

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал



Science and Technique

International
Scientific and Technical Journal

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

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет

Vol. 20 / No 3 / 2021

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

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

Строительство

- Polonina E. N., Leonovich S. N.,
Khroustalev B. M., Sadovskaya E. A.,
Budrevich N. A.**
Cement-Based Materials Modified
with Nanoscale Additives
(Полонина Е. Н., Леонович С. Н.,
Хрусталеv Б. М., Садовская Е. А.,
Будревич Н. А.)
Материалы на основе цемента,
модифицированные наноразмерными
добавками) 189
- Романюк В. Н., Нияковский А. М., Чичко А. Н.,
Яцкевич Ю. В.**
Разработка энергоэффективных режимов
установок для тепловой обработки
бетонных изделий с использованием
численных методов расчета 195

CONTENTS

Civil and Industrial Engineering

- Polonina E. N., Leonovich S. N.,
Khroustalev B. M., Sadovskaya E. A.,
Budrevich N. A.**
Cement-Based Materials Modified
with Nanoscale Additives 189
- Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Chichko A. N.,
Yatskevich Yu. V.**
Development of Energy-Efficient Modes
of Installations for Heat Treatment
of Concrete Products Using
Numerical Calculation Methods 195

Ковшар С. Н., Рябчиков П. В., Гущин С. В. Оценка термонапряженного состояния бетонного массива	207
Буртыль Ю. В., Солодкая М. Г., Ковалев Я. Н. Прогнозирование ровности дорожных покрытий	216

Транспорт

Капский Д. В., Кот Е. Н., Богданович С. В., Рыбинский А. Г., Ибраев К. Анализ условий размещения на дорогах и характеристик железнодорожных переездов Республики Казахстан	224
Суходоев В. Н. Рельсовый путь с обжатием рельса	234
Choromański W., Grabarek I., Kozłowski M., Czerepicki A. Innovative Urban Transport System – Autonomous and Locally Low-Emission (Хороманьский В., Грабарек И., Козловский М., Черепицкий А.) Инновационная автономная система городского транспорта с низким уровнем локального загрязнения окружающей среды) ...	243

Энергетика

Седнин В. А., Бубыр Т. В. Исследование теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс. Часть 2	248
--	-----

Механика деформируемого твёрдого тела

Сивцев Н. С., Тарасов В. В. Численное исследование напряженно- деформированного состояния заготовки в контактной задаче поверхностного дорнования отверстий	259
Сукач М. К. Методика инженерного расчета скобовидных пластинчатых рессор	268

Kovshar S. N., Ryabchikov P. V., Gushchin S. V. Assessment of Thermally Stressed State of Concrete Massif	207
Burtyl Yu. V., Salodkaya M. G., Kovalev Ya. N. Predicting the Evenness of Road Surfaces	216

Transport

Kapshiy D. V., Kot E. N., Bogdanovich S. V., Rybinskiy A. G., Ibrayev K. Analysis of Placement Conditions on Roads and Characteristics of Railway Crossings in the Republic of Kazakhstan	224
Sukhodoev V. N. Rail Track with Rail Compression.	234
Choromański W., Grabarek I., Kozłowski M., Czerepicki A. Innovative Urban Transport System – Autonomous and Locally Low-Emission	243

Power Engineering

Sednin V. A., Buby T. V. Heat Transfer Research in Blown-Through Non-Passable Heating Mains Channels. Part 2	248
--	-----

Deformation in Solid Mechanics

Sivtsev N. S., Tarasov V. V. Numerical Study of Stress- Strain State of Workpiece in Contact Problem of Surface Mandrel Drilling	259
Sukach M. K. The Staple-Shape Plate Springs Engineering Calculation Method	268

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 «Гаоюань», 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),
- Опеляк М.** (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
- Пенязьков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

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

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

Ответственный секретарь редакционной коллегии
В. Г. Горбаш

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

Executive Secretary of Editorial Board
V. G. Gorbash

Ведущий стилистический редактор

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

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

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.
Регистрационный номер 285

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

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 31.05.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,75. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2021

Leading Style Editor

V. N. Guryanchyk

Address

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

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194>

UDC 624.012.4

Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives

E. N. Polonina¹⁾, S. N. Leonovich¹⁾, B. M. Khroustalev¹⁾, E. A. Sadovskaya¹⁾, N. A. Budrevich¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. The most common and reliable material without which modern construction is indispensable is concrete. The development of construction production is pushing for new solutions to improve the quality of concrete mix and concrete. The most demanded and significant indicators of a concrete mixture are the compressive strength and mobility of the concrete mixture. Every year, the volume of research on nanomaterials as modifying components of concrete is significantly increasing, and the results indicate the prospects for their use. Nanoparticles with a large specific surface are distinguished by chemical activity, can accelerate hydration and increase strength characteristics due to nucleation and subsequent formation of C–S–H and compaction of the material microstructure. Sol of nanosilica, which can be used instead of microsilica from industrial enterprises, and carbon nanomaterial have a wide reproduction base. This paper presents studies of these types of nanomaterials and the results of their application in cement concrete. Studies have shown that the effect is also observed with the introduction of an additive containing only one type of nanoparticles. The dependence of the obtained characteristics of cement concretes on the content of these nanomaterials has been established. It has been found that the best results were obtained with an additive in which the above-mentioned nanomaterials were used together. Compressive strength of heavy concrete samples, improved by the complex nanodispersed system, was 78.7 MPa, which exceeds the strength of the sample containing the CNT additive in a pair with a super-plasticizer by 37 %. The paper proposes the mechanism for action of the presented complex additive.

Keywords: water sol of nanosilica, carbon nanotubes, super-plasticizer, heavy concrete, strength

For citation: Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Sadovskaya E. A., Budrevich N. A. (2021) Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives. *Science and Technique*. 20 (3), 189–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194>

Материалы на основе цемента, модифицированные наноразмерными добавками

Е. Н. Полонина¹⁾, докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾,
академик НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Б. М. Хрусталеv¹⁾,
асп. Е. А. Садовская¹⁾, инж. Н. А. Будревич¹⁾

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

Реферат. Самым распространенным и надежным материалом, без которого не обходится современное строительство, является бетон. Развитие строительного производства подталкивает к новым решениям в улучшении качества бетонной смеси и бетона. Наиболее востребованные и значимые показатели бетонной смеси – прочность при сжатии и подвижность бетонной смеси. С каждым годом исследований наноматериалов в качестве модифицирующих компонентов бетона становится больше, а результаты указывают на перспективность их применения. Наночастицы, обладающие большой удельной поверхностью, отличаются химической активностью, могут ускорять гидратацию и повышать прочностные показатели за счет зародышеобразования и последующего формирования C–S–H, уплотнения микроструктуры материала. Широкую базу воспроизводства имеют золь нанокремнезема, который может быть использован взамен микрокремнезема с промышленных предприятий, и углеродный наноматериал. В статье представлены исследования данных видов наноматериалов и результаты их применения в цементных бетонах. Исследования показали, что эффект наблюдается также при введении добавки, содержащей только один вид наночастиц. Установлена зависимость получаемых характеристик цементных бетонов от количества данных наноматериалов. Выявлено, что наилучшие результаты были получены с добавкой, в которой совместно использовались вышеперечисленные наноматериалы. Прочность на сжатие образцов тяжелого бетона, улучшенная комплексной

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

нанодисперсной системой, составила 78,7 МПа, что превышает прочность образца, содержащего добавку углеродных нанотрубок в паре с суперпластификатором, на 37 %. Изучен механизм действия представленной комплексной добавки.

Ключевые слова: водный золь нанокремнезема, углеродные нанотрубки, суперпластификатор, тяжелый бетон, прочность

Для цитирования: Материалы на основе цемента, модифицированные наноразмерными добавками / Е. Н. Полонина [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 189–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194>

Introduction

Currently, nanoscale materials have found their application in industry, as modifying components. Having very large values of the specific surface, nanosized particles are capable of affecting the physicochemical characteristics of the new material. Depending on the type of raw material and the production method, the characteristics of the obtained nanomaterials vary widely [1–8]. All this affects the results obtained when using the same concrete mix formulations.

An analysis of the literature shows nanomaterials, such as carbon nanotubes and silica fume, were initially used only as a means to increase the strength characteristics of modified concrete. A little later it became known that the use of these nanomaterials together with plasticizing additives provide an effective reduction in water and an increase in the durability (frost resistance) of the created concrete [9–25]. However, questions regarding the compaction of the structure and the filling of voids between cement particles and even larger sand particles remain open at the moment. The working hypothesis of the study is that a complex nanodispersed system consisting of nanosilica, multilayer carbon nanotubes (MCNT) and a superplasticizer (SP) will allow to obtain a synergistic effect, i. e. summation of the positive properties and qualities of each of the components.

Materials and methods of experimental studies

The following materials were used in the work as nanomaterials: water sol of nanosilica SiO_2 , obtained from hydrothermal fluids, with characteristics of a pH = 9.2, density $\rho = 1075 \text{ g/dm}^3$, solids content of nanosilica $\text{SiO}_2 = 120 \text{ g/dm}^3$, total salinity equal to 1720 mg/dm^3 [26–28] and carbon nanotubes obtained in a plasma of a high-voltage atmospheric pressure discharge with the optimal composition of the CH_4 gas mixture: air = 1:(2.4–2.5), followed by chemical treatment with a mass fraction of solids of not less than 37 %, pH = 7.0, $\rho = 1.1 \text{ g/cm}^3$ [29–36]. Superplasticizer from a series of polycarboxylates highly effective in water-reducing ability in the form of an aqueous solution.

Portland cement CEM I 42.5N was used as a binder as a fine aggregate, quarry sand with a fineness modulus $M_f = 3.8$ with a true density $\rho = 2572 \text{ kg/m}^3$ and bulk density $\rho = 1540 \text{ kg/m}^3$ was used. As a coarse aggregate, the fraction is 5–20 mm thick, bulk density $\rho = 1460 \text{ kg/m}^3$.

The particle size distribution of water sols of nanosilica was determined using the Analysette 22 laser diffraction device, which is built on the principle of “Inverse Fourier Optics” or a converging laser beam (Fig. 1). Reverse Fourier Optics also allow extremely high resolution measurements. By automatically moving the measuring cell supported by the computer in a converging beam in the NanoTec model, it is possible to create a supermatrix with a max 520 measuring channels for calculating. In this case, the measurement range is from 0.01 to $1000 \mu\text{m}$.

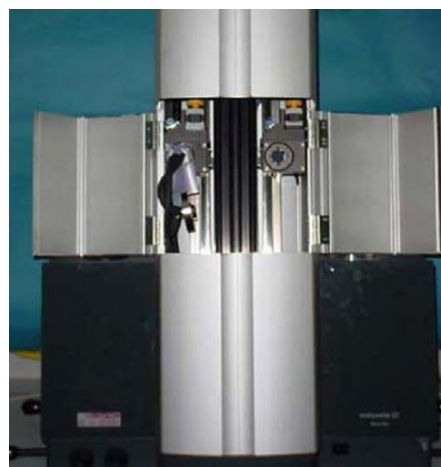


Fig. 1. Laser analyzer Analysette 22 NanoTec

The results of determining the particle size of nanosilica were given the following results: the size of the solid particles of nanosilica contained in aqueous ash is less than 10 nm, which is explained by the resolution of the device (from 10 nm to $1000 \mu\text{m}$).

The concentration and solids content of nanosilica SiO_2 in the sol was determined by evaporation of the initial water sol with a mass of $m_{\text{initial}} = 100 \text{ cm}^3$ in an oven at a temperature of $t = 150^\circ\text{C}$.

Weight reduction according to studies:

1 day – $m_1 = 233 \text{ ml/g}$;

2 days – $m_2 = 166 \text{ ml/g}$;

3 days – $m_3 = 146$ ml/g;

4 days – $m_4 = 145$ ml/g;

8 days – $m_8 = 145$ ml/g.

This indicates that the $\text{SiO}_2 = 120$ g/dm³ approximating value for the indicated solid particle content is solid; the mass from the 4th day remained unchanged due to the room humidity. Upon evaporation, the sol particles stuck together.

The results of measuring the particle size distribution of the dispersed composition of carbon nanomaterial are presented in Fig. 2.

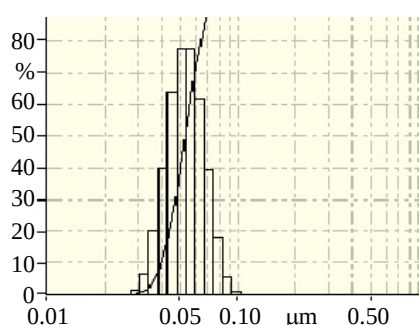


Fig. 2. The size distribution of nanostructured carbon particles

In order to study the effect of nanomaterials on the basic properties of cement concrete, an additive was made and a series of laboratory studies was carried out. The amount of added additive in all studied compositions was 0.8 % by weight of cement.

