтобы автомобиль заезжал только в те пункты накопления, в которых фактический объем отходов достиг предельной емкости складирования. Данный подход обеспечивает своевременный вывоз отходов и снижение затрат на перевозку по сравнению с существующими методами, которые организуют вывоз отходов с установленной периодичностью. Разработанная методика апробирована на основе статистических данных г. Ханой (Вьетнам). Результаты численных экспериментов показывают, что применение методик обеспечивает снижение транспортных затрат на вывоз электронных бытовых отходов, а также повышает уровень их собираемости и утилизации.

Ключевые слова: утилизация, логистические операции, электронные бытовые отходы, пункты сбора отходов, вывоз отходов

Для цитирования: Организация логистических операций при перевозке электронных бытовых отходов в городах / Д. В. Капский [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 517–524. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-517-524>

Introduction

Sustainable economic development is one of the seventeenth Global Goals. Therefore, governments started paying more attention to environmental pollution issues, including electronic household waste (e-waste) pollution. Where e-waste is various forms of electric and electronic equipment (EEE) that have ceased to be of value to their users. E-waste also contains various toxic components such as lead, mercury, cadmium, barium, etc. that can be dangerous to the environment and human health in case of incorrect collecting and treatment. A big amount of recent research indicates broadening of the e-waste amount because of expanding the scale of EEE usage, devices breaking down, short product life cycle, etc. [1–4].

Logistic support for e-waste management (LSEWM) is to ensure the contemporary and cost-effective waste movement along all stages of the reverse logistics chain, such as:

- generation sources of the waste stream (GSWS) located within the boundaries of certain territorial areas (taxa);
- the collecting points (CP) of e-waste acceptance and temporary storage;
- transportation from the CP to the points of accumulation and treatment (PAT);
- further redistribution to the points of e-waste disposal (DP) by the established technology of use (recycling, regeneration, recovery, etc.).

Disadvantages of LSEWM cause low e-waste disposal efficiency [5–7]. Therefore, studying negative factors and improving organizational approaches for LSEWM is an up-to-day scientific objective. The research aim is to study negative factors and to improve organizational and economic conditions for effective LSEWM. The scientific novelty is to develop theoretical approaches for organizing the LSEWM and to create methodological recommendations for increasing LSEWM efficiency.

Methods

The main functions of LSEWM are:

- creating the territorial areas (taxa) hierarchy for LSEWM;
- standardizing generation indicators of e-waste for taxa of each hierarchy level;
- designing the network configuration of e-waste transfer from GSWS within service area boundaries to CP;
- substantiation for the rational storage capacity of each CP and relevant deadlines for e-waste storing there;
- planning of e-waste removal with minimal transportation costs from the CP to PAT.

The LSEWM system contains:

- a complex of standardized regulation of e-waste management;

- licensing of activities for the e-waste disposal;
- the institutional environment of the e-waste disposal;
- interaction models among participants of disposal activities.

Analysis of e-waste management in Vietnam enables us to point out the negative reasons for the lack of disposal efficiency:

- the access of commercial facilities to disposal has not been regulated and the efficiency of its implementation has not been controlled;
- measures have not been taken to develop the infrastructure for e-waste collection;
- economic incentives have not been used to motivate stakeholders to increase the collection of e-waste and reduce the cost of logistics operations such as e-waste shifting to the resource recovery facilities.

It is necessary to organize the interaction among all participants of the reverse logistic chain by the Vietnam administration for planning LSEWM and increasing its efficiency. Where clear separation of power, rights, and duties are implied [8, 9].

For the organization of LSEWM, data on the average daily volumes of e-waste generation in the regions Q_{RD} , t/day, and their districts Q_{PD} , t/day, are required. However, these indicators are not usually known or precise. Statistical analysis on e-waste generation data in various territorial entities reveals statistical relation among scopes of adjacent taxa hierarchy levels. Correlation analysis on the relation between e-waste generation scopes in Hanoi and its districts and the number and density of population has been conducted. Such analysis allows justifying the feasibility of using the calculated data on the average daily volumes of taxon e-waste generation (a city Q_{CD} , e. g.) and subtaxon (lower level of taxon hierarchy, a region Q_{RD} , e. g.) that is possible due to accounting current population. It is feasible through converting average daily volumes in cities Q_{CD} , t/day, into specific indicators by population. Such a specific indicator is an average daily intensity of e-waste generation W_{CD} , kg/capita/day, for an urban area that is calculated as the ratio of the average daily volume of e-waste generation in a city to the number of citizens N_C (thousand people)

$$W_{CD} = \frac{Q_{CD}}{N_C}. \quad (1)$$

The possibility of using the value of intensity indicators of e-waste generation of higher taxa in the hierarchy to determine the generation scale of the adjacent lower taxa is substantiated due to a comparative analysis of the statistical characteristics of e-waste generation indicators for Hanoi and its regions. For instance, the calculated value of the city's density W_{CD} is used for assessing the amount of e-waste in a region Q_{RD} , and the calculated value of the region density W_{RD} is used for assessing the amount of e-waste in a district Q_{PD} . The following are the equations for such cases:

$$Q_{RD} = W_{CD} F_R P_R; \quad (2)$$

$$Q_{PD} = W_{RD} F_P P_P, \quad (3)$$

where F_R , F_P – areas of a region or a district relevantly, km²; P_R , P_P – population densities of a region or a district accordingly, people/km².

To organize a CP network, it is necessary to ensure a high level of accessibility of these points for the population, which is feasible by locating the CP within the acceptable indicator value of their remoteness L_P from the locations of potential GSWS – citizens and households. The value of the L_P indicator is determined by various factors, mainly of a social nature (such as the population age, lifestyle, leisure time, etc.). It is advisable to conduct a direct survey of the population to assess the preferred value of L_P . The value of L_P defines the area boundaries D_i ($i \in P$), which are supposed to be served by one e-waste collection point.

Each service area (SA) is a square cell with the same width L_B , height L_H and area F_P

$$F_P = 4L_P^2. \quad (4)$$

When forming the network for CP, a settlement is divided into a set of R “characteristic districts” in such a way that all of them have the same population density P_{Ri} ($i \in P$). Where the “characteristic district” notion indicates that several “characteristic districts” can be created within or along the boundaries of a regulated administrative area.

District division makes it feasible to improve the accuracy of estimating the volumes of e-waste accumulation at each CP, which is crucial for planning the parameters of e-waste disposal at the PAT.

The planned number of the SA by the territorial boundaries (M_P) is calculated by the equation:

– for cities M_{PC} , U:

$$M_{PC} = \frac{F_C}{F_P}; \quad (5)$$

– for regions M_{PR} , U:

$$M_{PR} = \frac{F_R}{F_P}. \quad (6)$$

The planned number of the SA for Hoang Mai district is (for $L_P = 0.9$ km, that was determined on the survey data of GSWS with accounting varies economic stimulations)

$$M_{PR} = \frac{F_R}{F_P} = \frac{41}{3.24} = 12.65 \approx 13 \text{ U}. \quad (7)$$

It is necessary to determine the Q_{PD} indicator of the average e-waste daily volume within the boundaries of the area for planned CP by formula (3). The obtained values Q_{PD} are assigned to all CP within the “characteristic region”. The value Q_{PD} reveals the potential e-waste volume that can be collected at one CP per day, provided that all GSWS send e-waste for disposal through the official CP network.

The required storage capacity Q_{PB} of CP for temporary storing of e-waste received from the population is calculated based on the Q_{PD} indicator. The minimum CP's capacity corresponds to the average daily generation volume ($Q_{PBmin} = Q_{PD}$), and it is set at the daily removal of e-waste, which corresponds to the value of the accumulation period T_W per day.

Since the daily removal of small batches of e-waste is accompanied by high costs for the transportation S_{TB} , to reduce them, it is possible to set intervals for the e-waste removal with a longer duration ($T_{Wm} \geq 1$). However, in this case, it is necessary to increase the storage capacity of the point Q_{PB} , t, to store the stock of e-waste to the size

$$Q_{PB} = Q_{PD} T_{Wm}, \quad (8)$$

that causes an increase of cost S_{CB} on CP maintaining.

The cost S_{CB} for the maintenance of all infrastructure facilities directly depends on their capacity Q_{PB} , while the removing cost S_{TB} decreases

as this capacity increases. This makes it possible to find such value Q_{PB}^* that the total costs S_{CBT} is minimal. This also determines the value of the capacity Q_{PB}^* , in relevance with the optimal length of the T_W^* period.

The costs S_{CB} of the maintenance of the CP network depend on the total capacity of the collecting points S_{CB} , CU (currency units), and are calculated by the formula

$$S_{CB} = Q_{PB} U_{PB} T_Y = T_W Q_{PD} N_P U_{PB} T_Y, \quad (9)$$

where U_{PB} – cost rate for the maintenance of a single capacity of the CP, CU/capita/day.

The cost S_{CT} , CU, for removal e-waste from CP to PAT is determined by the formula

$$S_{CT} = Q_{CT} U_T, \quad (10)$$

where Q_{CT} – amount of transport work for transportation the planned e-waste scope Q_{CY} , t-km/year; U_T – cost rate per unit of transport work performed, CU/t-km.