To determine the effect of an aqueous sol of SiO_2 (NS) silica on the strength characteristics of concrete, it was preliminarily mixed with mixing water, uniformly distributed throughout the volume, after which water was introduced into the concrete mixture. The mixture filled the cube-shaped nests (100×100 mm), which was mounted on a vibrating table and compacted. After manufacture, the samples were unformed and stored in bathtubs with water until they reached a certain

age. Testing the samples for compressive strength was carried out on the 1st, 7th, 14th and 28th days.

The data obtained showed that when the sol content of nanosilica SiO_2 in the amount of 0.1 wt. % in cement (NS 0.47) the increment in compressive strength compared to the control (Control) was +30 % on the first day, +20 % on the 28th (Fig. 3).

It was found that an increase in the concentration of this nanosupplement NS 4.7 leads to a decrease in strength by 1.2 times, which indicates the advisability of using SP in this system.

A method of preparing a plasticizing additive used hereinafter consists in dispersing a superplasticizer and nanomaterial (nanosilica or nanocarbon) in a mixer for several minutes. After that, concrete samples were manufactured and tested according to the above methodology.

Tests of a plasticizing additive, including a nanosilica sol paired with a superplasticizer, were carried out at W/C values from 0.2 to 0.3 (Fig. 4).

An additive containing a nanosilica sol with a concentration of solid SiO_2 equal to 0.47 g/kg, introduced into the superplasticizer in amounts of 8, 4, and 1 g/t when determining the compressive strength, showed the best result of 73.7 MPa when solid SiO_2 4 g was added per 1 t of superplasticizer.

At the same time, the introduction of NS increased the strength of concrete to 30 % compared to concrete containing only SP and to 40 % compared to the control sample.

The effect of a complex additive containing MCNT (MLCNT), NS and SP on the strength characteristics of concrete are presented in Fig. 5.

The compressive strength of samples of heavy concrete, improved by an integrated nanodisperse system, was 78.7 MPa, which exceeds the strength of a sample containing an MLCNT additive paired with superplasticizer by 27 %.

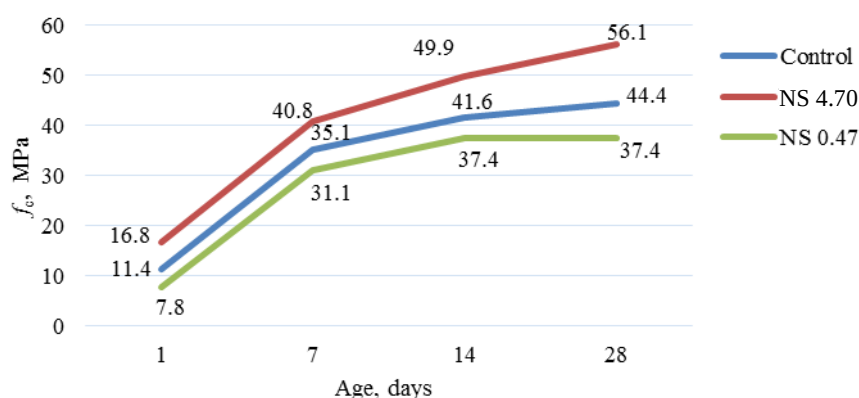


Fig. 3. The effect of nanosilica sol on the strength characteristics of heavy concrete

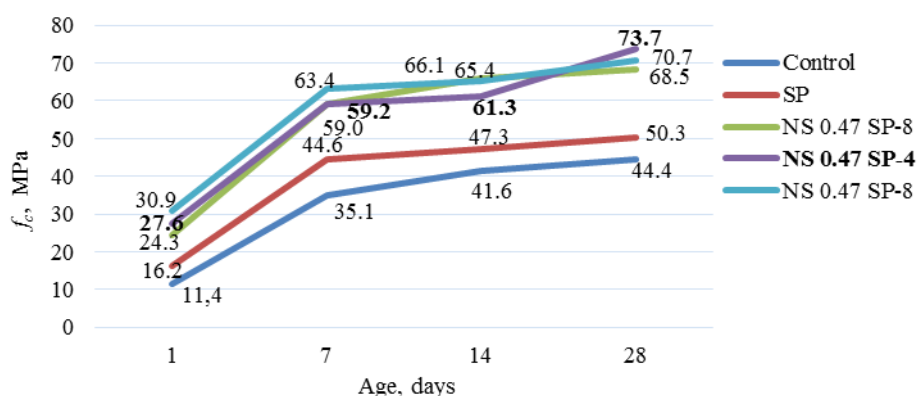


Fig. 4. The effect of nanosilica sol in combination with superplasticizer on the strength characteristics of heavy concrete

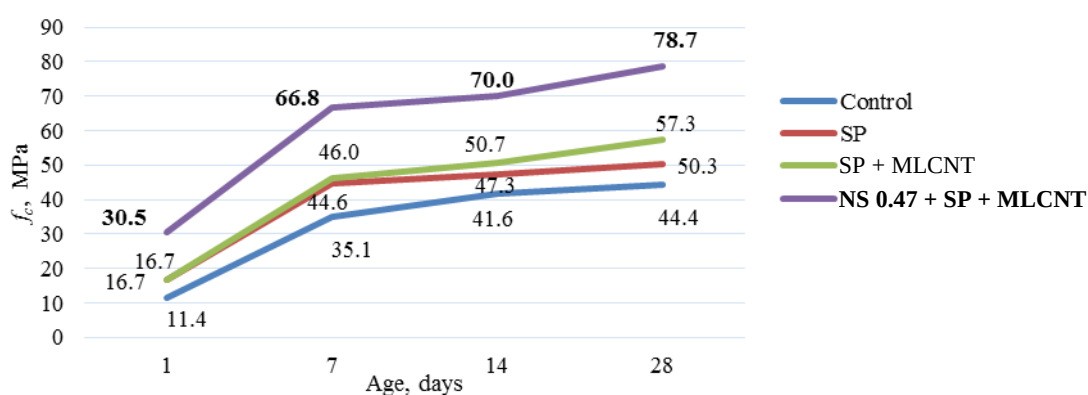


Fig. 5. The effect of complex additives on the strength characteristics of heavy concrete

It can be assumed that the mechanism of action of the presented complex additive is as follows: the introduction of a nanocarbon material into the cement system leads to the packing density of the particles of the system, and when an even smaller nanosilica is introduced, additional crystallization centers of hydrated neoplasms are created. Therefore, nanosilica acts as a nanofiller of this system, which more actively affects the concentration of Ca^{2+} and OH^- and reduces the number of pores.

CONCLUSION

Based on the analysis of the test results, it can be concluded that a complex nanodispersed system, including multilayer carbon nanotubes, nanosilica and superplasticizer, helps to bring together particles, densify the structure and form intergrowth contacts, which effectively affects the structure of heavy concrete. Thus, this effect is achieved by directed structural modification of the

main components of the cement stone – calcium hydrosilicates relative to the composition and morphology of neoplasms.

List of accepted symbols and abbreviations

f_c – compressive strength of concrete, MPa;
 $m_{1...8}$ – weight reduction, ml/g;
 pH – pH value;
 M_f – size module;
 ρ – density, kg/m^3 ;
 indexes:
 c – compression;
 f – large-ness.

REFERENCES

1. Shabanova N. A., Sarkisov P. D. (2012) *Sol-Gel Technologies. Nanodispersed Silica*. Moscow, BINOM Publ. 328 (in Russian).
2. Kondratenko V. S., Kobyshev A. N., Petruyanis N. E., Sorokin A. V., Filimonova E. V. (2006) The Adsorption Properties of SiO_2 Micropowders Obtained by the Sol-Gel Method. *Mezhdunarodnaya Nauchno-Tekhnicheskaya Kon-*

- ferentsiya "Informatsionnye Tekhnologii v Nauke, Tekhnike i Obrazovanii" [International Scientific and Technical Conference "Information Technologies in Science, Technology and Education"]. Egypt, 46–48 (in Russian).
3. Shena Y., Zhao P., Shao Q. (2014) Porous Silica and Carbon Derived Materials from Rice Husk Pyrolysis Char. *Microporous and Mesoporous Materials*, 188, 46–76. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.01.005>.
 4. Kuskov N. I., Boguslavskii L. Z., Smal'ko A. A., Zubenko A. A. (2007) Obtaining Nanocarbon by the Method of Electric Discharge Treatment of Organic Liquids. *Elektronnaya Obrabotka Materialov = Electronic Processing of Materials*, (4), 46–52 (in Russian).
 5. Sergienko I. G., Znosko K. F., Tarkovsky V. V. (2017) Obtaining Nanosized Particles by the Method of Electric-Discharge Destruction of Materials in Liquid and Study of their Properties. *Vesnik Hrodzenskaha Dziarzhaunaha Universiteta imia Ianki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika = Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*, 7 (1), 56–65 (in Russian).
 6. Kolosov A. D., Nemarov A. A., Nebogin S. A. (2017) Technology of Obtaining and Using Nanosilica in the Production of New Materials for Mechanical Engineering. *Sovremennye Tekhnologii. Sistemnyi Analiz. Modelirovanie = Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, (3), 59–66 (in Russian).
 7. Bazhenov Yu. M., Falikman V. R., Bulgakov B. I. (2012) Nanomaterials and Nanotechnologies in Modern Concrete Technology. *Vestnik MGSU = Monthly Journal on Construction and Architecture*, (12), 125–133 (in Russian).
 8. Khroustalev B. M., Leonovich S. N., Yakimovich B. A., Yakovlev G. I., Pervushin G. N., Polyanskikh I. S., Pudov I. A., Khazeev D. R., Shaybadullina A. V., Gordina A. F., Ali El Sayed Mohamed, Keriene Ja. (2014) Dispersion of Multi-Walled Carbon Nanotubes in Building Science of Materials. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (1), 44–52 (in Russian).
 9. Singh L. P., Zhu W., Howind T., Sharma U. (2017) Quantification and Characterization of C–S–H in Silica Nanoparticles Incorporated Cementitious System. *Cement & Concrete Composites*, 79, 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.004>.
 10. Constantinides G., Ulm F. J. (2007) The Nanogranular Nature of C–S–H. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55 (1), 64–90. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.06.003>.
 11. Gorkaya D. O., Chulkova I. L. (2018) Modification of the Properties of Cement Stone with an Aqueous Suspension of Technical Carbon. *Fundamental'nye i Prikladnye Issledovaniya Molodykh Uchenykh: Sbornik Nauchnykh Trudov II Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii Studentov, Aspirantov i Molodykh Uchenykh* [Fundamental and Applied Research of Young Scientists. Collection of Scientific Papers of the II International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Omsk, Siberian State Automobile and Highway University, 423–426 (in Russian).
 12. Rassokhin A. S., Ponomarev A. N., Figovsky O. L. (2018) Silica Fumes of Different Types for High-Performance Fine-Grained Concrete. *Magazine of Civil Engineering*, (2), 151–160.
 13. Derevyanko V. M., Grishko G. M., Frost V. Yu. (2018) The Influence of Nanoadditives on the Hydration of Gypsum Binders. *Zbirkuv Naukovykh Prats' Ukrain'skogo Derzhavnogo Universitetu Zalizничного Transportu = Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, (178), 88–97 (in Russian).
 14. Nizina T. A., Ponomarev A. N., Balykov A. S., Pan-kin N. A. (2017) Fine-Grained Fiber Concretes Modified by Complexed Nanoadditives. *International Journal of Nanotechnology*, 14 (7–8), 665–679. <https://doi.org/10.1504/ijnt.2017.083441>.
 15. Burmistrov I. N., Il'nykh I. A., Mazov I. N., Kuznetsov D. V., Yudinseva T. I., Kuskov K. V. (2013) Physical and Mechanical Properties of Composite Concrete Modified with Carbon Nanotubes. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, (5), 80–87 (in Russian).
 16. Sheida O. Yu., Batyanovsky E. I. (2015) Production Testing of a New Chemical Additive Containing Carbon Nanomaterial. *Sovremennye Problemy Vnedreniya Evropeiskikh Standartov v Oblasti Stroitel'stva: Sbornik Mezhdunarodnykh Nauchno-Tekhnicheskikh Statei (Materialy Nauchno-Metodicheskoi Konferentsii)*, 27–28 Maya 2014 g. Ch. 2 [Modern Problems of the Implementation of European Standards in the Field of Construction: Materials Scientist. Conf., May 27–28, 2014. Part 2]. Minsk, BNTU, 7–19 (in Russian).
 17. Pukharensko Yu. V., Aubakirova I. U., Nikitin V. A., Letenko D. G., Staroverov V. D. (2010) Mixed Nanocarbon Material in Cement Composites. *Stroitel'nye Materialy, Oborudovanie, Tekhnologii XXI Veka* [Building Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century], (10), 16–17 (in Russian).
 18. Khroustalev B. M., Leonovich S. N., Yakovlev G. I., Polianskikh I. S., Lahayne O., Eberhardsteiner J., Skripkiunas G., Pudov I. A., Karpova E. A. (2017) Structural Modification of New Formations in Cement Matrix Using Carbon Nanotube Dispersions and Nanosilica. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 16 (2), 93–103. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-93-103> (in Russian).
 19. Yakovlev G. I., Pervushin G. N., Pudov I. A., Eberhardstainer Dzh., Lakhain O., Al'rfai A., Leonovich S. N. (2014) Influence of Multilayer Carbon Nanotubes on the Elastic Modulus and Microhardness of the Cement Matrix. *Sovremennye Problemy Stroitel'stva i Zhizneobespecheniya: Bezopasnost', Kachestvo, Energo- i Resursosberezhenie: Sbornik Materialov III Vserossiiskoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii, Yakutsk, 3–4 Marta 2014 g.* [Modern Problems of Construction and Life Support: Safety, Quality, Energy and Resource Conservation. Proceedings of the III All-Russian Scientific-Practical. Conf., 3–4 March, 2014], Yakutsk, 387–393 (in Russian).
 20. Fakhratov, M. A. Girshtel M. A., Evdokimov V. O., Borodin A. S. (2018) Prospects for the Use of Nanostructured Concrete in Construction. *Don's Engineering Gazette*, 3 (50), 124–132. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-nanostrukturirovannogo-betona-v-stroitelstve> (Accessed 12.02.2020).
 21. Lkhasaranov S. A., Urkhanova L. A., Buyantuev S. L., Kondratenko A. S., Danzanov A. B., Pshenichniko-

- va L. I. (2012) Increased Strength Concretes Based on Composite Binders. *Stroitel'nyi Kompleks Rossii. Nauka. Obrazovanie. Praktika: Mat. Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Building Complex of Russia. The Science. Education. Practice: Mat. International Scientific-Practical. Conf.]. Ulan-Ude, East Siberian State University of Technology and Management, 225–228 (in Russian).
22. Urkhanova L. A., Hardaev P. K., Lhasaranov S. A. (2015) Modification of Cement Concretes with Nanodispersed Additives. *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya = Building and Reconstruction*, (3), 167–175 (in Russian).
 23. Khroustalev B. M., Yaglov V. V., Kovalev Ya. N., Romaniuk V. N., Burak G. A., Mezhtentsev A. A., Gurinenko N. S. (2015) Nanomodified Concrete. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (6), 3–8 (in Russian).
 24. Urkhanova L. A., Khardaev P. K., Lhasaranov S. A. (2015) Modification of Cement Concretes with Nanodispersed Additives. *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya = Building and Reconstruction*, (3), 167–175 (in Russian).
 25. Sanchez F., Sobolev K. (2013) Nanotechnology in Concrete Production. Overview. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta = Journal of Construction and Architecture*, (3), 262–289 (in Russian).
 26. Gorev D. S., Potapov V. V., Goreva T. S. (2014) Obtaining a Sol of Silicon Dioxide by Membrane Concentration of Aqueous Solutions. *Fundamental'nye Issledovaniya = Fundamental Research*, (11), 1233–1239 (in Russian).
 27. Potapov V. V., Efmenko Y. V., Gorev D. S. (2019) Determination of the Amount of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Bound by Additive Nano- SiO_2 in Cement Matrices. *Nanotehnologii v Stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*, 11 (4), 308–325 (in Russian).
 28. Potapov V. V., Gorev D. S. (2018) Physico-Chemical Characteristics of Nanosilica (Sol, Nanopowder-Shock) and Microsilica. *Fundamental'nye Issledovaniya = Fundamental Research*, (6), 23–29 (in Russian).
 29. Zhdanok S. A., Krauklis A. V., Samtsov P. P., Volzhanin V. M. (2006) *Installation for the Production of Carbon Nanomaterials*. Patent RB No 2839 (in Russian).
 30. Zhdanok S. A., Khrustalev B. M., Batyanovsky E. I., Leonovich S. N. (2009) Nanotechnology in Building Materials Science: Reality and Perspectives. *Vestnik BNTU [Bulletin of the Belarusian National Technical University]*, (3), 5–22 (in Russian).
 31. Eberhardsteiner J., Zhdanok S., Khrustalev B., Batyanovskii E. I., Leonovich S., Samtsov P. (2012) Investigation of the Effect of Nanosized Additives on the Mechanical Behavior of Cement Blocks. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (1), 52–55 (in Russian).
 32. Zhdanok S. A., Solntsev A. P., Krauklis A. V. (2005) *A Method for Producing Carbon Nanomaterials*. Patent RB No 10010 (in Russian).
 33. Eberhardsteiner J., Zhdanok S., Khroustalev B., Batsianouski E., Leonovich S., Samtsou P. (2011) Characterization of the Influence of Carbon Nanomaterials on the Mechanical Behavior of Cement Stone. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 84 (4), 697–704. <https://doi.org/10.1007/s10891-011-0531-7>.
 34. Zhdanok S. A., Potapov V. V., Polonina E. N., Leonovich S. N. (2020) Modification of Cement Concrete with Additives Containing Nano-Sized Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (3), 669–673. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02163-y>.
 35. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. (2019) Physicomechanical Characteristics of Concrete Modified by a Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92 (1), 12–18. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01902-0>.
 36. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. (2019) Influence of the Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture in a Self-compacting Concrete Mix on its Technological Properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92 (2), 376–382. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01941-7>.

Received: 23.02.2021

Accepted: 20.04.2021

Published online: 31.05.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-195-206>

УДК 658.26:666.97.035.5:004.94

Разработка энергоэффективных режимов установок для тепловой обработки бетонных изделий с использованием численных методов расчета

Докт. техн. наук, проф. В. Н. Романюк¹⁾, канд. техн. наук А. М. Нияковский²⁾,
докт. физ.-мат. наук, проф. А. Н. Чичко³⁾, канд. техн. наук Ю. В. Яцкевич³⁾

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

²⁾Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь),

³⁾Открытое акционерное общество «Пеленг» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Производство бетонных и железобетонных изделий в условиях Республики Беларусь и в странах с аналогичными климатическими условиями требует проведения тепловой обработки в теплотехнологических установках с целью достижения продукцией заданной прочности в назначенное время, на что расходуется большое количество тепловой энергии. Назначение режимов работы оборудования в этом случае сопряжено с целым рядом трудностей, когда речь идет о новых изделиях сложной пространственной конфигурации и структуры. Критериями оптимальности таких режимов выступают, как правило, продолжительность и температурные пределы обработки, обеспечивающие требуемую прочность при минимальном потреблении энергии. В условиях серийного производства в случае конструктивно простых объектов назначение режимов тепловой обработки осуществляется опытным путем. Как показывает анализ, полученные таким образом режимы не отвечают названным выше критериям, особенно с позиций энергосбережения. В статье с использованием ранее разработанной авторами математической модели предлагаются зависимости для расчета оптимальных режимов тепловой обработки бетонных изделий, отличающихся сложной пространственной формой и многокомпонентной структурой. Метод основан на трехмерных уравнениях переноса с учетом внутренних источников тепловыделений, обусловленных протекающей реакцией гидратации активных компонентов цементного клинкера, и граничных условий, соответствующих структуре обрабатываемого изделия, а также виду теплотехнологического устройства для ускоренной гидратации. Предложены уравнения для расчета количества подводимой к обрабатываемому изделию тепловой энергии, обеспечивающей заданную прочность в назначенное время. На примере выпускаемого промышленного бетонного изделия и для условий реально применяемого устройства ускоренной гидратации выполнено сравнение двух предельных режимов тепловой обработки: с изотермической выдержкой и без нее. В результате расчетов получены зависимости энергопотребления, температурных полей и степени гидратации в изделии для обоих режимов и разработан соответствующий рассматриваемому случаю энергосберегающий режим тепловой обработки. Показано, что используемый численный метод позволяет решать задачи подобного типа и добиваться экономии тепловой энергии.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплотехнологические установки, кинетика гидратации цемента, температурное поле, нестационарное уравнение теплопроводности, композитные материалы, энергосберегающие режимы, энергоэффективность

Для цитирования: Разработка энергоэффективных режимов установок для тепловой обработки бетонных изделий с использованием численных методов расчета / В. Н. Романюк [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 195–206. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-195-206>

Development of Energy-Efficient Modes of Installations for Heat Treatment of Concrete Products Using Numerical Calculation Methods

V. N. Romaniuk¹⁾, A. M. Niyakovskii²⁾, A. N. Chichko³⁾, Yu. V. Yatskevich³⁾

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

²⁾Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus),

³⁾Joint-Stock Company "Peleng" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Production of concrete and reinforced concrete products in the conditions of the Republic of Belarus and in the countries with similar climatic conditions requires heat treatment in heat-technological installations in order to achieve

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

the desired strength of the products at the appointed time, which consumes a great amount of thermal energy. In this case, the purpose of equipment operating modes is associated with a number of difficulties when it comes to new products of complex spatial configuration and structure. The optimality criteria of such modes are, as a rule, the duration and temperature limits of processing, providing the required strength with minimal energy consumption. In the conditions of serial production in the case of structurally simple objects, the assignment of heat treatment modes is carried out empirically. As the analysis shows, the modes obtained in this way do not meet the above criteria, especially from the standpoint of energy saving. The paper, using a mathematical model previously developed by the authors, proposes dependencies for calculating the optimal modes of heat treatment of concrete products that are distinguished by a complex spatial shape and multi-component structure. The method is based on three-dimensional transfer equations, taking into account internal sources of heat release due to the ongoing hydration reaction of the active components of the cement clinker, and the boundary conditions corresponding to the structure of the processed product, as well as the type of heat technology device for accelerated hydration. Equations are proposed for calculating the amount of heat energy supplied to the processed product providing a given strength at a specified time. On the example of a manufactured industrial concrete product and for the conditions of an actually used device for accelerated hydration, a comparison has been made between two limiting modes of heat treatment: with isothermal exposure and in its absence. As a result of the performed calculations, the dependences of energy consumption, temperature fields and the degree of hydration in the product for both modes have been obtained and an energy-saving mode of heat treatment corresponding to the case under consideration has been developed. It is shown that the used numerical method allows to solve problems of this type and to achieve thermal energy savings.

Keywords: mathematical modelling, heat-technological installations, cement hydration kinetics, temperature field, non-stationary heat conduction equation, composite materials, energy-saving modes, energy efficiency

For citation: Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2021) Development of Energy-Efficient Modes of Installations for Heat Treatment of Concrete Products Using Numerical Calculation Methods. *Science and Technique*. 20 (3), 195–206. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-195-206> (in Russian)

Введение

При производстве бетонных и железобетонных изделий в климатических условиях Республики Беларусь требуется тепловая обработка (ТО), которая реализуется в устройствах ускоренной гидратации. ТО является самой энергоемкой стадией технологического процесса производства бетонных изделий. Удельный расход тепловой энергии (ТЭ) на нужды ТО в расчете на единицу объема изделий составляет в зависимости от вида изделия и типа теплотехнологической установки от 314 до 2088 МДж/м³, на ее осуществление затрачивается до 70 % от общей продолжительности производственного цикла [1–5]. В силу указанных причин особую актуальность приобретают проблема снижения энергоемкости ТО, разработка новых и совершенствование существующих методов исследований и расчетов тепло-энергетического и теплотехнологического оборудования для ее осуществления, оптимизация схем, параметров и режимов его работы.

В ранее опубликованных работах [6–13] сформулированы и описаны математическая модель с пространственно распределенными параметрами и алгоритм расчета, отличающиеся от известных учетом неравновесности процессов нагрева изделия и гидратации цемента в нем, учетом пространственно распределенного источника гидратации, учетом простран-

ственного распределения 3D-компонентов изделия (бетон, опалубка, пенополистирол, минеральная вата), учетом системы начальных и граничных условий, отражающих особенности теплопереноса в теплотехнологической установке с программируемым нагревателем и находящимся внутри нее обрабатываемым изделием.

Цель исследований авторов – развитие ранее полученных модели и алгоритма, заключающееся в формировании исходных данных, адаптации граничных и начальных условий и выполнении расчетов применительно к промышленно изготавливаемым бетонным изделиям сложной пространственной конфигурации и структуры, на основе чего разработать энергосберегающий режим работы теплотехнологического оборудования. В качестве исследуемого объекта рассмотрена наружная трехслойная стеновая панель серии 90-м, выпускаемая ОАО «Строительно-монтажный трест № 16, г. Новополоцк» (далее – наружная стеновая панель), 3D-геометрия которой построена в среде SolidWorks и импортирована в разработанную систему САЕ для построения клеточной 3D-модели.

На рис. 1 представлено распределение входящих в наружную стеновую панель и использованных при проведении расчетов областей Ω_1 – Ω_6 различных материалов и элементов конструкции, составляющих бетонное изделие.