The amount Q_{Mj} of the transported e-waste for each route is set taking into account the carrying capacity of the specialized rolling stock q_A , used on the line. With full use of the carrying capacity of the rolling stock, it is equal: $Q_{Mj} = q_A$.

The formula for calculating the S_{CBT} of the total cost for LSEWM is as follows:

$$\begin{aligned} S_{CBT} = & T_W U_{PB} T_Y \sum_{i=1}^R (Q_{PDi} M_{PRi}) + \\ & + \frac{T_Y 2L_P q_A U_T}{T_W} \sum_{i=1}^R M_{PRi} + T_Y U_T \sum_{i=1}^R (M_{PRi} Q_{PDi} L_{Di}) - \\ & - T_Y U_T 2L_P \sum_{i=1}^R (M_{PRi} Q_{PDi}), \end{aligned} \quad (11)$$

where R – region number; L_{Di} – longest path within the boundaries of i^{th} region, km.

Analysis of the formula (11) shows that all indicators are constant values, except for T_W . Therefore, it is possible to find such a value of T_W^* to minimize the cost function of S_{CBT} for LSEWM

$$S_{CBT} \xrightarrow{T_W} \min. \quad (12)$$

Let us differentiate the equation S_{CBT} (12) concerning T_W , days, by equating the result to zero and find T_W^*

$$T_W^* = \sqrt{\frac{2L_P q_A U_T \sum_{i=1}^R M_{PRi}}{U_{PB} \sum_{i=1}^R (Q_{PDi} M_{PRi})}}, \quad i = 1, 2, \dots, R. \quad (13)$$

Based on the dataset on Hanoi May region the optimal period of accumulation for all CP T_W^* equals to 5 days. The following values are used for calculation: $T_Y = 365$ days; $L_P = 0.9$ km; $q_A = 5$ t; $U_T = 560$ ruble/t-km; $M_{PR} = 13$ U; $U_{PB} = 790$ ruble/capita/days; $Q_{PD} = 0.25$ t/days.

In relation to the equation (21) total costs S_{CBT} for LSEWM equals to 13653238 ruble per year, where $L_D = 8.1$ km and estimated optimal value $T_W^* = 5.05$ days. If T_W is rounded value to 5 days $S_{CBT} = 13653738$ ruble/year.

The transportation route of e-waste is a motion scheme of a vehicle along the street and road network of the city that is obtained by the coherent or consistent visiting all required by route CP. The set of routes is supposed to be optimal within minimal common vehicle mileage L_M . The route charts of vehicles along a route are designed in relevance with the time consumption on technological operations such as movement among CP, e-waste acceptance, etc.

Results

Standard procedure for planning e-waste transportation in the cities provides for determination of some parameters such as:

- frequency (intervals) of e-waste transport according to the cyclical nature of its accumulation;
- the shortest vehicle path among CP that provides with cost minimization on transport;
- the calculation of the required number of rolling stock A_M relevant to the full e-waste transportation of the volume Q_{PBi} from each CP that is accumulated in optimal period T_W^* .

The first parameter is crucially important as incorrect intervals can cause a deficit of free space in CP that leads to reducing the e-waste disposal level. There are two prime approaches relevantly to the cyclical waste generation parameter:

- “by the set frequency” approach;
- “by the actual filling” approach.

Frequency property is inherent in the accumulation of all waste categories. For instance, in cities, municipal solid waste is accumulated regularly and, as a rule, evenly in all CP that is due to the peculiarities of the everyday products' consumption

by the population. Therefore, the removal of MSW, especially in large cities, is carried out according to the principle “by the set frequency”, as a rule, daily, covering all the route networks of all CP in each district. However, this approach does not apply to the organization of e-waste disposal, since such waste is characterized by cyclicity with less regularity and uniformity of volume accumulation.

The actual values of the e-waste generation parameters are determined by the reliability of the functioning of electronic products, which end-of-life, as a rule, occurs randomly. Consequently, even with known values of the e-waste generation intensity, it is difficult to predict the moment when each electronic product breaks down and enters a specific CP. This circumstance means that if you plan the removal of e-waste according to the principle “by the set frequency” at intervals T_W^* , then the storage capacity of individual CPs can be exhausted ahead of schedule. That means if the storage capacity is exhausted, the CP will not be able to receive e-waste which is unacceptable.

To avoid such undesirable situations, it is proposed to plan the removal of e-waste “by the actual filling” of the CP storage capacity. This methodological principle allows the formation of e-waste disposal routes for individual days within the T_W^* period, when the actual accumulated volume of e-waste in individual CP reaches the established export rate Q_{PB} (point capacity limit), calculated by the formula (8) taking into account the duration of T_W^*

$$Q_{PW} = Q_{PB}. \quad (14)$$

The following algorithm is proposed for planning the removal of e-waste “by the actual filling” of the CP capacity with a minimum total mileage of vehicles LM:

- providing with a list of CP for the upcoming planned e-waste removal;
- providing with a matrix of the shortest paths among all CP and PAT;
- providing with a system of optimal routes according to the criterion of the minimum total mileage;
- calculation of the required number of rolling stock units to service all routes during the day.

For the timely removal of e-waste in each CP, the current filling level of the storage capacity should be monitored. If condition (8) is satisfied CPs are included in the plan for the upcoming removal. To implement this approach, a numerical

experiment was carried out for the CPs in the Hoang Mai area, which is located on D_i sites (one site – one CP).

With an average daily volume of waste generation, $Q_{PD} = 0.25$ t/day and the optimal accumulation period $T_W^* = 5$ days, the storage capacity of each collecting point is $Q_{PW} = 1.25$ t. Using the program module “random number generation” MS Excel, for each t^{th} day of the planning period $T_D = T_W^*$, the distribution of CP is simulated where the actual level Q_{PWt} of accumulated e-waste reaches the established limit Q_{PB} of the capacity of the point. The results of one of the options for generating random numbers are presented in Tab. 1.

The volume of accumulated waste Q_{PWt} , t, in each T_{Di} day is

$$Q_{PWt} = Q_{PW} N_{PDt}, \quad t \in T_D, \quad (15)$$

and for the entire period T_D , the total removal volume Q_{RW} , t, for all sections of the district is

$$Q_{RW} = \sum_{t=1}^n Q_{PWt}, \quad n=1, 2, \dots, T_D. \quad (16)$$

The matrix of the shortest paths among all CPs and PATs is developed taking into account the actual data of GIS systems on the locations of these objects and the configuration of the transport network [10]. To design the optimal routes, standard mathematical methods developed for the “Traveling salesman problem” [11–15] have been used. For instance, the evolutionary algorithm that has been implemented in the “Solution Search” software module MS Excel. Tab. 2 presents the prime characteristics of the optimal “global” route, covering all CPs.

The information presented in Tab. 2 shows that the vehicle starts moving in the PAT (number “0”), then passes through the CP in the following sequence: 1–3–4–8–9–10–11–12–13–7–6–5–2, and returns to PAT (number “0”). The total length of

the global route equals $LM = 35.61$ km. The global route is used to organize waste collection according to the approach “by the set frequency” when the vehicle regularly bypasses all CPs. in sequence. The volume of W_{RG} transport work for the removal of e-waste along the global route is

$$U_{RG} = N_{MT} Q_{RW} L_M = \frac{365}{5} \cdot 16.25 \cdot 35.61 = 42242.36 \text{ t} \cdot \text{km}, \quad (17)$$

where N_{MT} – the total cycle number of detour cycles of the global (number of removals) for the period T_Y (a year),

$$N_{MT} = \frac{T_Y}{T_W} = \frac{365}{5} = 73 \text{ U}. \quad (18)$$

When calculating U_{RG} , the value Q_{RW} is used, and the products' Q_{PW} volumes and the length of individual sections of the route have not been summed up, since the work of the vehicle is paid regardless of the degree of its filling. Costs S_{RG} for the removal of all waste during the T_Y period along the global route is equal to:

$$S_{RG} = U_{RG} S_T = 42242.36 \cdot 7.43 = 313860.73 \text{ USD}. \quad (19)$$

where S_T – cost rate per unit of transport work performed, and equals to 7.43 USD/(t·km).

However, in practice, global routes cannot always be implemented due to the limited vehicle load capacity (q_A). If the total amount of waste accumulated at all points exceeds the carrying capacity of the vehicle ($Q_{RW} > q_A$), then the global route is divided into several additional routes N_{MS} , U (sub-routes), and their number is determined by the formula

$$N_{MS} = \frac{Q_{RW}}{q_A}. \quad (20)$$

Table 1

The results of the distribution of e-waste accumulation in D_i points by days T_D of the period T_W

D_i , number of CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T_D , day number of period T_W	1	2	5	2	2	4	5	4	3	4	2	3	3

Table 2

Characteristics of the optimal global route

The visiting order of CP, number of CP	0	1	3	4	8	9	10	11	12	13	7	6	5	2	0
The distance to the following point, km	12.0	1.7	0.7	1.1	0.7	0.9	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	1.2	13.0	0

At the same time, all sub-routes are served on the same day, regardless of the actual amount of accumulation. The cost of servicing sub-routes is greater than that of servicing one global route, and is 330226.6 USD.

When planning the export “by the actual filling”, a system of local routes is developed to connect the PAT only with those CPS in which the actual amount of accumulation Q_{PW} has reached the limit value according to condition (8). The total number of N_{MZ} local routes is in the range from 1 to TD and corresponds to the number of days on which e-waste is removed.