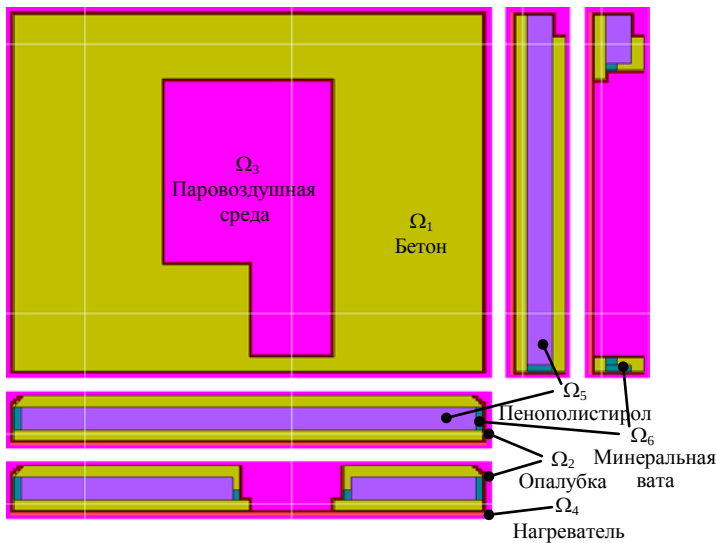


Рис. 1. Области моделируемого пространства для тепловой обработки многослойной наружной стеновой панели

Fig. 1. Areas of simulated space for heat treatment of multi-layer external wall panel

Как видно из рисунка, объект имеет сложные конфигурацию и структуру. В него входят пространственные области бетона (Ω_1), пенополистирола (Ω_5) и минеральной ваты (Ω_6). Тепловая обработка изделия проводилась на обогреваемом стенде горизонтального формования с укрытием поверх специальным рулонным покрывалом, под которым формировалась паровоздушная среда (Ω_3). По внутренней и наружной торцевым поверхностям объект был ограничен стальной опалубкой (Ω_2).

Отключение нагревания (контролируемого поддержания температуры) и переход оборудования в режим, когда тепловая обработка изделия осуществляется целиком за счет теплоты гидратации, моделировались путем присвоения элементам области нагревателя (Ω_4) идентификатора области опалубки (Ω_2) при сохранении значений температуры. То есть в момент времени τ , соответствующий прекращению поддержания постоянства температуры выдержки изделия (но после завершения предварительного нагрева), область Ω_4 превращалась в часть области Ω_2 .

Температура во всем пространстве нагревателя (Ω_4) изменялась в соответствии с режимом термообработки

$$\frac{\partial T_w(\tau)}{\partial \tau} = \begin{cases} (T_{\max} - T_0) / \tau_{inc} & \text{при } 0 \leq \tau < \tau_{inc}; \\ 0 & \text{при } \tau_{inc} \leq \tau < \tau_{iso}, \end{cases} \quad (1)$$

где $T_{\max}$ – максимальная температура в пространственной области нагревателя (заданная

температура изотермической выдержки), °C; T_0 – начальная температура пространственной области нагревателя, °C, принята 36 °C; τ_{inc} – момент времени прекращения этапа подъема температуры, считая от начала процесса ТО, заданный режимом тепловой обработки, с; τ_{iso} – момент окончания изотермической выдержки, считая от начала процесса ТО, заданный режимом тепловой обработки, с.

Начальные и граничные условия и параметры модели

Начальные условия модели (в момент времени $\tau = 0$) задавались соотношениями, описывающими фактические температурные условия производства:

$$\begin{cases} T(x, y, z, 0) = 25^\circ\text{C} & \text{для} \\ & (x, y, z) \in \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_5 \cup \Omega_6; \\ T(x, y, z, 0) = 24^\circ\text{C} & \text{для } (x, y, z) \in \Omega_3; \\ T(x, y, z, 0) = T_0 = 36^\circ\text{C} & \text{для } (x, y, z) \in \Omega_4; \\ Q(x, y, z, 0) = 0 \text{ Дж/кг} & \text{для } (x, y, z) \in \Omega_1, \end{cases} \quad (2)$$

где x, y, z – декартовы координаты (ось y направлена вертикально); $T(x, y, z, 0)$ – температура бетона в точке с координатами (x, y, z) , °C, в момент времени $\tau = 0$; $Q(x, y, z, 0)$ – тепловыделение цемента, Дж/кг, в момент времени $\tau = 0$.

С целью моделирования тепловой обработки граничные условия были приведены к условиям задачи. Так, температура области паровоздушной среды (Ω_3) менялась по следующему закону:

$$T_{env}(\tau + \Delta\tau) = T_{env}(\tau) + \frac{P_{env}(\tau) - P_{cov}(\tau)}{\rho_{air} V_{env} c_{air}} \Delta\tau, \quad (3)$$

где c_{air} , ρ_{air} – удельная теплоемкость и плотность влажного насыщенного воздуха при средней температуре в процессе ТО 40 °C; P_{env} – мощность теплоотдачи опалубки и открытой поверхности бетона в паровоздушную среду; P_{cov} – то же паровоздушной среды на поверхность рулонного покрывала; V_{env} – объем

области Ω_3 ; Δt – шаг изменения времени тепловой обработки, с.

Мощность теплоотдачи паровоздушной среды на поверхность покрывала определялась на основании уравнения

$$P_{cov}(\tau) = \alpha_{cov} (x_{max} - x_{min}) \times (z_{max} - z_{min}) (T_{env}(\tau) - T_{cov}), \quad (4)$$

где α_{cov} – коэффициент теплоотдачи паровоздушной среды к поверхности укрытия, Вт/(м²·К); x_{min} , x_{max} , z_{min} , z_{max} – минимальная и максимальная соответствующие координаты моделируемого пространства (для вычисления площади укрываемой поверхности), м; T_{cov} – температура покрывала, °С.

Мощность теплоотдачи опалубки (Ω_2) и открытой поверхности бетона (Ω_1) в паровоздушную среду (Ω_3) вычислялась следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{env}(\tau) = & \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y+\Delta y,z) \in \Omega_3}} \alpha_{up} \Delta x \Delta z (T(x,y+\Delta y,z,\tau) - T(x,y,z,\tau)) + \\ & + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_2 \\ (x+\Delta x,y,z) \in \Omega_3}} \alpha_{sd} \Delta y \Delta z (T(x+\Delta x,y,z,\tau) - T(x,y,z,\tau)) + \\ & + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_2 \\ (x-\Delta x,y,z) \in \Omega_3}} \alpha_{sd} \Delta y \Delta z (T(x-\Delta x,y,z,\tau) - T(x,y,z,\tau)) + \\ & + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y,z+\Delta z) \in \Omega_2}} \alpha_{sd} \Delta x \Delta y (T(x,y,z+\Delta z,\tau) - T(x,y,z,\tau)) + \\ & + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y,z-\Delta z) \in \Omega_2}} \alpha_{sd} \Delta x \Delta y (T(x,y,z-\Delta z,\tau) - T(x,y,z,\tau)), \end{aligned} \quad (5)$$

где α_{up} , α_{sd} – коэффициенты теплоотдачи конвективного теплообмена к паровоздушной среде соответственно от верхней (горизонтальной) и вертикальной (боковой) поверхностей бетонного изделия, Вт/(м²·К); Δx , Δy , Δz – шаг по пространству в направлении соответствующих осей, м.

Параметры моделирования характеризовались следующими значениями: размеры сеточной модели составили $164 \times 22 \times 139 = 501512$ элементов; шаг по пространству 0,02 м; шаг по времени 0,05 с; общее время моделирования варианта тепловой обработки не менее 22 ч.

Моделирование распределения значений температуры и коэффициента гидратации

С использованием модели и уравнений, описанных в [6–13], выполнено сравнительное моделирование двух режимов тепловой обработки рассматриваемого изделия: с изотермической выдержкой (при контролируемом подводе теплоты и постоянной температуре) и энергосберегающего, когда тепловая обработка изделия осуществляется преимущественно за счет теплоты гидратации (подвод теплоты извне выполняется только в период предварительного нагрева). Режим с изотермической выдержкой характеризовался следующими параметрами: $T_{max} = 53$ °С (температура нагрева и выдержки); $\tau = \tau_{inc} = 3$ ч (момент времени завершения предварительного нагрева); $\tau = \tau_{iso} = 10$ ч (момент времени завершения изотермической выдержки). Указанные моменты времени отсчитывались от принятого за нуль начала ТО. Фрагменты, иллюстрирующие результаты моделирования распределения температур и коэффициента (степени) гидратации в выделенных сечениях для этого режима через 6 ч, прошедших от начала тепловой обработки, представлены на рис. 2.

На рис. 3 показаны изменения во времени соответственно температуры и коэффициента гидратации в различных точках изделия. Из рис. 3 следует, что максимальная температура нижнего слоя бетона достигает в точке 3 значения 56,3 °С на момент времени ~5 ч. Это превышает заданную температуру нагрева на 3,3 °С. Максимальная температура наружной грани верхнего слоя бетона (кривая 5) достигает ~54,7 °С, что только на 1,7 °С выше температуры в пространственной области нагревателя. Разные температурные условия в верхнем и нижнем слоях бетона обуславливают и различную степень гидратации в них. Величины коэффициента гидратации цемента в бетоне H в рассматриваемых точках на момент времени $\tau = 15$ ч составили: 53,5 % – в нижнем; 51,6 % – в верхнем бетонном слое изделия.

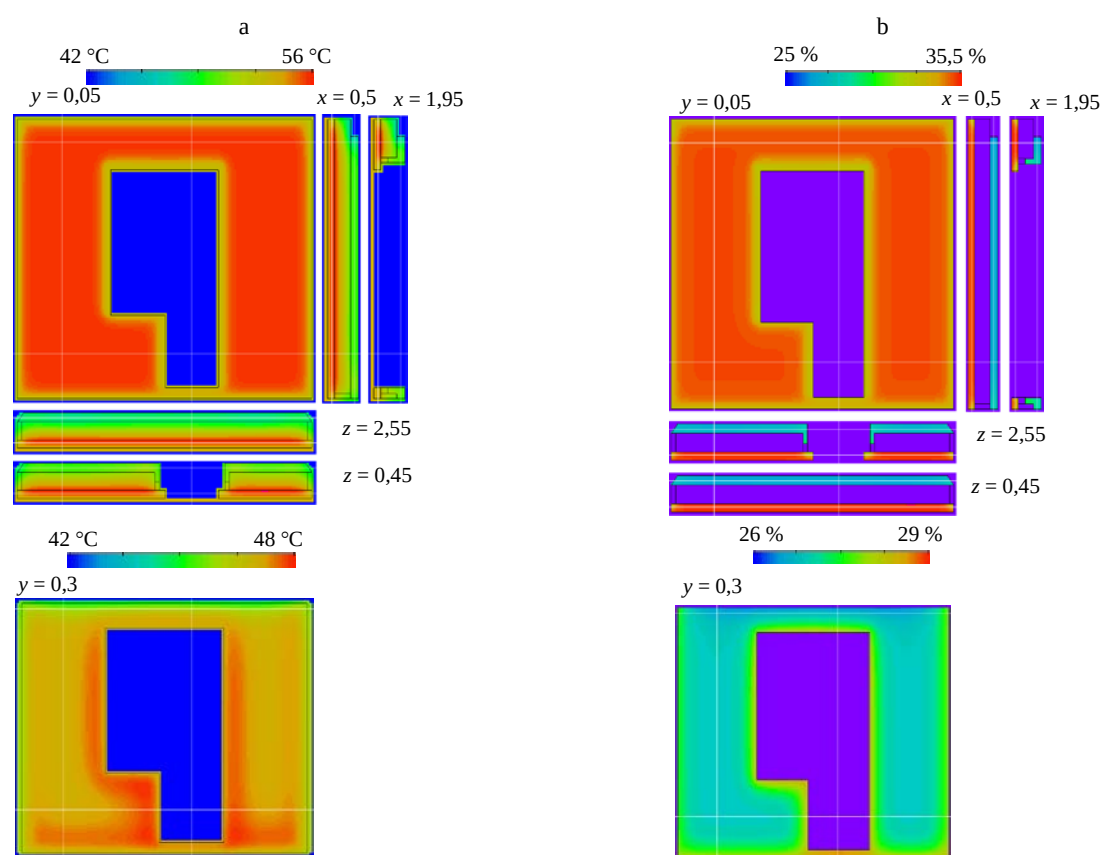


Рис. 2. Распределение температуры (а), степени (коэффициента) гидратации (б) в выделенных сечениях изделия при изотермическом режиме тепловой обработки по истечении 6 ч

Fig. 2. Distribution of temperature (a), degree (coefficient) of hydration (b) in the selected sections of the product in the isothermal heat treatment mode after 6 h

Расчеты распределения температур при заданном режиме с изотермической выдержкой (который чаще всего используется в условиях производства) показали, что температура бетона превышает температуру изотермической выдержки. В итоге часть теплоты реакции гидратации, если температура в пространственной области нагревателя поддерживается постоянной, отводится от изделия в эту область и рассеивается за пределы изделия. В связи с чем для разработки энергосберегающих режимов ТО целесообразно рассмотреть использование в качестве базового режим, исключая активный отвод теплоты от изделия в область нагревателя в период внешнего подвода ТЭ.

В качестве базового для проведения расчетов использован тепловой режим, характеризующийся следующими параметрами: $T_{\max} = 53\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_{\text{inc}} = 3\text{ ч}$ при сокращенной продолжительности изотермической выдержки (далее – энергосберегающий режим). От применяемого в производ-

стве режима ТО, близкого к изотермическому (далее – изотермический режим), он отличался значением параметра, связанного со временем изотермической выдержки τ_{iso} : вместо $\tau_{\text{iso}} = 10\text{ ч}$ принято $\tau_{\text{iso}} = \tau_{\text{inc}} = 3\text{ ч}$. Энергосберегающий режим представляет собой предельный случай, отличающийся от ранее рассмотренного режима значением параметра, связанного со временем изотермической выдержки τ_{iso} и с общим временем подвода теплоты нагревателями к изделию. В момент времени $\tau = \tau_{\text{inc}}$ нагреватели отключены, и ТО изделия осуществляется за счет теплоты реакции гидратации.

Сравнительные результаты моделирования динамики температуры в области нагревателя для режима с изотермической выдержкой (изотермического) и энергосберегающего режимов представлены на рис. 4. Результаты моделирования динамики температур и коэффициента гидратации в выделенных точках изделия (рис. 3а) для указанных режимов приведены на рис. 5–10.

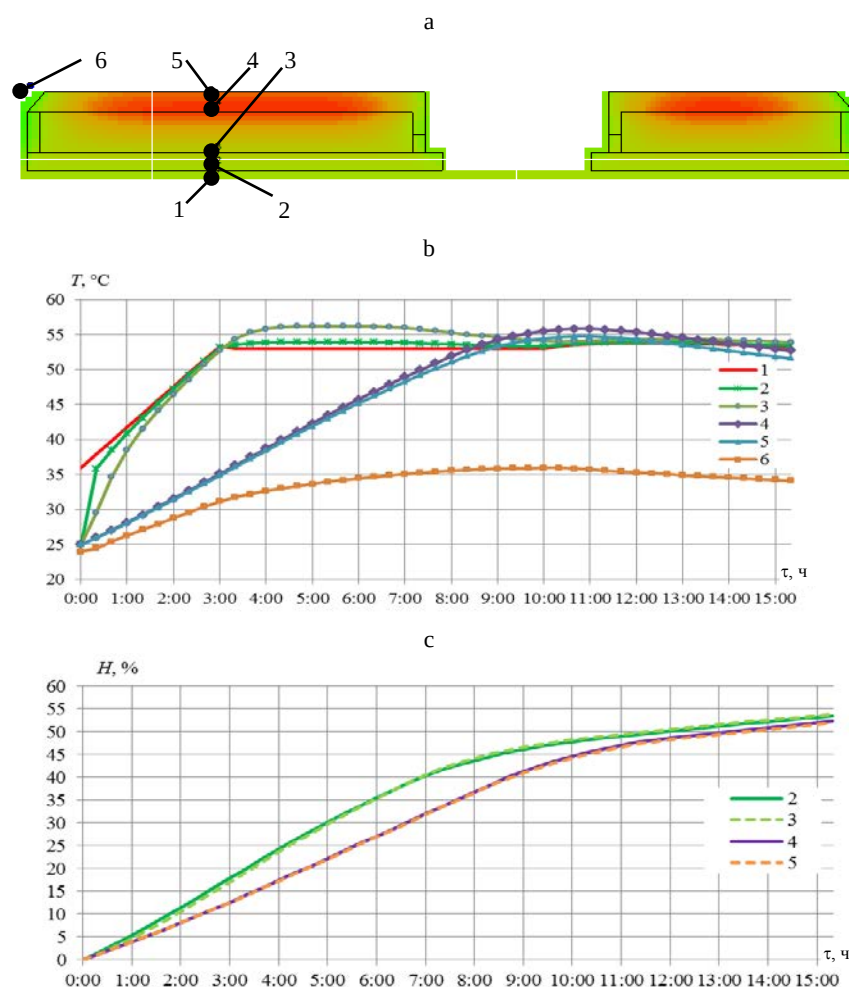


Рис. 3. Сравнение изменений температур (b) и степени (коэффициента) гидратации (c) в выделенных точках (a): изделия (точки 2, 3, 4, 5), нагревателя (точка 1) и среды (точка 6) при изотермическом режиме тепловой обработки

Fig. 3. Comparison of temperature changes (b) and degree (coefficient) of hydration (c) at the selected points (a): products (points 2, 3, 4, 5), heater (point 1) and medium (point 6) in the isothermal heat treatment mode

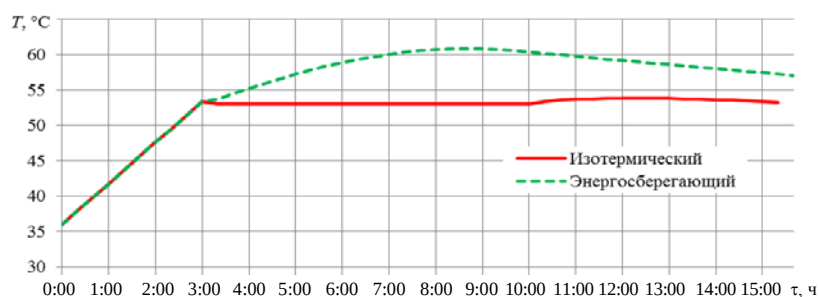


Рис. 4. Сравнительный анализ изменений температур в области нагревателя (точка 1) при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 4. Comparative analysis of temperature changes in the heater area (point 1) in isothermal and energy-saving heat treatment modes

Как видно из рис. 4, в ходе реализации энергосберегающего режима температура в области нагревателя достигает 60,8 $^\circ\text{C}$ на момент вре-

мени $\tau \sim 8,0$ ч, что на 7,8 $^\circ\text{C}$ превышает соответствующую температуру при изотермическом режиме (53,0 $^\circ\text{C}$). Рис. 5, 6 отражают раз-

личие температур в нижнем слое бетона (точки 2, 3) при двух рассматриваемых режимах тепловой обработки.

Из рис. 5, 6 следует, что температура в нижнем слое бетона для энергосберегающего режима достигает значения около 62,4 °С на момент

времени ~8 ч, что примерно на 6,1 °С превышает максимальную температуру нагрева для изотермического режима (56,3 °С).

Различия температур в верхнем слое бетона (точки 4 и 5) для рассматриваемых режимов тепловой обработки представлены на рис. 7.

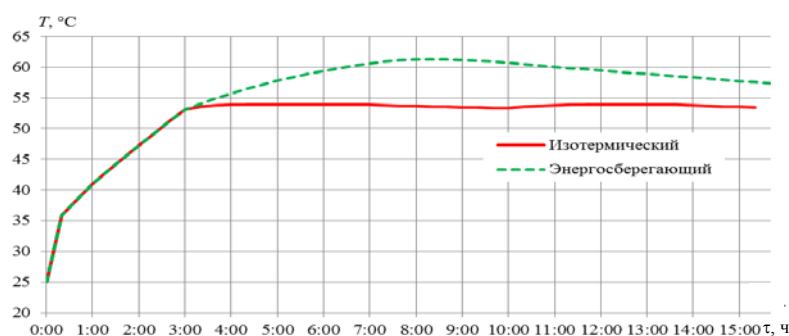


Рис. 5. Сравнительный анализ изменений температур в точке 2 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 5. Comparative analysis of temperature changes at point 2 of the product in isothermal and energy-saving heat treatment modes

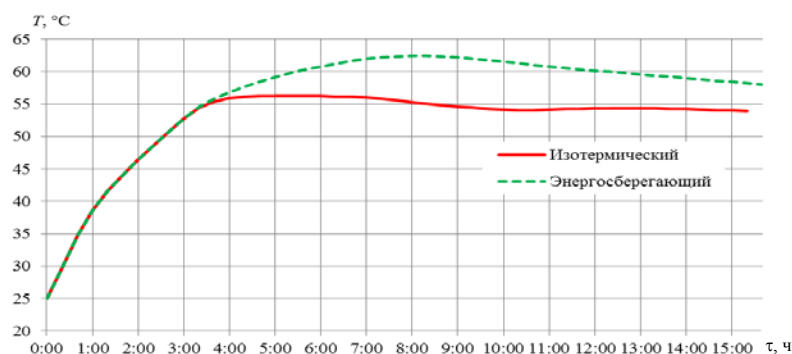


Рис. 6. Сравнительный анализ изменений температур в точке 3 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 6. Comparative analysis of temperature changes at point 3 of the product in isothermal and energy-saving heat treatment modes

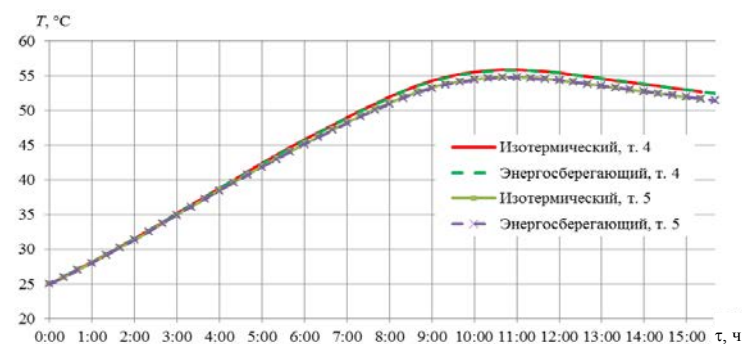


Рис. 7. Сравнительный анализ изменений температур в точках 4, 5 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 7. Comparative analysis of temperature changes at points 4, 5 of the product in isothermal and energy-saving heat treatment modes

Из рис. 7 следует, что температуры в верхнем слое бетона (точки 4, 5) для обоих режимов практически совпадают. Температура в точке 4 достигает $\sim 56^\circ\text{C}$, т. е. на 3°C выше температуры в пространственной области нагревателя, а в точке 5 составляет $\sim 54,7^\circ\text{C}$. Близкие значения температур в обоих режимах обусловлены потерями теплоты в окружающую среду через слой рулонного покрытия, которым укрыто изделие при проведении ТО.

На рис. 8, 9 видно, что степень гидратации цемента в нижнем слое бетона (точки 2, 3) для энергосберегающего режима на момент времени 15 ч оказывается более 55 %. Это лучше, чем при изотермическом режиме примерно на 2 %.

Степень гидратации цемента в верхнем слое бетона для обоих режимов практически совпа-

дает, достигая $\sim 52\%$ к концу цикла тепловой обработки. Динамика изменения коэффициента гидратации по мере тепловой обработки показана на рис. 10 на примере точки 5 (верхняя поверхность изделия).

Таким образом, выполненный с использованием математической модели [6–13] и с учетом уравнений (1)–(5) численный анализ (рис. 3–10) позволяет сделать вывод, что рассмотренный энергосберегающий режим в сравнении с применяемым в производственных условиях режимом, близким к изотермическому, обеспечивает при осуществлении ТО наружной трехслойной стеновой панели более высокие температуры нагрева слоев бетона и степень гидратации цемента в них (в особенности в нижнем слое бетона).