Based on the data on the days of actual accumulation of waste (Tab. 1), five local routes have been developed with a traffic pattern between CP along the shortest paths (the same methodology is used as for the global route). Information about the total length L_{Mz} ($z \in T_D$) and volumes Q_{MWz} of waste removed by each route is presented in Tab. 3.

The volume of transport work of U_{TZ} , t-km, for the removal of e-waste along the z -th number of local routes with a length of L_{Mz} and with the volume of removal Q_{PWz} with the total number N_{MT} cycles of bypassing all routes during the year is determined by the formula

$$U_{TZ} = N_{MT} \sum_{z=1}^m (Q_{PWz} L_{Mz}), \quad z=1, 2, \dots, N_{Mz}. \quad (21)$$

In formula (21), the volume of transport work is defined as the product of the total volume of e-waste that is removed from all CPs of each route by the length of the route, and not as the sum of the products of the volumes removed from individual CPs but by the length of the corresponding sections of the route, since the operation of the vehicle is paid regardless of the degree of filling.

The removal costs S_{TZ} , CU, is calculated on the equation

$$S_{TZ} = U_{TZ} S_T. \quad (22)$$

The volume of transport work for the removal of e-waste along five local routes is $U_{TZ} = 42,549.9$ t-km, and the cost of removal is $S_{TZ} = 316145.76$ USD.

The comparison of the obtained results reveals that the transport costs for servicing the local routes (S_{TZ}) and the global route (S_{TG}) are almost on the same level. Costs for local routes increase by 2285.03 USD (less than 1 %). At the same time, the costs for local routes are 4.5 % less than the costs for servicing sub-routes (S_{TGS})

$$\Delta S_{RTs} = 330226.6 - 316145.76 = 14080.84 \text{ USD}, \quad (23)$$

that indicates the effectiveness of the proposed model of e-waste removal “by the actual filling”.

Table 3

Local route characteristics

Local route							Q_{MWz} , t	L_{Mz} , km
First								
The visiting order of CP	0	1.0	0	–	–	–	1.25	–
The distance to the following point, km	12	12	0	–	–	–	–	24
Second								
The visiting order of CP	0	4	11	5	2	0	5	–
The distance to the following point, km	16.0	2.2	2.5	1.2	13.0	0	–	34.9
Third								
The visiting order of CP	0	9.0	12	13.0	0	–	3.75	–
The distance to the following point, km	17.0	1.8	0.7	20.0	0	–	–	39.5
Fourth								
The visiting order of CP	0	8.0	10.0	6.0	0	–	3.75	–
The distance to the following point, km	17.0	1.2	1.2	18.0	0	–	–	37.4
Fifth								
The visiting order of CP	0	3.0	7.0	0	–	–	2.5	–
The distance to the following point, km	15.0	2	19	0	–	–	–	36
Total number							16.25	171.8

CONCLUSIONS

1. Increasing the efficiency of LSEWM is feasible by increasing the volumes of received e-waste for disposal through official channels, as well as by reducing the cost of collecting and transporting e-waste to special facilities for disposal. The process of disposal of household electronic waste is accompanied by active interaction among public authorities (state and municipal), commercial structures and the population. For high efficiency and safety of the recycling process, such interaction should include procedures for establishing measures for economic incentives for participants in this process, competitive selection of logistics companies to organize the collection and removal of waste, monitoring the volume and quality of services performed.

2. For planning LSEWM, it is necessary to use data on the volumes of household e-waste generation within the boundaries of the respective administrative-territorial regions. For the case when there is no statistical data on such volumes for districts of cities and sections of districts, it is proposed to determine the volumes of generation by calculation using indicators of the intensity of waste generation and the number of people living in the area or on the site. This proposal is based on established dependencies between the pointed indicators.

3. The methodology for planning the removal of household e-waste from the collecting points based on the actual level of filling of their storage capacity provides for the inclusion in the routes for the arrival of vehicles only those points where the accumulated volume of waste has reached the maximum storage volume. The use of the methodology provides a reduction in the cost of transport operation when visiting points with an empty container, and also eliminates situations of refusal to accept waste at overcrowded points.

4. The research results are recommended to be used to improve the organizational and economic mechanisms of the LSEWM, including to adjust the system and structure of participants and the functions they perform, to clarify the powers of the competent state bodies to standardize the costs of collecting and removal of e-waste products.

5. The use of the methodological recommendations presented in the work is supposed to contribute to the achievement of sustainable development goals because of:

- recycling of waste products and minimizing the volume of their disposal;
- increasing recycling rates by creating a convenient infrastructure of the waste collection for the population;
- organizing proper administration and control of spending financial resources on LSEWM;

– reducing the negative impact of waste products on the environment.

REFERENCES

1. Widmer R., Oswald-Krapf H., Sinha-Khetriwal D., Schnellmann M., Böni H. (2005) Global Perspectives on E-Waste. *Environmental Impact Assessment Review*, 25 (5), 436–458. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.04.001>.
2. Ho S. T., Tong D. Y. K., Ahmed E. M., Lee C. T. (2012) Factors Influencing Household Electronic Waste Recycling Intention. *Advanced Materials Research*, 622–623, 1686–1690. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.622-623.1686>.
3. Babu B. R., Parande A. K., Basha C. A. (2007) Electrical and Electronic Waste: A Global Environmental Problem. *Waste Management & Research*, 25, 307–318. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X07076941>.
4. Bartoleto P. (2015) *Waste Prevention Policy and Behaviour, New Approaches to Reducing Waste Generation and Its Environmental Impacts, Routledge Studies in Waste Management and Policy*. Routledge, London.
5. Yoshida A., Terazono A., Florencio Ballesteros Jr. C., Nguyen D. Q., Sunkandar S., Kojima M., Sakata S. (2016) E-Waste Recycling Processes in Indonesia, the Philippines, and Vietnam: A Case Study of Cathode Ray Tube TVs and Monitors. *Resources, Conservation and Recycling*, 106, 48–48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.020>.
6. Chiang T., Che Z. H., Cui Z. (2014) Designing a Multi-stage Supply Chain in Cross-Stage Reverse Logistics Environments: Application of Particle Swarm Optimization Algorithms. *The Scientific World Journal*, 2014, <https://doi.org/10.1155/2014/595902>.
7. Nguyen T. T. H., Larin O. (2022) Improving Organizational and Economic Conditions for E-Waste Logistics Support. *Ekonomika, Predprinimatelstvo i Pravo = Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*, 12 (1), 333–348. <https://doi.org/10.18334/epp.12.1.114117> (in Russian).
8. Manuel V., Miguel A., Natalia K., Guillermo F. (2021) Reverse Logistics for Solid Waste from the Construction Industry. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1–11. (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/6654718>.
9. Nguyen T. V. (2012) Solid Waste Separation at Source: Necessary and Sufficient Condition for Waste Management in Ho Chi Minh. *Int. J. Environ. Sci. Sustain. Dev*, 1, 1–9.
10. *Vietnam Environment Monitor 2004. Solid Waste*. Available at: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/724701468308959503/pdf/331510rev0PAPER0VN0Env0Monitor02004.pdf> (accessed 10 May 2021).
11. Kallel A., Serbaji M. M., Zairi M. (2016) Using GIS-Based tools for the Optimization of Solid Waste Collection and Transport: Case Study of Stax City, Tunisia. *Journal of Engineering*, 10, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2016/4596849>.
12. MacGregor J. N., Chu Y. (2011) Human Performance on the Traveling Salesman and Related Problems: A Review. *The Journal of Problem Solving*, 3, (2), 1–29. <https://doi.org/10.7771/1932-6246.1090>.
13. Korte B., Vygen J. (ed.) (2018) *Combinatorial Optimization. Theory and Algorithms*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56039-6>.
14. Larin O., Tarasov D., Mirotn L., Rublev V., Kapski D. (2021) Resilient Supply Chain Management Model. *SHS Web of Conferences*, 93, 03005. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20219303005>.
15. Brunner P. H., Rechberger H. (2015) Waste to Energy-Key Element For Sustainable Waste Management. *Waste Management*, 37, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.003>.

Received: 16.06.2022

Accepted: 20.09.2022

Published online: 30.11.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-525-534>

УДК 331.101.68

Оценка роли кадрового потенциала в повышении конкурентоспособности промышленных организаций при переходе на «Индустрию 4.0»

Асп. Ху Минцзюнь¹⁾, канд. экон. наук, доц. И. В. Устинович¹⁾

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

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

Реферат. Развитие кадрового потенциала является необходимым условием эффективной деятельности хозяйственного субъекта любого государства и особенно актуально для развивающихся экономик на современном этапе (стремление к переходу на более высокие технологические уклады). В условиях необходимости перехода на «Индустрию 4.0» кадровый потенциал рассматривается как важный источник конкурентного преимущества. Только квалифицированный персонал может сделать организацию конкурентоспособной на основе лояльности рынка, качества продукции и услуг, дифференцированных продуктов и технологических инноваций. Выявлены два направления повышения конкурентоспособности промышленных предприятий. Первое – оценка системы показателей уровня кадрового потенциала при переходе на «Индустрию 4.0». Второе – выявление наиболее существенных факторов оценки уровня кадрового потенциала, оказывающих влияние на повышение уровня конкурентоспособности промышленных организаций. В статье приведен подробный анализ ряда экономических индикаторов, характеризующих интегральный показатель эффективности развития кадрового потенциала и конкурентоспособности промышленной организации. Интегральный показатель лег в основу модели оценки конкурентоспособности промышленных организаций за счет развития кадрового потенциала. Модель состоит из двух частей: развитие кадрового потенциала и повышение уровня конкурентоспособности промышленных организаций. В основе модели – факторы, оказывающие влияние как на качество кадрового потенциала (кадровый состав промышленной организации, количество работников, уровень их дохода, уровень образования, проекты, связанные с развитием кадрового потенциала), так и на его развитие (общий корпоративный доход, доля вознаграждения сотрудников в общем доходе организации, затраты на НИОКР, доля инвестиций в НИОКР в общем доходе организации, объем продаж и производства). Разработанная модель позволит организациям корректировать свои стратегии развития кадрового потенциала (отбор персонала и дальнейшее развитие кадрового потенциала), а также будет способствовать трансформации корпоративных талантов.

Ключевые слова: «Индустрия 4.0», конкурентоспособность, модель оценки, развитие кадрового потенциала, промышленные организации, эффективность

Для цитирования: Ху Минцзюнь. Оценка роли кадрового потенциала в повышении конкурентоспособности промышленных организаций при переходе на «Индустрию 4.0» / Ху Минцзюнь, И. В. Устинович // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 525–534. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-525-534>

Assessment of the Role of Human Resources in Enhancing Competitiveness of Industrial Organizations in the Transition to Industry 4.0

Hu Mingjun¹⁾, I. V. Ustinovich¹⁾

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

Abstract. The human resource development is a necessary condition for effective activity of any state economic entity and is especially relevant for developing economies at the present stage (striving for transition to higher technological modes).

Адрес для переписки
Устинович Ирина Валерьевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-97
ustinovich@bntu.by

Address for correspondence
Ustinovich Irina V.
Belarusian National Technical University
67, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-97
ustinovich@bntu.by

In the conditions of necessity of transition to Industry 4.0 the human resource potential is considered as an important source of competitive advantage. Only qualified personnel can make an organization competitive on the basis of market loyalty, product and service quality, differentiated products and technological innovation. Two directions for increasing the competitiveness of industrial enterprises have been identified. The first is the assessment of the system of indicators of human resource level during the transition to Industry 4.0. The second is to identify the most significant factors in assessing the level of human resources that affect the increase in the level of competitiveness of industrial organizations. The paper provides a detailed analysis of a number of economic indicators that characterize the integral indicator of the effectiveness of the human resources development and competitiveness of an industrial organization. The integral indicator has formed the basis of a model for assessing the competitiveness of industrial organizations through human resource development. The model consists of two parts: human resource development and the increase in the level of competitiveness of industrial organizations. The model is based on the following factors: the quality of human resources (staff composition of an industrial organization, the number of employees, their income level, education level, projects related to human resource development) and its development (total corporate income, share employee remuneration in the total organization income, R&D costs, the share of investment in R&D in the total organization income, sales and production). The developed model will allow organizations to adjust their human resource development strategies (recruitment and further development of human resources), and will also contribute to the transformation of corporate talent.

Keywords: Industry 4.0, competitiveness, assessment model, human resource development, industrial organizations, effectiveness

For citation: Hu Minqjun, Ustsinovich I. V. (2022) Assessment of the Role of Human Resources in Enhancing Competitiveness of Industrial Organizations in the Transition to Industry 4.0. *Science and Technique*. 21 (6), 525–534. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-21-6-525-534> (in Russian)

Введение

В последние годы мир полностью переходит к новой модели развития индустриализации – «Индустрия 4.0», которая позволит промышленности вновь стать двигателем экономического роста за счет полной интеграции информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) непосредственно в производство [1]. Такие страны, как Германия, США, Россия и Китай, приняли различные стратегии и реализовали проекты «Индустрия 4.0», чтобы оцифровать свои продукты и услуги и повысить конкурентоспособность в новую эпоху, причем Германия четко заявила, что инвестирует в инновационные проекты, включая цифровые технологии и обучение сотрудников [2]. Кадровый потенциал играет ключевую роль в формировании нового цифрового пространства «Индустрии 4.0». Тенденции и разработки «Индустрии 4.0» концептуально подразумевают новое направление развития кадрового потенциала, от которого напрямую зависит эффективность функционирования организаций [3].

Модернизация промышленности в рамках «Индустрии 4.0» – это синергетический рост кадрового потенциала и производственных технологий, причем они демонстрируют взаимодополняющие, а не замещающие отношения [4]. Ключевые характеристики кадрового потенциала – образование, опыт и компетен-

ции. «Индустрия 4.0» становится менее требовательной к основным рабочим низкотехнологичных производств и поэтому требует пересмотра влияния традиционных факторов производства на добавленную стоимость для стимулирования инноваций, а также для повышения конкурентоспособности организации [5]. В связи с этим необходимо провести оценку роли кадрового потенциала в повышении конкурентоспособности промышленных организаций при переходе на «Индустрию 4.0». Данная оценка должна базироваться на отличительных особенностях «Индустрии 4.0» и учитывать зарубежный опыт. В 2018 г. был представлен отчет «Глобальная конкурентоспособность 4.0» в ответ на появление «Индустриализации 4.0» и вышел глобальный ежегодный доклад для справки по странам [6].

Основная часть

Переход на новый этап развития науки и техники начинается с развития отдельных, изначально не связанных между собой направлений и областей знаний. Далее эти новые направления и области знаний объединяются в более крупные области, а затем происходят дальнейшие детализация и специализация (табл. 1). Конвергенция технологий делает возможным их взаимопроникновение и усиление эффектов от использования.

Таблица 1

Характеристика промышленных революций
Characteristics of industrial revolutions

Номер	Особенность	Основа	Технологический уклад	Ядро
Первая	Переход от человеческого труда к механическому	Добыча энергии из воды и пара	1	Текстильная машина
			2	Паровой двигатель
Вторая	Массовое производство	Электроэнергия	3	Сталь
			4	Автомобиле- и тракторостроение
Третья	Автоматизация	Электроника и информационные технологии	5	Телекоммуникации
			6	Нанотехнологии
Четвертая	Диджитализация	«Индустрия 4.0»	7	Когнитивные технологии

Как видно из табл. 1, переход на новый уровень прогресса возможен благодаря возникшим и освоенным прорывным технологиям. На современном этапе хозяйствования таким основанием является «Индустрия 4.0». Для характеристики «Индустрии 4.0» были выявлены ее отличительные особенности: совместимость и взаимодействие конечных потребителей в рамках «умных производств»; виртуализация (использование цепей датчиков для имитационного моделирования производственного процесса); децентрализация («умные производства» способны принимать и реализовывать управленческие решения); возможность работы в режиме реального времени (сбор и анализ данных и немедленное предоставление полученных результатов); модульность (гибкая адаптация «умных производств» к изменяющимся требованиям); конвергенция (взаимопроникновение отраслей и сфер); снижение затрат и рост эффективности.

«Индустрия 4.0» предполагает, что бизнес-процессы могут быть интегрированы в цифровую сеть в процессе диджитализации. Цепочки создания стоимости теперь интегрированы с производственными и бизнес-процессами в единую цифровую сеть, которой можно управлять в режиме реального времени, а также моделировать различные производственные задачи и ситуации. Различие между промышленностью и услугами становится размытым. Использование Интернета позволяет системам коммуницировать без участия человека. Информация собирается и обрабатывается на протяжении всего жизненного цикла продукта. Это приводит к оптимизации интеллектуальных, гибких цепочек поставок и моделей распределения, а также к эффективному и оптимизированному использованию машин и оборудо-

вания, что ускоряет процесс принятия решений и снижает затраты.

Влияние технологий «Индустрии 4.0» будет всеобщим и междисциплинарным. Уже сейчас можно отметить следующие тенденции: изменение границ между третичным и промышленным секторами экономики, а также между покупателями и продавцами; изменение роли государственного и частного секторов, а также условий конкуренции. Существующие производственные системы, опосредованные глобальными цепочками создания стоимости, станут более динамичными, гибкими, эффективными и устойчивыми, с большими возможностями настройки и персонализации. В свою очередь, уровень развития кадрового потенциала должен позволять организации использовать инновационные возможности «Индустрии 4.0». Для целей исследования под конкурентоспособностью промышленных организаций мы будем понимать рост прибыльности организации на основе инновационного развития и повышения уровня кадрового потенциала. Прибыльность отражает текущую конкурентоспособность организации на рынке, а инновации и технологии показывают ее будущее конкурентное преимущество. Ранее в исследованиях при выявлении факторов роста конкурентоспособности промышленных организаций основной упор был на ресурсный и производственный потенциал [7–9], однако сейчас необходимо придавать большее значение кадровому потенциалу и развитию компетенций.