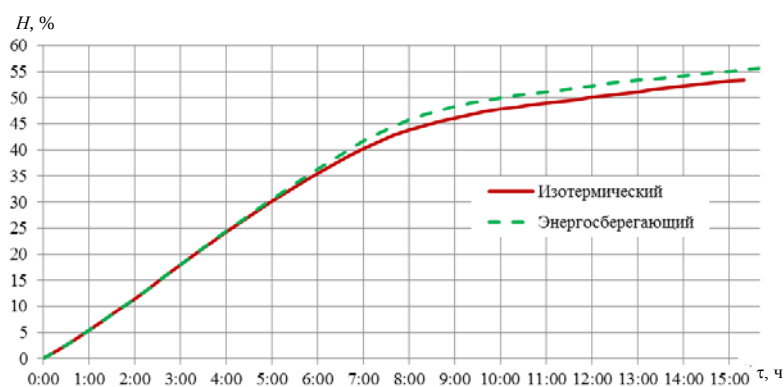


Рис. 8. Сравнительный анализ изменений коэффициента гидратации в точке 2 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 8. Comparative analysis of changes in the hydration coefficient at point 2 of the product in the isothermal and energy-saving heat treatment modes

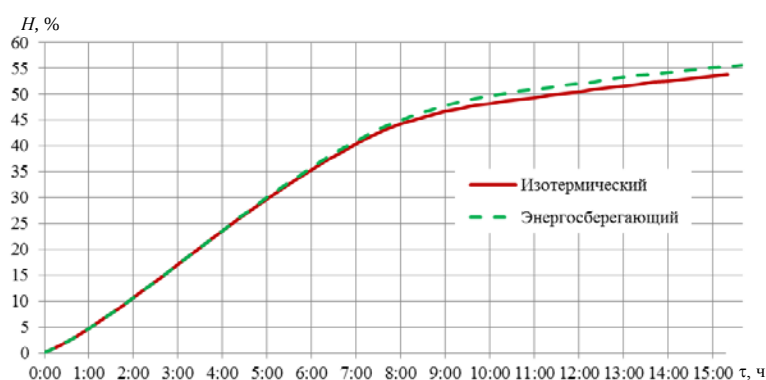


Рис. 9. Сравнительный анализ изменений коэффициента гидратации в точке 3 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 9. Comparative analysis of changes in the hydration coefficient at point 3 of the product in the isothermal and energy-saving heat treatment modes

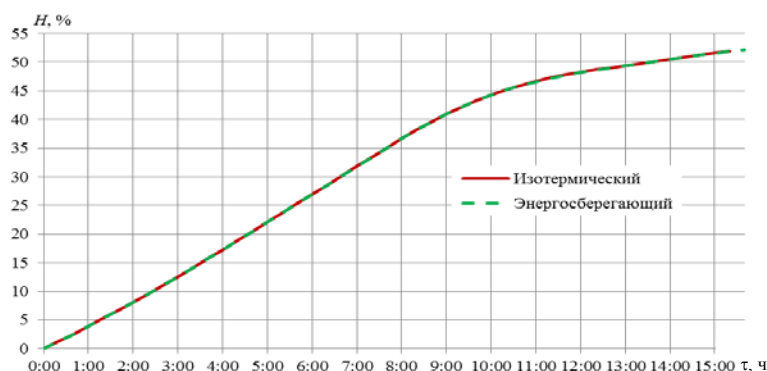


Рис. 10. Сравнительный анализ изменений коэффициента гидратации в точке 5 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 10. Comparative analysis of changes in the hydration coefficient at point 5 of the product in the isothermal and energy-saving heat treatment modes

Анализ энергоэффективности рассматриваемых режимов тепловой обработки

Для оценки энергоэффективности исследованных выше режимов тепловой обработки бетонных изделий в устройствах ускоренной гидратации введем энергетическую характеристику, отражающую совокупные затраты ТЭ на осуществление различных элементов технологического процесса, связанные с нагревом опалубки, бетонного тела, всех прочих элементов конструкции изделия, включая пенополистирол и минеральную вату, а также энергозатраты, связанные с рассеянием теплоты в процессе тепловой обработки в окружающую среду. Эта характеристика представляет собой количество ТЭ, переданной из прост-

ранственной области нагревателя, и вычисляется по формуле

$$Q_{src}(t_N) = \sum_{\tau=0..t_N} \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y+\Delta y,z) \in \Omega_2}} \alpha_w \Delta x \Delta z \Delta \tau (T(x,y,z,\tau) - T(x,y+\Delta y,z,\tau)), \quad (6)$$

где α_w – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к греющей поверхности теплотехнологической установки.

На основе указанной выше математической модели с учетом граничных условий для различных режимов тепловой обработки рассматриваемого изделия в соответствии с уравнением (6) были выполнены расчеты подведенной извне ТЭ нагревателя (Q_{src}) и его мощности ($P_{src} = \partial Q_{src} / \partial \tau$) в зависимости от времени тепловой обработки. На рис. 11, 12 показана эволюция этих величин.

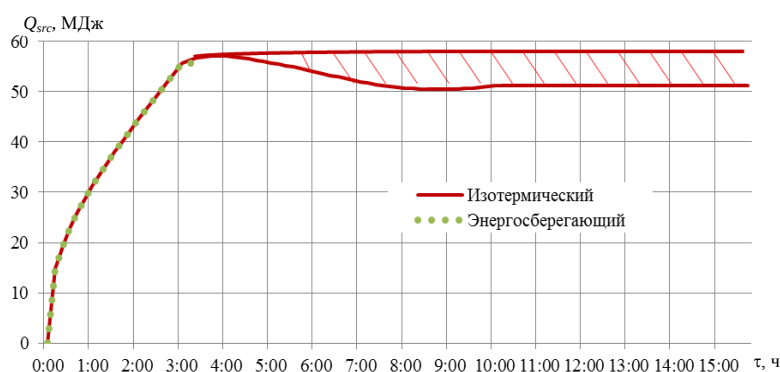


Рис. 11. Сравнение суммарных энергозатрат на тепловую обработку изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 11. Comparison of total energy consumption for heat treatment of the product in isothermal and energy-saving heat treatment modes

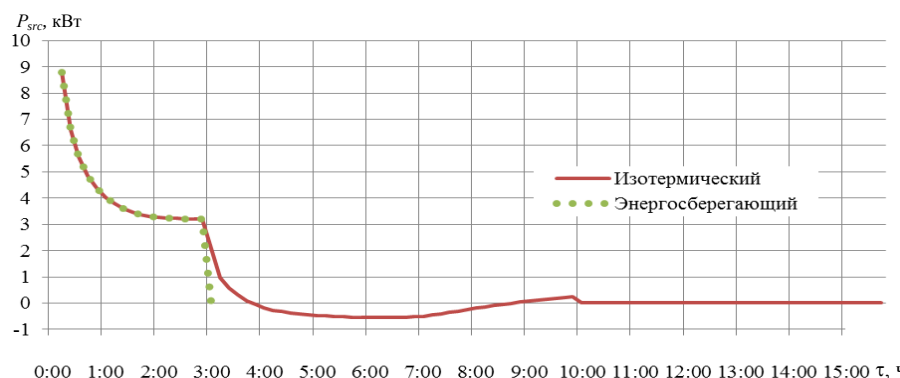


Рис. 12. Сравнение мощности нагревателя при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки изделия

Fig. 12. Comparison of heater power in isothermal and energy-saving modes of product heat treatment

Как видно из рис. 11, изотермический режим оказывается более энергозатратным (~57,1 МДж) по сравнению с энергосберегающим (~55,7 МДж). Кроме того, в процессе изотермической выдержки часть теплоты забирается теплоносителем из области протекания реакции гидратации и рассеивается. Кривая $Q_{src}(\tau)$ опускается от значения 57,1 МДж при $\tau = 4$ ч до 50,1 МДж при $\tau = 9$ ч. Разность между этими значениями (заштрихованная область на рис. 11) представляет собой потери тепловой энергии.

Из рис. 12 следует, что в течение периода времени набора температуры потребная тепловая мощность, подводимая из пространственной области нагревателей в зону ТО бетонного изделия, при обоих режимах тепловой обработки совпадает. Однако в период изотермической выдержки при изотермическом режиме в силу автоматического поддержания температуры мощность нагревателя по истечении 4 ч обработки становится отрицательной, т. е. имеет

место отвод теплоты из бетона в пространственную область нагревателей.

Основные результаты выполненных численных экспериментов представлены в табл. 1. Из анализа данных табл. 1 следует вывод, что энергосберегающий режим ТО с энергетической точки зрения является более предпочтительным по сравнению с применяемым в условиях рассматриваемого производства, обеспечивая экономию технологически необходимого минимума ТЭ в объеме 1,4 МДж в расчете на одно промышленное изделие. Дополнительно на 7,0 МДж снижается потребление ТЭ в результате уменьшения теплоотвода из пространственной области бетонного изделия в пространственную область нагревателя, имеющего место при изотермической выдержке. Таким образом, потребление ТЭ, непосредственно подводимой в пределах теплотехнологической установки к бетонному изделию в процессе ТО, уменьшается в целом на 8,4 МДж, или на 14,7 %. При этом степень гидратации цемента в бетоне изделия увеличилась на 1,2 %.

Таблица 1

Энергозатраты для изотермического и энергосберегающего тепловых режимов тепловой обработки рассматриваемого изделия

Energy consumption for isothermal and energy-saving thermal modes of heat treatment of product in question

Режим тепловой обработки	Максимальная температура в конце этапа нагрева T_{max} , °C	Время нагрева τ_{inc} , ч, + время изотермической выдержки τ_{iso} , ч	Скорость нагрева, °C/ч	Затраченная тепловая энергия Q_{src} (4 ч), МДж	Выделившаяся теплота гидратации Q_{hydr} (15 ч), МДж	Среднее значение достигнутой степени гидратации, %	Сокращение теплоотвода из зоны расположения изделия, МДж
Изотермический	53	3 + 7	9,3	57,1	115,4	52,8	—
Энергосберегающий	53	3 + 0	9,3	55,7	116,5	54,0	7,0
Энергосберегающий эффект, МДж				1,4			7,0

ВЫВОДЫ

1. На основе разработанной авторами [6–13] математической модели, с учетом 3D-геометрии изделия и пространственного распределения бетона, пенополистирола, минеральной ваты проведено численное исследование процесса тепловой обработки промышленно изготавливаемого в условиях ОАО «Строительно-монтажный трест № 16, г. Новополоцк» изделия «наружная трехслойная стеновая панель». Показана применимость математической модели для расчета режимов тепловой обработки реальных промышленных объектов сложной структуры и геометрии.

2. Предложена интегральная энергетическая характеристика $Q_{src}(\tau)$, выражающая суммарные затраты тепловой энергии на реализацию технологического процесса тепловой обработки бетонного изделия сложной геометрической формы и структуры в установке ускоренной гидратации, вычисляемая в соответствии с моделью и алгоритмом, описанными в [6–13], с учетом проведенных в настоящей работе исследований. Выполнен расчет указанной характеристики, а также мощности нагревателя для двух рассмотренных режимов тепловой обработки. Показано, что энергосберегающий режим тепловой обработки, по сравнению с используемым на предприятии, обеспечивает экономию тепловой энергии в объеме не менее 2,45 %. Произведенные расчеты коэффициента гидратации $H(x, y, z, \tau)$ и температуры в точках изделия $T(x, y, z, \tau)$ свидетельствуют, что энергосберегающий режим тепловой обработки обеспечивает более полное протекание процесса гидратации по сравнению с изотермическим режимом.

3. Полученные метод и модели могут быть использованы при исследованиях, расчете, оптимизации схем, параметров и режимов работы промышленного теплотехнологического оборудования, предназначенного для проведения ускоренной гидратации цемента в композитных бетонных изделиях сложной геометрической формы с целью повышения его энергетической эффективности и обеспечения рациональной эксплуатации, а также при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами при промышленном производстве бетонных изделий в теплотехнологических установках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марьямов, Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н. Б. Марьямов. М.: Стройиздат, 1970. 272 с.
2. Соколовский, Л. В. Снижение расхода тепла при производстве бетона и железобетона [Электронный ресурс] / Л. В. Соколовский // Строительство и недвижимость. 2001. № 18. Режим доступа: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2001/18/sn11806.html>. Дата доступа: 08.03.2019.
3. Временные нормы для расчета расхода тепловой энергии при тепловлажностной обработке сборных бетонных и железобетонных изделий в заводских условиях: СН 513–79. М.: Стройиздат, 1980. 30 с.
4. Аксенчик, К. В. Совершенствование тепловой работы пропарочных камер для тепловлажностной обработки железобетонных изделий / К. В. Аксенчик. Иваново, 2014. 20 с.
5. Аксенчик, К. В. Оценка энергетической эффективности тепловых установок для тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий / К. В. Аксенчик // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. по матер. Междунар. заочной науч.-практ. конф. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВЛГТА», 2014. № 3. Ч. 1. С. 204–211.
6. Нияковский, А. М. Разработка математической модели процесса твердения бетона на основе трехмерного уравнения теплопроводности / А. М. Нияковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. 2018. № 16. С. 72–79.
7. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования на основе численного моделирования нестационарных процессов / А. М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191>.
8. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский [и др.] // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 2. С. 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145>.
9. Дискретная оптимизация программно управляемых режимов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292>.
10. Нияковский, А. М. Алгоритм и численная схема моделирования нестационарных процессов тепловой обработки бетонных изделий / А. М. Нияковский, Ю. В. Яцкевич, А. Н. Чичко // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С. Фундаментальные науки. Информационные технологии. 2019. № 4. С. 50–61.
11. Численное моделирование эволюции энергетических характеристик процесса тепловой обработки композитного бетонного изделия / А. М. Нияковский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. Т. 723, № 3. С. 86–100.

12. Нестационарная модель процесса гидратации железобетонного изделия, находящегося в программно-нагреваемой среде / А. М. Нияковский [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2019. Т. 63, № 4. С. 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505>.
13. Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий / А. М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-307-324>.