Эффективное использование кадрового потенциала напрямую влияет на прибыльную работу и конкурентоспособность промышленных организаций. Ключом к успеху организации является хорошо подобранная команда работников. Успех бизнеса на занимаемой им рыночной нише напрямую связан с его кадровым

потенциалом. Утверждение Е. В. Терелецковой и А. Б. Назаровой подтверждает аксиому о том, что конкурентоспособность промышленных организаций, эффективность их деятельности, лидерство на рынке товаров и услуг зависят от их кадрового потенциала [10]. Формирование конкурентоспособности является также процессом координации, интеграции и развития кадровых возможностей организаций. Стратегические цели организаций и внутренний контроль используются как средство для максимизации мотивации сотрудников [11]. Основываясь на исследованиях А. Н. Козицкой и И. В. Филимонова по вопросам управления кадровым потенциалом [12], мы еще больше расширяем методический инструментарий оценки эффективности развития кадрового потенциала и конкурентоспособности промышленных организаций.

Для целей настоящего исследования проведена апробация на основе данных организации по производству мебели Midea (данные взяты из ее финансовых годовых отчетов за 2017–2020 гг. на официальном сайте). Midea является представительной с точки зрения развития бизнеса, размера организации предприятия и кадрового потенциала, сохраняя сильную динамику роста в «Индустрии 4.0». Во-первых, были проанализированы данные, касающиеся кадрового потенциала компании Midea, включая существующий кадровый потенциал организаций (общий обзор, функциональный анализ, уровень образования сотрудников); во-вторых, ее развитие, основанное на обучении (общий обзор, обучение лидерству, обучение навыкам, обучение новых сотрудников, внутренние встречи организаций, построение системы онлайн-обучения организаций).

Метрики, имеющие отношение к кадровому потенциалу, в основном делятся на следующие категории:

- численность функционального персонала (численность административного персонала, численность производственного персонала, численность маркетингового персонала, численность технического персонала/персонала, занятого НИОКР, численность финансового персонала);
- уровень образования (численность сотрудников со степенью магистра и выше, численность сотрудников со степенью бакалавра, численность сотрудников с профессионально-технической квалификацией);

- общий обзор, связанный с обучением кадров (общее обучение и развитие кадрового потенциала, обучение и развитие управленческого персонала, обучение и развитие технического и маркетингового персонала, обучение и развитие производственного персонала);

- развитие лидерских качеств (количество программ обучения, общая численность кадров резервного управления и совокупное количество учебных часов);

- обучение и развитие навыков (количество проектов по обучению профессиональных талантов, количество участников курсов повышения квалификации и общее количество часов);

- развитие обучения новых сотрудников (количество программ обучения новых сотрудников, количество участников обучения и общее количество часов обучения);

- внутренние сеансы обмена информацией в организации (количество внутренних тренеров, общее количество разработанных курсов);

- корпоративная система онлайн-обучения (время онлайн-обучения).

При этом наиболее распространенный подход к оценке конкурентоспособности промышленных организаций предполагает оценку прибыльности и способов ведения бизнеса. Однако наиболее актуальным было бы использование инноваций и уровня развития технологий в качестве основного критерия оценки конкурентоспособности промышленных организаций. Так, при оценке конкурентоспособности бизнеса авторы статьи рекомендуют учитывать данные, касающиеся деловой активности и инноваций. Поэтому кроме упомянутых выше учитываются и другие метрики: прибыль организации; доля затрат, связанных с оплатой труда, в выручке; объем продаж; объем производства; отношение объема продаж к объему производства; расходы на НИОКР; инвестиции в НИОКР в процентах от операционного дохода. Все параметры оценки уровня конкурентоспособности должны быть изучены в динамике. Указанные выше метрики имеют различную размерность, поэтому предложенный авторский методический подход к их оценке основан на использовании метода линейного нормирования, предполагающего расчет среднеарифметического значения показателя за ряд лет и последующее его сравнение с прошлогодними данными. Разработан-

ный методический подход позволит оценить влияние факторов, непосредственно связанных с уровнем кадрового потенциала, на конкурентоспособность промышленных организаций. Такой подход предполагает возможность расчета интегрального показателя на основе среднего арифметического из отдельных показателей, а также учет изменения каждого показателя в отдельности и внесение соответствующих корректив:

$$y_e = \frac{x_n}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k} (e=1, 2, 3, \dots, q, q+1, q+2, \dots, q+r);$$

$$a = \frac{1}{q+r} \sum_{e=1}^{q+r} y_e;$$

$$b = \frac{1}{q} \sum_{e=1}^q y_e;$$

$$c = \frac{1}{r-q} \sum_{e=q+1}^r y_{q+1},$$

где a – интегральный показатель конкурентоспособности промышленных организаций, основанный на развитии кадрового потенциала; b – интегральный показатель, характеризующий уровень кадрового потенциала; c – интегральный показатель, учитывающий и иные факторы, также оказывающие влияние на конкурентоспособность промышленной организации; n – количество лет, участвующих в расчете; x_n – уровень показателей в n -м году, ед.; q – количество показателей, относящихся к кадровому потенциалу, ед.; r – общее количество показателей, ед.

В табл. 2 приведено объяснение значения каждой формулы и стратегии корректировки, которая должна быть принята в данном случае.

Таблица 2

Достигнутый уровень показателя и стратегии корректировки

Achieved indicator level and adjustment strategies

Формула	Значение	Стратегия
$a > 1,0 + i$	Представляет собой повышение конкурентоспособности организации на основе развития кадрового потенциала по сравнению с уровнем предыдущего года	На этом этапе конкурентоспособность промышленных организаций нуждается в дальнейшем прорыве через воспитание чувства инновационности у сотрудников и стимулирование инноваций в кадровом потенциале, включая инновации навыков, инновации продуктов и инновации услуг
$1,0 \leq a \leq 1,0 + i$	Конкурентоспособность организации, основанная на развитии человеческого потенциала, ограничена	Адаптировать стратегию развития кадрового потенциала организации к внутренней и внешней среде, чтобы стимулировать и мотивировать дальнейшее развитие кадрового потенциала
$a < 1,0$	Свидетельствует о снижении конкурентоспособности организации, основанной на уровне кадрового потенциала, по сравнению с уровнем предыдущего года	Повышать эффективность использования кадрового потенциала, включая совершенствование профессиональных навыков и закрепление базового образования
$b \cong c$	Потенциал развития человеческих ресурсов эффективно и полностью используется, что соответствует конкурентоспособности промышленных организаций	Продолжать развивать кадровый потенциал в соответствии с текущей стратегией развития кадрового потенциала. Развитие кадрового потенциала этой промышленной организации является образцовым для отрасли
$b > c$	Свидетельствует о том, что организация придает большое значение развитию кадрового потенциала, но не в полной мере воздействует на другие параметры, связанные с ее конкурентоспособностью	Промышленные организации должны изучить трансформацию результатов развития кадрового потенциала в организации в организационную производительность и организационную конкурентоспособность
$b < c$	Указывает на то, что организация повысила конкурентоспособность за счет иных факторов, но не уделяет внимания развитию кадрового потенциала, поэтому дальнейшее повышение конкурентоспособности промышленных организаций ограничено	При сохранении развития других аспектов промышленной организации разрабатывается соответствующая организации стратегия развития кадрового потенциала, чтобы полностью использовать его для роста конкурентоспособности организации

Уровень интегрального показателя конкурентоспособности промышленных организаций a может указывать на: повышение конкурентоспособности промышленных организаций на основе развития кадрового потенциала; ограниченный рост конкурентоспособности промышленных организаций на основе развития кадрового потенциала; снижение конкурентоспособности промышленных организаций. При оценке возможных достигнутых значений интегральных показателей a , b , c учитывается фактор годового уровня инфляции i , что позво-

ляет нивелировать роль последней в росте показателей.

Таким образом, провели сравнительный анализ с целью выявления достаточного уровня развития кадрового потенциала промышленных организаций, разделив данные на две части (табл. 3, части 1, 2). Сравнивали интегральный показатель b (табл. 3, часть 1), относящийся к развитию кадрового потенциала, с интегральным показателем c (табл. 3, часть 2), характеризующим конкурентоспособность промышленных организаций.

Таблица 3

Расчет интегральных показателей эффективности развития кадрового потенциала и конкурентоспособности промышленной организации
Calculation of integral indicators of human resource development effectiveness and competitiveness of industrial organization

Параметр	Индикатор	Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	Среднее	2020 г./Среднее
Профиль сотрудников организации	Общий обзор	Численность сотрудников, чел.	101826	114765	134897	149239	125182	1,19
		Численность вышедших на пенсию работников, чел.	1660	1913	2280	2369	2056	1,15
		Общий фонд заработной платы сотрудников, тыс. юаней	5247,5	5788,1	6436,1	6954,8	6106,6	1,14
	Классификация персонала	Численность административного персонала, чел.	856	861	1,395	1,696	1,202	1,41
		Численность производственного персонала, чел.	84889	96149	110568	121579	103296	1,18
		Численность маркетингового персонала, чел.	4250	4106	7424	8063	5961	1,35
		Численность технического персонала / персонала НИОКР, чел.	10520	12321	13727	16071	13160	1,22
		Численность финансового персонала, чел.	1311	1328	1783	1830	1563	1,17
	Уровень образования	Численность сотрудников со степенью магистра или выше, чел.	2901	3750	4422	5491	4141	1,33
		Численность сотрудников со степенью бакалавра, чел.	18605	21708	26867	27770	23738	1,17
		Численность сотрудников с профессионально-технической квалификацией, чел.	44990	46793	51855	59393	50758	1,17
		Другие, чел.	35330	42514	51753	56585	46546	1,22
Развитие обучения сотрудников	Общий обзор	Общая численность участников тренинга, чел.	620039	571476	637007	5448046	1819142	2,99
		Численность участников обучения менеджеров, чел.	45989	14641	27411	27467	28877	0,95
		Общая численность участников обучения технического и маркетингового персонала, чел.	252361	166017	283869	223342	733917	3,04
		Численность участников обучения производственного персонала, чел.	321689	173404	325727	3187159	1001995	3,18

Окончание табл. 3
The End of Table 3

Параметр	Индикатор	Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	Среднее	2020 г./Среднее
Развитие обучения сотрудников	Развитие лидерских качеств	Программа развития персонала, ед.	46	48	53	55	51	1,09
		Численность управленческого персонала, находящегося в резерве, чел.	2627	3386	2916	3205	3034	1,06
		Кумулятивное время обучения, ч	81,263	41,416	54,288	68,160	61,282	1,11
	Обучение персонала навыкам	Проекты профессионального развития, ед.	76	603	817	809	576	1,40
		Численность участников курсов повышения квалификации, чел.	18767	301871	344920	326282	247960	1,32
		Кумулятивное время обучения, ч	93,135	1,970,508,95	2,862,836,50	2,609,472	1,883,988	1,39
	Обучение новых сотрудников	Программы обучения, ед.	–	61	72	63	65	0,96
		Численность участников курсов, чел.	–	8025	10310	9647	9327	1,03
		Кумулятивное время обучения, ч	–	200,092	273,922	256,733	243,582	1,05
	Внутренние сессии по обмену опытом	Количество штатных лекторов, чел.	461	744	1604	2,492	1,325	1,88
		Совокупное количество разработанных курсов, ед.	515	829	920	852	779	1,09
	Корпоративная платформа онлайн-обучения	Посещаемость онлайн-обучения, чел.	12,000	18,000	54,965	110,728	48,923	2,26
Интегральный показатель (b), часть 1								1,44
Факторы, также оказывающие влияние на конкурентоспособность промышленной организации	Общий корпоративный доход, тыс. юаней	240712,3	259664,8	278216,0	284221,2	265703,5	1,07	
	Доля вознаграждения сотрудников в общем доходе организации, %	2,18	2,23	2,31	2,45	2,29	1,07	
	Затраты на НИОКР, тыс. юаней	8,478,2	9,810,8	9,638,1	10118,6	9,511,4	1,06	
	Доля инвестиций в НИОКР в общем доходе организации, %	3,52	3,23	3,46	3,56	3,44	1,03	
	Объем продаж, в 10000 ед.	40802	41693	45668	50759	44731	1,13	
	Объем производства, в 10000 ед.	42074	42194	46506	51099	45468	1,12	
	Отношение объема продаж к объему производства, %	96,98	98,81	98,20	99,34	98,33	1,01	
Интегральный показатель (с), часть 2								1,07
Интегральный показатель (а), части 1, 2								1,26
Источник – разработка авторов на основе [13].								

В табл. 3 показаны соответствующие данные промышленной организации KHP Midea за четыре года (с 2017 по 2020 г.), а также среднее значение, единые показатели и интегральный показатель $c = 1,26$, рассчитанные на основе данных за эти годы. Инфляция в Китае в 2020 г. составила 2,5 %. Поэтому можно предвари-

тельно определить, что конкурентоспособность промышленных организаций на основе развития кадрового потенциала повышается. Этот подход может быть использован для оценки других промышленных организаций.

Следует отметить, что данная промышленная организация уделяет особое внимание обу-

чению младшего персонала (включая производственный, маркетинговый и технический). Интегральные показатели для «Общей численности участников обучения технического и маркетингового персонала» и «Численности участников обучения производственного персонала» превысили 3 для каждого. Постоянное совершенствование функций платформ онлайн-обучения также способствовало значительному увеличению числа людей, участвующих в нем. В то же время, когда конкурентоспособность промышленных организаций, основанная на развитии кадрового потенциала, находится на подъеме, нельзя игнорировать данные, для которых единые показатели меньше 1, – такие как «Численность участников обучения менеджеров, чел.» и «Программы обучения, ед.», которые в последние четыре года развиваются медленно. Нетрудно найти соответ-

ствующую зависимость в табл. 3. Во-первых, после обучения персонала в организации эффект обучения незначителен, т. е. результаты обучения не могут быть в полной мере отражены в производственной деятельности, поэтому значения интегральных показателей «Объем производства» и «Объем продаж» значительно меньше, чем значение интегрального показателя «Численность технического и маркетингового персонала». Во-вторых, отсутствуют подготовка управленческого персонала и лидерские качества и способность принятия решений им, что также приводит к отклонениям в общем планировании и руководстве организациями.

Для нивелирования этих факторов предлагается модель оценки на основе эффективности развития кадрового потенциала и конкурентоспособности промышленных организаций (рис. 1).

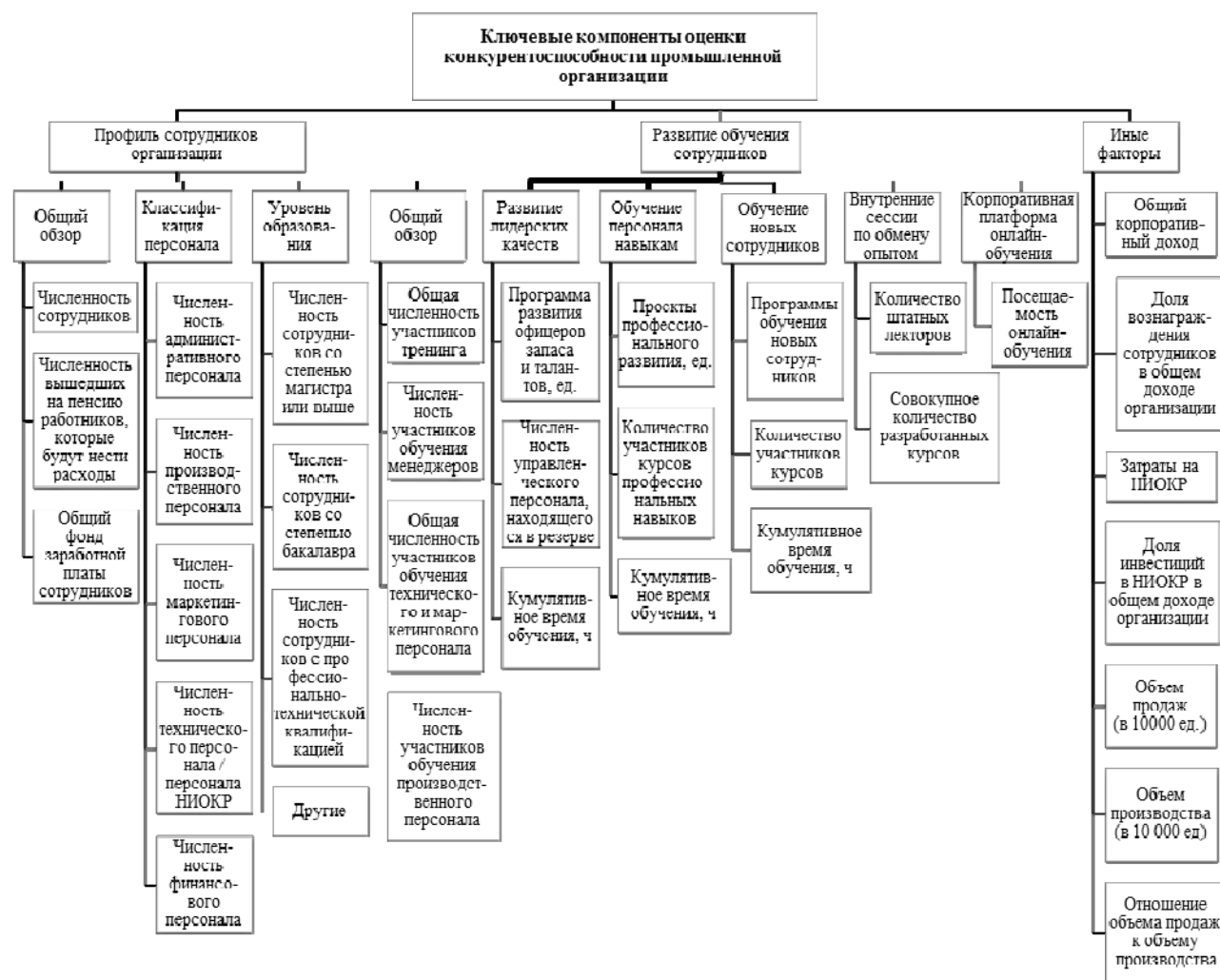


Рис. 1. Модель оценки конкурентоспособности промышленной организации на основе развития кадрового потенциала

Fig. 1. Model for assessing competitiveness of industrial organization based on human resource development

В основе модели лежат следующие компоненты оценки: профиль сотрудников организации, развитие обучения сотрудников, общие сведения об организации. Воздействие на данные факторы должно повысить конкурентоспособность промышленных организаций при переходе на «Индустрию 4.0». В этом случае уровень развития кадрового потенциала будет иметь определяющую роль при выборе стратегии дальнейшего развития организации.