Поступила 22.07.2019

Подписана в печать 08.02.2021

Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Mar'yamov N. B. (1970) *Heat Treatment of Products at the Plant of Precast Concrete (Processes and Installations)*. Moscow, Stroiizdat Publ. 272 (in Russian).
2. Sokolovskii L. V. (2001) Reduction of Heat Consumption in the Production of Concrete and Reinforced Concrete. *Stroitel'stvo i Nedvizhimost* [Construction and Real Estate], (18). Available at: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2001/18/sn11806.html> (Accessed 8 March 2019) (in Russian).
3. SN [Construction Norms] 513–79. *Provisional Norms for Calculation of Heat Energy Consumption During Heat and Moisture Treatment of Precast Concrete and Reinforced Concrete Products in the Factory*. Moscow, Stroiizdat Publ. 1980. 30 (in Russian).
4. Aksenchik K. V. (2014) *Improvement in Thermal Operation of Steam-Curing Chambers for Hygro-Thermal Treatment of Reinforced Concrete Products*. Ivanovo. 20 (in Russian).
5. Aksenchik K. V. (2014) Assessment of Energy Efficiency of Thermal Installations for Heat and Humidity Treatment of Concrete and Reinforced Concrete Products. *Aktualnye Napravleniya Nauchnykh Issledovaniy XXI Veka. Teoriya i Praktika. Sb. Nauch. Tr. po Mater. Mezhdunar. Zaochnoi Nauch.-Prakt. Konf.* [Topical Directions of Scientific, Research of the XXI Century. Theory and Practice. Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the International Correspondence Scientific-and-Practical Conference]. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies, (3), Part 1, 204–211 (in Russian).
6. Niyakovskii A. M. (2018) Development of a Mathematical Model of Concrete Hardening Process Based on Three-Dimensional Equation of Thermal Conductivity. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. F. Stroitel'stvo. Prikladnye Nauki* [Herald of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences], (16), 72–79 (in Russian).
7. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Improving the Energy Efficiency of Heat-Technical Equipment on the Basis of Numerical Simulation of Non-Stationary Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191> (in Russian).
8. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yaczkevich Yu. V. (2019) Verification of Non-Stationary Mathematical Model of Concrete Hardening in Thermal Technological Installations. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 18 (2), 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145> (in Russian).
9. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Discrete Optimization of Software-Controlled Modes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat-Technological Facilities. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292> (in Russian).
10. Niyakovskii A. M., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Algorithm and Numerical Scheme for Simulation of Unsteady Processes of Heat-Treatment of Concrete Products. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. C. Fundamental'nye Nauki. Informatsionnye Tekhnologii* [Herald of Polotsk State University. Series. C. Fundamental Sciences. Information Technologies], (4), 50–61 (in Russian).
11. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yaczkevich Yu. V. (2019) Numerical Simulation of the Evolution of Energy Characteristics of Heat Treatment of a Composite Concrete Product. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (3), 86–100 (in Russian).
12. Niyakovskii A. M., Romaniuk U. N., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) Unsteady Model of the Hydration Process of a Reinforced Concrete Product at Software-Controlled Heating. *Doklady Natsional'noi Akademii Nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 63 (4), 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505> (in Russian).
13. Niyakovskii A. M., Romaniuk U. N., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) The Method of Calculation of the Evolution of Thermal and Energy Characteristics of the Accelerated Hydration Process of Concrete Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-307-324> (in Russian).

Received: 22.07.2019

Accepted: 08.02.2021

Published online: 31.05.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-207-215>

УДК 666.97

Оценка термонапряженного состояния бетонного массива

Кандидаты техн. наук, доценты С. Н. Ковшар¹⁾, П. В. Рябчиков¹⁾,
инж. С. В. Гущин¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье изложена методика оценки термонапряженного состояния бетонного массива фундаментной плиты, изготовленной из самоуплотняющейся бетонной смеси. Предлагаемая методика заключается в предварительном расчете температурных полей в твердеющем бетоне. Объектами исследований являлись самоуплотняющаяся бетонная смесь и конструкционный бетон в массиве конструкции. Приведен и обоснован выбор материалов для приготовления бетонной смеси. Для оценки термонапряженного состояния использован состав самоуплотняющегося бетона. С целью снижения величины саморазогрева бетона применяли вяжущее с пониженной экзотермией. Выполнены исследования по оценке удельного тепловыделения рекомендованного цемента в зависимости от начального водоцементного отношения. Изучено влияние химической добавки на скорость и величину удельного тепловыделения цемента. Приведены основные теоретические положения и алгоритм расчета термонапряженного состояния бетонного массива. Для расчета ожидаемых температур и их распределения в массиве конструкции использовали метод конечных разностей, а для оценки термонапряженного состояния рассчитывали температурные напряжения в сечениях бетонного массива. Выполненные расчеты температурных полей позволили оценить максимально возможные температуры и температурные перепады по сечениям бетонного массива в зависимости от начальной температуры бетонной смеси и среднесуточной температуры наружного воздуха. Анализ распределения температур выявил наиболее опасные сечения бетонного массива. На основании результатов расчета температурных полей проведена оценка термонапряженного состояния бетонного массива. Выполнен расчет температурных напряжений в наиболее опасных сечениях бетонного массива. Показано, что характеристикой термонапряженного состояния бетонного массива может служить расчетная величина температурного напряжения. Образование температурных трещин в бетонном массиве возможно при превышении расчетного значения температурного напряжения над фактической прочностью бетона на растяжение. Сравнение расчетных и фактических значений температур в сечениях фундаментной плиты позволило сделать вывод о правильности выполненных расчетов температурных полей и, как следствие, о возможных температурных деформациях.

Ключевые слова: бетон, экзотермия, температура, саморазогрев, удельное тепловыделение, температурные поля

Для цитирования: Ковшар, С. Н. Оценка термонапряженного состояния бетонного массива / С. Н. Ковшар, П. В. Рябчиков, С. В. Гущин // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 207–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-207-215>

Assessment of Thermally Stressed State of Concrete Massif

S. N. Kovshar¹⁾, P. V. Ryabchikov¹⁾, S. V. Gushchin¹⁾

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

Abstract. The paper describes a technique for assessing the thermally stressed state of a concrete massif of a foundation slab made of a self-compacting concrete mixture. The proposed method consists in a preliminary calculation of temperature fields in hardening concrete. The objects of research have been self-compacting concrete mix and structural concrete in the structure

Адрес для переписки

Ковшар Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-73
smits@bntu.by

Address for correspondence

Kovshar Sergey N.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-73
smits@bntu.by

mass. The choice of materials for the preparation of a concrete mixture is given and substantiated. The composition of self-compacting concrete has been used to assess the thermally stressed state. A binder with a reduced exotherm has been used in order to reduce the self-heating of concrete. Studies have been carried out to assess the specific heat release of the recommended cement depending on the initial water-cement ratio. The effect of a chemical additive on the rate and magnitude of the specific heat release of cement has been studied. The paper presents the main theoretical provisions and an algorithm for calculating the thermal stress state of a concrete massif. The finite difference method has been used to calculate the expected temperatures and their distribution in the structure mass, and the temperature stresses in the sections of the concrete mass have been calculated to assess the thermally stressed state. The performed calculations of the temperature fields have made it possible to estimate the maximum possible temperatures and temperature differences over the sections of the concrete massif depending on the initial temperature of the concrete mixture and the average daily temperature of the outside air. Analysis of the temperature distribution has revealed the most dangerous sections of the concrete mass. An assessment of the thermal stress state of the concrete mass has been made on the basis of the results pertaining to calculation of temperature fields. The calculation of temperature stresses in the most dangerous sections of the concrete massif has been performed. It is shown that the calculated value of the temperature stress can serve as a characteristic of the thermally stressed state of the concrete mass. The formation of temperature cracks in a concrete mass is possible when the calculated value of the temperature stress exceeds the actual tensile strength of concrete. Comparison of the calculated and actual values of temperatures in the sections of the foundation slab has made it possible to conclude that the calculations of the temperature fields and, as a consequence, possible temperature deformations are correct.

Keywords: concrete, exotherm, temperature, self-heating, specific heat release, temperature fields

For citation: Kovshar S. N., Ryabchikov P. V., Gushchin S. V. (2021) Assessment of Thermally Stressed State of Concrete Massif. *Science and Technique*. 20 (3), 207–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-207-215> (in Russian)

Введение

Температурное воздействие вызывает изменение напряженно-деформированного состояния сооружений как в строительный, так и в эксплуатационный периоды [1, 2].

Температурный режим бетонного массивного блока формируется под воздействием многих факторов. К ним относятся: экзотермия цемента, состав бетона (расход цемента, водоцементное отношение, наличие химических и минеральных добавок, влияющих на экзотермию цемента) и внешние факторы (температура воздуха, температура основания и опалубки, воздействие инсоляции, наличие ветра и его направление). Кроме того, на формирование температурного поля влияют множество технологических факторов: схема бетонирования, температура укладываемого бетона, толщина укладываемых бетонных слоев, интенсивность бетонирования, использование искусственного охлаждения бетонного массива и т. д.

В процессе возведения массива и интенсивного тепловыделения цемента происходит значительный нагрев внутренней зоны массива. В результате этого могут возникать большие температурные перепады, которые вызывают существенные растягивающие напряжения и приводят к трещинообразованию бетона наружных слоев конструкции [3]. Возникновение температурных трещин связано с температурными перепадами между центральной

частью конструкции и слоями бетона ее наружной поверхности. Допустимая разность температур может быть принята между ядром массива и боковыми поверхностями 15–25 °С, между ядром и открытой поверхностью конструкции – до 20 °С [4]. Точные значения разности температур могут быть получены в результате расчета температурных полей и термонапряженного состояния бетонного массива. Для оценки вероятности образования трещин в бетонном массиве можно также использовать величину градиента температур по сечению конструкции, которая не должна превышать 50 °С/м [5].

Материалы и состав бетона

В качестве вяжущего для приготовления бетонной смеси был выбран шлакопортландцемент (табл. 1). Выбор данного вяжущего обусловлен уменьшением возможной величины саморазогрева бетона за счет использования цемента с пониженной экзотермией [6].

В качестве крупного заполнителя для бетона применяли гранитный щебень производства РУПП «Гранит» фракции 5–20 мм 1-й группы с прочностью, соответствующей марке по дробимости ≥ 1400 [6]. Заполнитель – природный (мытый) песок по ГОСТ 8736–2014 с модулем крупности от 2,0 до 2,5 и с содержанием пылевидных и глинистых частиц до 2 % по массе [6].

Таблица 1

Характеристики цемента

Cement characteristics

Завод-изготовитель	Марка (класс) цемента	Активность цемента, МПа		Вещественный состав цемента, %*		$K_{нт}$	$H_{сх}$, мин
		2 сут.	28 сут.	Клинкерная часть*	Доменный шлак		
ОАО «Белорусский цементный завод»	ЦЕМ II/В-III 42,5Н	15,3	44,7	60–65	35–40	0,275	230

*Клинкерная часть с учетом содержания 3–4 % гипса.

Поскольку конструкцию планировалось бетонировать с использованием самоуплотняющейся бетонной смеси, в составе последней предусмотрели применение минеральной и химической добавок. В качестве таких были выбраны соответственно микрокремнезем по СТБ EN 13263-1-2012 [6] с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе и суперпластификатор «Линамикс ПК». Для выполнения расчетов по распределению температурных полей принимали состав бетонной смеси, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Состав бетонной смеси

Concrete mix composition

Расход составляющих, кг на 1 м ³ бетонной смеси					
Цемент	Песок	Щебень	Минеральная добавка	Химическая добавка	Вода
400	930	930	44	10,36	170

Оценка удельного тепловыделения цемента

Для выполнения расчетов по возможному распределению температурных полей в бетонном массиве необходимы данные о величине удельного тепловыделения цемента. Для его определения использовали разработанную в БНТУ установку (рис. 1).

Принцип проведения испытаний в установке в основном аналогичен определению теплоты гидратации цемента термосным методом [7]. Однако от классической установки остается только один принцип – измерение кинетики изменения температуры, вначале обычно возрастающей, а затем плавно снижающейся. Для фиксации изменяющейся температуры использовали малогабаритные беспроводные датчики DS 1921 системы «Термохрон», показавшие свою эффективность при исследовании тепловых процессов [8–10].

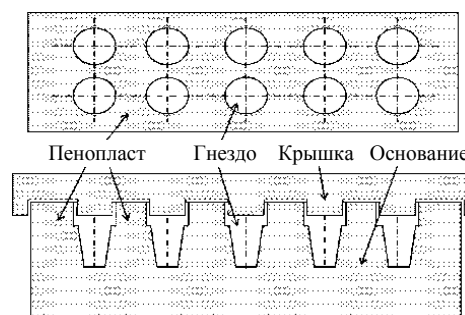


Рис. 1. Схема установки для определения кинетики изменения температуры твердеющего цементного теста

Fig. 1. Installation diagram for determining kinetics temperature changes of hardening cement paste

Влияние начального водосодержания и пластифицирующей добавки на кинетику тепловыделения цемента оценивали на цементном тесте с водоцементным отношением от 0,275 до 0,500, что соответствует водосодержанию X от 1,0 до 1,8.

Для оценки влияния пластифицирующей добавки на цементное тесто (при указанных выше водоцементных отношениях) вводили добавку в количестве 1 % от массы цемента по сухому веществу. Количество воды при этом оставалось постоянным. На рис. 2, 3 приведены результаты оценки изменения температуры цементного теста, твердеющего в калориметре в течение 40 ч.