ВЫВОД

Описываются отличительные особенности «Индустрии 4.0», учет которых выявляет определяющую роль уровня развития кадрового потенциала при выборе стратегии дальнейшего развития. В то же время анализируются соответствующие данные для выяснения взаимосвязи между уровнем кадрового потенциала и конкурентоспособностью промышленных организаций. Показатели оценки конкурентоспособности промышленных организаций при переходе на «Индустрию 4.0» делятся на те, что основаны на кадровом потенциале, и иные факторы, оказывающие влияние на конкурентоспособность промышленных организаций. Авторский методический подход к оценке конкурентоспособности промышленных организаций подразумевает расчет интегральных показателей, интерпретацию возможных достигнутых уровней этих показателей и описание стратегии корректировки. Уровень интегрального показателя конкурентоспособности промышленных организаций может указывать на: повышение конкурентоспособности промышленных организаций на основе развития кадрового потенциала; ограниченный рост конкурентоспособности промышленных организаций на основе развития кадрового потенциала; снижение конкурентоспособности промышленных организаций. Использование такого методического подхода предполагает различные пути повышения конкурентоспособности промышленных организаций. Он применим независимо от уровня развития кадрового потенциала промышленной организации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толкачев, С. А. Киберфизические компоненты повышения конкурентоспособности обрабатывающих отраслей промышленности / С. А. Толкачев // *Экономическое возрождение России*. 2019. Т. 61, № 3. С. 127–145.
2. Плакиткин, Ю. А. Мировой инновационный проект «Индустрия 4.0» – возможности применения в угольной отрасли России. 1. Программа «Индустрия-4.0» – новые подходы и решения / Ю. А. Плакиткин, Л. С. Плакиткина // *Уголь*. 2017. № 10. С. 44–50.
3. «Индустрия 4.0»: развитие человеческого капитала / С. А. Хубулова [и др.] // *Социально-гуманитарные знания*. 2018. № 12. С. 196–202.
4. Максимова, Т. Г. Повышение ценности человеческого капитала как ключевого принципа управления сотрудниками инновационных компаний / Т. Г. Максимова, Чжан Минь // *Общество: политика, экономика, право*. 2022. Т. 108, № 7. С. 26–32.
5. Дасив, А. Ф. Моделирование оценки уровня смарт-индустриализации / А. Ф. Дасив, А. А. Мадых, А. А. Охтеня // *Экономика промышленности*. 2019. Т. 86, № 2. С. 107–125.
6. The Global Competitiveness Report 2017–2018 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.weforum.org/reports/the-global-competitiveness-report-2017-2018/>. Date of access: 26.04.2022.
7. Фасхиев, Х. А. Оценка и управление уровнем конкурентного потенциала организации [Электронный ресурс] / Х. А. Фасхиев // *Концепт*. 2017. Т. 39. Режим доступа: <https://e-koncept.ru/2017/970552.htm>. Дата доступа: 30.09.2022.
8. Суворов, А. И. Понятие конкурентоспособности предприятия [Электронный ресурс] / А. И. Суворов, Б. Ф. Фомин // *HR-portal*. 2005. Режим доступа: <http://www.hr-portal.ru/node/20503>. Дата доступа: 30.09.2022.
9. Фатхутдинов, Р. А. Методика разработки и реализации стратегии повышения конкурентоспособности организации / Р. А. Фатхутдинов [Электронный ресурс] // *Современная конкуренция*. 2011. № 3. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-razrabotki-i-realizatsii-strategii-povysheniya-konkurentosposobnosti-organizatsii>.
10. Терелецкова, Е. В. Роль кадрового потенциала в обеспечении конкурентоспособности организации / Е. В. Терелецкова, А. Б. Назарова // *Экономика и бизнес: теория и практика*. Уфа, 2021. С. 212–214.
11. Wang, Ying. How Manager-Employee LTO Similarity and Employee CQ Influence the Link of Their HR Perceptions / Ying Wang, K. Sanders, A. Rafferty // *Proceedings*. 2017. Vol. 2017, No 1. <https://doi.org/10.5465/AMBPP.2017.11555abstract>.
12. Козицина, А. Н. Стратегическая взаимосвязь инновационного развития и управления кадровым потенциалом региона [Электронный ресурс] / А. Н. Козицина, И. В. Филимоненко // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2015. №1. С. 171–181.

13. Financial Reports [Electronic Resource] / Midea Group. Mode of access: <https://www.midea-group.com/investors/financial-reports>.

Поступила 19.05.2022

Подписана в печать 10.10.2022

Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Tolkachev S. A. (2019) Cyber-Physical Components of Increasing the Competitiveness of the Manufacturing Industries. *Ekonomicheskoye Vozrozhdenie Rossii = Economic Revival of Russia*, 61 (3), 127–145 (in Russian).
2. Plakitkin Yu. A., Plakitkina L. C. (2017) The Global Innovation Project Industry 4.0 – the Possibility of Application in the Coal Industry in Russia. 1. Industry-4.0 Program – New Approaches and Solutions. *Ugol' = Russian Coal Journal*, (10), 44–50 (in Russian).
3. Khubulova S. A., Khubulova V. V., Zavarin I. O., Moskalik S. A. (2018) Industry 4.0: Development of Human Capital. *Sotsialno-Gumanitarnye Znaniya [Social and Humanitarian Knowledge]*, (12), 196–202 (in Russian).
4. Maximova T. G., Min Zhang (2022) Raising the Value of Human Capital as a Key Principle of Managing Employees of Innovative Companies. *Obshchestvo: Politika, Ekonomika, Pravo = Society: Politics, Economics, Law*, 108 (7), 26–32 (in Russian).
5. Dasiv A. F., Madykh A. A., Okhten A. A. (2019) Modeling the Assessment of the Level of Smart Industrialization. *Ekonomika Promyshlennosti = Russian Journal of Industrial Economics*, 86 (2), 107–125 (in Russian).
6. *Global Competitiveness Report 2017–2018*. Available at: <https://www.weforum.org/reports/the-global-competitiveness-report-2017-2018/> (accessed 26 April 2022).
7. Faskhiev Kh. A. (2017) Assessment and Management of the Level of Competitive Potential of the Organization. *Kontsept = Concept*, 39. Available at: <https://e-koncept.ru/2017/970552.htm> (accessed 30 September 2022) (in Russian).
8. Suvorov A. I., Fomin B. F. (2005) The Concept of Enterprise Competitiveness. *HR-portal*. Available at: <http://www.hr-portal.ru/node/20503> (accessed 30 September 2022) (in Russian).
9. Fatkhutdinov R. (2011) Method of Development and Implementation of the Strategy of Improvement of the Organization Competitiveness [Electronic Resource]. *Sovremennaya Konkurenciya = Modern Competition*, 3, 113–143. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-razrabotki-i-realizatsii-strategii-povysheniya-konkurentosposobnosti-organizatsii>.
10. Tereletska E. V., Nazarova A. B. (2021) The Role of Human Resources in Ensuring the Competitiveness of the Organization. *Ekonomika i Biznes: Teoriya i Praktika [Economics and Business: Theory and Practice]*. Ufa, 212–214 (in Russian).
11. Wang Ying, Sanders K., Rafferty A. (2017) How Manager-Employee LTO Similarity and Employee CQ Influence the Link of Their HR Perceptions. *Proceedings*, 2017 (1). <https://doi.org/10.5465/AMBPP.2017.11555ab> stract.
12. Kozitsina A. N., Filimonenko I. V. (2015) Strategic Interconnection of Innovative Development and Management of Human Resources in the Region. *Ekonomicheskie i Sotsialnye Peremeny: Fakty, Tendentsii, Prognoz = Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, (1), 171–181 (in Russian).
13. Financial Reports [Electronic Resource]. *Midea Group*. Available at: <https://www.midea-group.com/investors/financial-reports>.

Received: 19.05.2022

Accepted: 10.10.2022

Published online: 30.11.2022

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

ГЕОДЕЗИЯ И РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Петровский Б. И., Поляков А. Л., Мисников В. А., Шафиков М. Г.** Слойная выемка Третьего калийного пласта с уменьшенной мощностью межслойной потолочины 6

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Вахрушев А. В., Федотов А. Ю., Леконцев А. Т.** Моделирование процессов деформирования и разрушения нанокompозитов Al/Cu 1
- Gorbunov A. V., Gorbunova V. A., Devoino O. G., Petraconi Filho G., Halinowski A. A.** Evaluation of Evaporative Degradation of Arc Torch Cathodes in Hydrocarbon-Containing Plasmas for Spraying, Thermal Protection Testing and Related Technologies
(**Горбунов А. В., Горбунова В. А., Девойно О. Г., Петраconi-фильо Ж., Галиновский А. А.** Оценка испарительной деградации катодов плазмотронов с C_xH_y -содержащими плазмами для напыления, тестирования теплозащиты и смежных технологий) 3
- Ермакова В. А., Гасперович Е. В., Ермаков А. И., Литвяк В. В.** Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA 2
- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Switala F.** Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Croll
(**Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Асташинский В. М., Свитала Ф.** Многослойные композиционные плазменные покрытия на основе оксидной керамики и м-кролей) 2
- Пумпур В. А., Анисович А. Г., Барановский К. Э., Дувалов П. Ю., Андриенко В. М.** О применении внутренних источников теплоотвода при получении отливок из износостойких хромистых чугунов 6
- Шелег В. К., Романович А. С., Конопляник И. А.** Мониторинг поломок резцов исполнительного органа горного комбайна по параметрам механических колебаний. Часть 1. Методика исследований 1
- Шелег В. К., Романович А. С., Конопляник И. А.** Мониторинг поломок резцов исполнительного органа горного комбайна по параметрам механических колебаний. Часть 2. Методика создания системы мобильного мониторинга поломок резцов по параметрам механических колебаний редуктора с собственной частотой 2

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- Багдюн А. А., Соломахо В. Л.** Методы и технические средства обеспечения единства измерений размера наночастиц 6
- Гундина М. А., Жданович М. Н.** Автоматическая локализация номерного знака автомобиля в системе Wolfram Mathematica 5
- Козерук А. С., Филонова М. И., Кузнецик В. О., Шевченко В. П., Якубович Т. С.** Прогрессивная технология обработки оптических деталей 5

СТРОИТЕЛЬСТВО

Батяновский Э. И., Гуриненко Н. С., Корсун А. М. Структура, непроницаемость и долговечность цементного бетона	1
Босаков С. В. К уточнению решения о действии сосредоточенной силы на упругое четвертьпространство при произвольном коэффициенте Пуассона	3
Вербицкая О. Л., Шевчук Л. И. Оптимизация прямоугольных шарнирно опертых железобетонных гладких и ребристых плит методом сокращения ресурсов	2
Гуринович В. Ю. Комплексное исследование развития индустриального домостроения	5
Давыдов Е. Ю. Анализ нормативных документов по определению нагрузок на здания и сооружения	5
Зафатаев В. А., Королёва Т. И. Термодинамические режимы рекуперативного теплообменника-утилизатора в приточно-вытяжной вентиляционной установке малой производительности	4
Зафатаев В. А., Ланкович С. В., Королёва Т. И., Нияковский А. М. Оценка эффективности энергосберегающей системы организованной приточно-вытяжной вентиляции для многоэтажных зданий с низким уровнем тепловой защиты	2
Зиневич С. И., Каюмов А. К. Плиты для сборных дорожных покрытий с наименьшим «клавишным» эффектом	3
Зиневич С. И., Каюмов А. К., Ковалев Д. М. Использование цементогранулята в дорожном строительстве	2
Каюмов А. К., Зиневич С. И., Ковалев Я. Н. Основания дорожных одежд из вторичных материалов	6
Козунова О. В. Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании. Часть 1. Теория расчета	3
Козунова О. В. Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании. Часть 2. Результаты расчета	4
Leonovich S. N., Sadovskaya E. A. Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement (Леонович С. Н., Садовская Е. А. Наноприбобетон: многоуровневое армирование)	5
Леонович С. Н., Шалый Е. Е., Литвиновский Д. А., Степанова А. В. Долговечность бетона при комбинированном воздействии окружающей среды и механической нагрузки: анализ экспериментальных исследований	4
Медведева Ю. А., Ивашечкин В. В., Сацута Е. С. Расчет параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из скважин.	4
Мирзаев П. Т., Шамансурова З. П. Железобетонные стойки стенового безопалубочного формирования для опор воздушных линий 0,4–10 кВ	4
Михневич Э. И., Ли Цзэмин. Методика расчета подачи воды на орошение из водохранилищ многофункционального назначения (на примере Китая и Беларуси)	6
Молодин В. В., Леонович С. Н. Сцепление бетона восстановления с коррозионно-деструктурированной железобетонной конструкцией	1
Моргунов К. П., Колосов М. А. Проблемы разжижения грунтов в основаниях гидротехнических сооружений	3
Prokhorov V. I., Troyanchuk S. V., Razakov M. A. Particularities of Exergy Analysis in Air Conditioning Systems (Прохоров В. И., Троянчук С. В., Разаков М. А. Особенности эксергетического анализа в системах кондиционирования воздуха)	1
Садовская Е. А., Леонович С. Н. Оптимизация состава наноприбобетона по вязкости разрушения модификацией матрицы	6
Sakanov D., Saginov Z., Mominova S., Ussenkulov Z., Kwang-don Kim. Behavioral Characteristics of Cement Concrete Pavements in South Kazakhstan: Climatic Changes and Optimal Construction Method (Саканов Д., Сагинов З., Моминова С., Уссенкулов Ж., Ким Кванг-дон Ким. Поведенческие характеристики цементобетонных покрытий в Южном Казахстане: климатические изменения и оптимальный метод строительства)	2

Самуйлов Ю. Д., Трепачко В. М., Батыновский Э. И. 3D-бетонирование – составы, методики и свойства смесей	5
Сизов В. Д., Павловская А. В. Эффективная многослойная стеновая панель	5
Смирнов И. Р. Комплексные добавки к бетону на основе веществ органической и минеральной природы	1
Khroustalev V. M., Liu Tinguo, Aliakseyeu Yu. H., Li Zhongyu, Akeliev V. D., Minchenya V. T. Thermodynamic Aspects of Pavement Engineering (Хрусталеv Б. М., Лю Тингуо, Алексеев Ю. Г., Ли Чжунъюй, Акельев В. Д., Минченя В. Т. Термодинамические аспекты дорожных одежд)	1
Черноиван В. Н., Черноиван Н. В., Торхова А. В. Предложения по реабилитации эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель	1
Черноиван В. Н., Черноиван Н. В. Тепловая реабилитация фасадов эксплуатируемых панельных зданий	6
Zhang Qing, Romaniuk V. N., Aliakseyeu Yu. G., Hou Qiang. Thermodynamic Approaches in Assessing Quality, Efficiency and Environmental Friendliness of Asphalt Concrete (Чжан Цин, Романиук В. Н., Алексеев Ю. Г., Хоу Цян. Термодинамические подходы при оценке качества, эффективности и экологичности асфальтобетона)	6

ТРАНСПОРТ

Капский Д. В., Кузьменко В. Н., Красильникова А. С., Семченков С. С., Кот Е. Н., Ларин О. Н. Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полтаве и Новополюцке	2
Kapaskiy D. V., Larin O. N., Nguyen Thi Thu Huong, Khmel'nitskaya L. V. Organization of Logistics Operations for Transportation of Household Electronic Waste in Cities (Капский Д. В., Ларин О. Н., Нгуен Тхи Тху Хыонг, Хмельницкая Л. В. Организация логистических операций при перевозке электронных бытовых отходов в городах)	6
Капский Д. В., Семченков С. С., Ларин О. Н. Повышение эффективности применения информации при организации перевозок пассажиров в городах	4
Леонтьев Д. Н., Богомоллов В. А., Клименко В. И., Рыжих Л. А., Ломака С. И., Сухомлин А. В., Курипка А. В., Фролов А. А. О торможении колесного транспортного средства, оборудованного автоматизированной системой регулирования тормозного усилия	1
Серебряков И. А. Разработка метода оптимизации алгоритмов диагностирования двигателей автомобилей	4
Chepeleva T. I., Chepelev A. N. Statistical Analysis of Industrial Processes (Чепелева Т. И., Чепелев А. Н. Статистический анализ производственных процессов)	2

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Гундина М. А., Юхновская О. В. Применение соотношений теории течения для решения задач установившегося роста трещины	3
Мелешко И. Н., Ласый П. Г. Об одной вариационной задаче, приводящей к бигармоническому уравнению, и о приближенном решении основной краевой задачи для этого уравнения	3
Невдах В. В. Электромагнитные волны в теории Максвелла	3

ЭНЕРГЕТИКА

Пехота А. Н. Исследование энергетических характеристик многокомпонентного твердого топлива с использованием некондиционных горючих коммунальных и производственных отходов	2
Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В. Повышение устойчивости функционирования измерительных органов тока микропроцессорных защит	5

Хрусталева Б. М., Пехота А. Н., Вострова Р. Н., Пехота Е. А. Технология производства MSF-топлива – направление, обеспечивающее переход к циркулярной экономике	4
--	---

ЭКОНОМИКА ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ивуть Р. Б., Зиневич А. С. Экономические основы развития логистики международных автомобильных перевозок грузов в Республике Беларусь в условиях пандемии коронавируса	3
Ивуть Р. Б., Попов П. В., Лапковская П. И., Меркулова О. П. Методическое обеспечение оценки уровня развития логистической инфраструктуры	5
Ивуть Р. Б., Царенкова И. М. Формирование логистического подхода к экономическому развитию дорожного хозяйства Республики Беларусь	1
Киселёва Н. А. Особенности функционирования малого и среднего предпринимательства на современном этапе экономического развития	5
Малайчук О. А. Экспертная составляющая как элемент контент-стратегии промышленного предприятия	3
Манцеров Т. Ф., Нго Ань Туэт. Структура и организация регионального кластера возобновляемых источников энергии во Вьетнаме	1
Ху Минцзюнь, Устинович И. В. Оценка роли кадрового потенциала в повышении конкурентоспособности промышленных организаций при переходе на «Индустрию 4.0»	6
Салтанова И. В., Седнина М. А. Методология прогнозирования обеспеченности кадрами в Комплексном прогнозе научно-технического прогресса и направления ее совершенствования	3
Синютич К. В. Развитие систем оплаты проезда на общественном транспорте в Республике Беларусь	4
Солодовников С. Ю., Сергеевич Т. В. Направления совершенствования бизнес-моделей промышленных предприятий в Республике Беларусь в условиях цифровизации	5