Анализ данных рис. 2, 3 показывает, что с увеличением водоцементного отношения максимальная температура саморазогрева цементного теста закономерно снижается. Это связано с уменьшением количества вяжущего в объеме цементного теста при увеличении В/Ц. Введение пластифицирующей добавки позволяет: во-первых, снизить максимальную температуру саморазогрева, и тем больше, чем выше водоцементное отношение, и, во-вторых, существенно замедлить время достижения максимальной температуры саморазогрева.

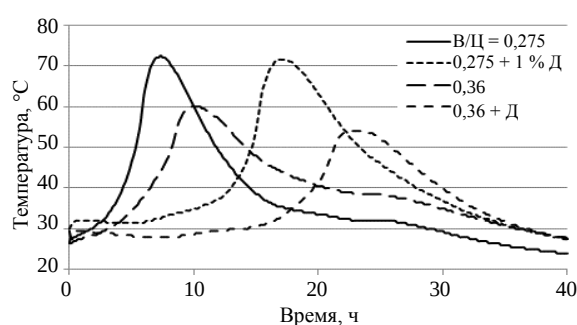


Рис. 2. Изменение температуры при твердении цементного теста с водоцементным отношением 0,275 и 0,36 без добавки и с добавкой пластификатора

Fig. 2. Temperature change during hardening of cement paste with water-cement ratio of 0.275 and 0.36 without and with addition of plasticizer

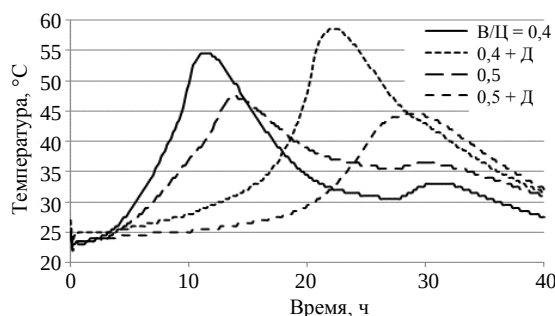


Рис. 3. Изменение температуры при твердении цементного теста с водоцементным отношением 0,4 и 0,5 без добавки и с добавкой пластификатора

Fig. 3. Temperature change during hardening of cement paste with water-cement ratio of 0.4 and 0.5 without and with addition of plasticizer

После обработки экспериментальных данных построены кривые удельного тепловыделения цемента, представленные на рис. 4, 5.

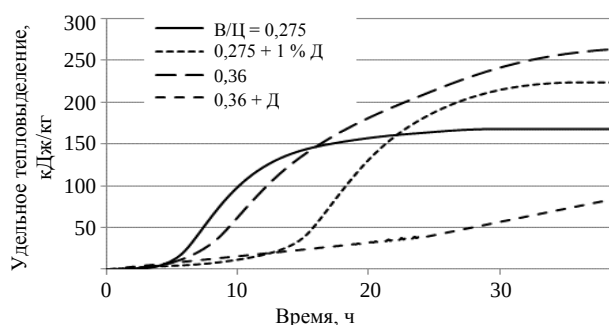


Рис. 4. Удельное тепловыделение цемента во времени для цементного теста с водоцементным отношением 0,275 и 0,36 без добавки и с добавкой пластификатора

Fig. 4. Specific heat release of cement over time for cement paste with water-cement ratio of 0.275 and 0.36 without and with addition of plasticizer

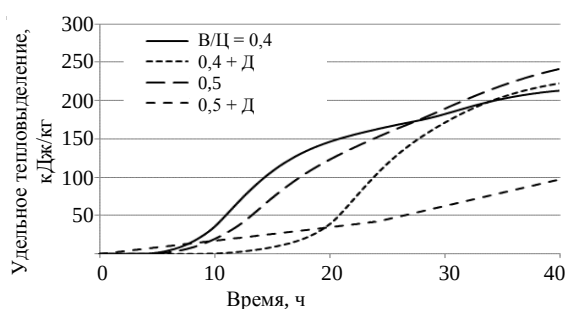


Рис. 5. Удельное тепловыделение цемента во времени для цементного теста с водоцементным отношением 0,4 и 0,5 без добавки и с добавкой пластификатора

Fig. 5. Specific heat release of cement over time for cement paste with water-cement ratio of 0.4 and 0.5 without and with addition of plasticizer

Анализ данных рис. 4, 5 показывает, что введение пластифицирующей добавки в количестве 1 % от массы цемента позволяет существенно замедлить тепловыделение цемента в первые сутки твердения. В дальнейшем (после торможения) величина тепловыделения цемента с добавкой либо равна, либо превосходит величину тепловыделения цемента без добавки.

Основные теоретические положения и алгоритм расчета термонапряженного состояния в бетонном массиве

В расчетах термонапряженного состояния массивных бетонных конструкций последовательно решаются две задачи:

– определение температурных полей (термическая задача);

– установление напряжений в бетоне, возникающих от изменения температуры и ее неравномерного распределения.

Для расчета температурных полей в твердеющем бетоне за основу принимают дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье для систем с внутренними равномерно распределенными источниками теплоты [11]

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t + \frac{1}{c\gamma} \cdot \frac{\partial Q}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности; ∇^2 – оператор Лапласа; c – удельная теплоемкость; γ – плотность.

Расчеты температурных полей производили по методу конечных разностей.

Удельное тепловыделение цемента (бетона), определенное экспериментально, пересчитывали на изотермическое тепловыделение (при постоянной температуре), получая уравнение следующего вида [11]:

$$Q = Q_{\max} \left[1 - (1 + A_{20} \tau)^{-0,833} \right], \quad (2)$$

где Q – текущее тепловыделение цемента; $Q_{\max}$ – максимальное тепловыделение цемента; A_{20} – коэффициент темпа тепловыделения цемента при постоянной температуре твердения 20 °C, сут.⁻¹

Изменение темпа (скорости) тепловыделения в зависимости от изменения температуры бетона учитывали коэффициентом A_t , который определяли по формуле [11]

$$A_t = A_{20} \cdot 2^{\frac{t-20}{10}}. \quad (3)$$

Повышение температуры в заданном сечении за интервал времени Δt вследствие тепловыделения определяли согласно [11]

$$\Delta t_Q = \frac{Q_{\max}}{c\gamma} \Delta \varepsilon, \quad (4)$$

где $\Delta \varepsilon$ – коэффициент темпа тепловыделения бетона при постоянной температуре твердения 20 °C, сут.⁻¹

В (4) $\Delta \varepsilon$ – приращение относительного тепловыделения бетона за интервал времени Δt , которое определяли по формуле [11]

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_t - \varepsilon_{t-\Delta t}, \quad (5)$$

где ε_t – относительное тепловыделение бетона к моменту времени t , определяемое как [11]

$$\varepsilon_t = \frac{Q_t}{Q_{\max}}. \quad (6)$$

Выполнив расчеты температурных полей в бетонном массиве, переходим к расчету термонапряженного состояния. Для этого определим температурные напряжения [1]

$$\sigma = E \alpha \Delta t, \quad (7)$$

где E – модуль упругости бетона, МПа; α – коэффициент линейного расширения бетона, 1/°C; Δt – перепад температур, °C.

Изменение модуля упругости бетона по времени [11]

$$E(\tau) = E_0 (1 - \vartheta e^{-\beta \tau}), \quad (8)$$

где E_0 – значение модуля упругости бетона при прочности, соответствующей проектному классу, МПа; ϑ , β – параметры, зависящие от вида бетона, могут быть приняты равными соответственно 1,0 и 0,0086; τ – время твердения, ч.

Расчет температурных полей при твердении бетона массивной конструкции

Объем бетонируемой конструкции составлял 9000 м³. Расчет температурных полей в твердеющем бетоне проводили методом конечных разностей [11] с использованием ПЭВМ. При выполнении расчетов высота бетонного массива была принята по проектной документации и составляла 3,5 м. Исходя из заданной высоты конструкции, минимальное количество сечений для требуемой точности расчетов температурных полей должно составлять не менее семи. Также, исходя из предполагаемой схемы бетонирования конструкции (непрерывное бетонирование горизонтальными слоями со скоростью 1 м/сут.), количество сечений целесообразно принять не менее семи. Окончательно при выполнении расчетов количество сечений было принято равным семи с расстоянием между сечениями 500 мм. При расчете температур второго и последующих сечений за начальную температуру бетона принимали среднюю температуру нижележащего сечения к моменту начала бетонирования слоя, в котором расположено сечение. Расчеты производились для двух вариантов при среднесуточной температуре наружного воздуха 15 и 20 °C. Расчет температуры выполняли для 10 сут. твердения бетонного массива.

Результаты расчетов распределения температур по сечениям бетонного массива представлены на рис. 6, 7.

Выполненные расчеты температурных полей (рис. 6, 7) показывают, что максимальный перепад температур не превышает 17 и 24 °C при среднесуточной температуре наружного воздуха соответственно 15 и 20 °C.

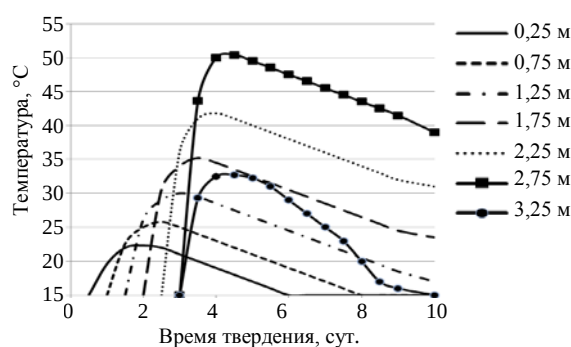


Рис. 6. Расчетное изменение температуры по сечениям бетонного массива при твердении в течение 10 сут. при среднесуточной температуре наружного воздуха и температуре бетонной смеси 15 °C

Fig. 6. Calculated temperature change over sections of concrete mass during hardening for 10 days at average daily temperature of outside air and temperature of concrete mixture 15 °C

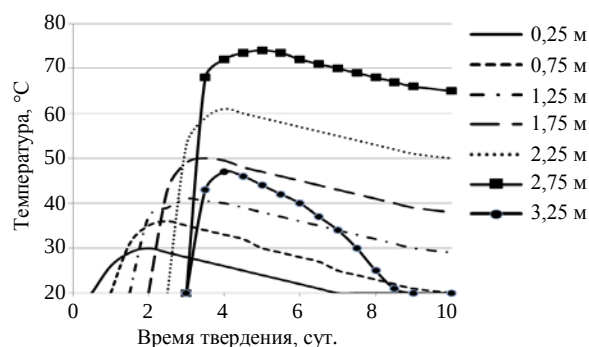


Рис. 7. Расчетное изменение температуры по сечениям бетонного массива при твердении в течение 10 сут. при среднесуточной температуре наружного воздуха и температуре бетонной смеси 20 °C

Fig. 7. Calculated temperature change over sections of concrete mass during hardening for 10 days at average daily outside air temperature and concrete mixture temperature of 20 °C

По результатам расчета максимальная температура саморазогрева возможна в сечении 2,75 м и составляет 51 и 75 °C при среднесуточной температуре наружного воздуха соответственно 15 и 20 °C. Анализ распределения температур показывает, что максимальный их перепад возможен между сечениями 2,75–3,25 м и 1,75–2,75 м (рис. 8). Нетрудно предположить, что в этих сечениях температурные напряжения будут иметь максимальные значения.

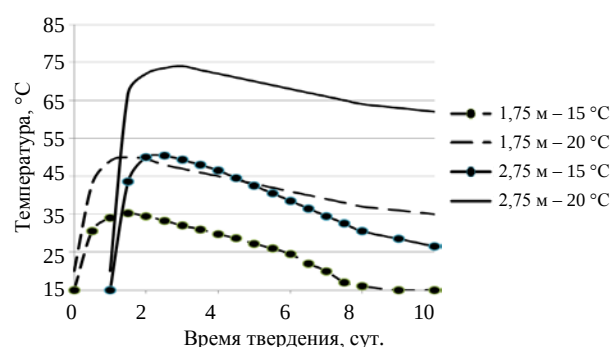


Рис. 8. Расчетное изменение температуры в сечениях 1,75 и 2,75 м бетонного массива при среднесуточной температуре 15 и 20 °C

Fig. 8. Calculated temperature change in sections 1.75 and 2.75 m of concrete mass at average daily temperature of 15 and 20 °C

Оценка термонапряженного состояния бетонного массива

Согласно расчетным данным, приведенным на рис. 6, 7, максимальный перепад температуры возможен между сечениями 2,75 и 3,25 м, 1,75 и 2,75 м соответственно. Перепадом температур между сечениями 2,75 и 3,25 м можно управлять технологическими приемами, изменяя (снижая) величину теплоотдачи верхнего слоя конструкции. Таким образом, оценку температурных напряжений проводили для сечений бетонного массива (1,75 и 2,75 м), между которыми на основании расчета возможен максимальный перепад температур и влияют на которые технологически не представляется возможным. Результаты расчета сведены в табл. 3.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что максимальное значение температурных напряжений наблюдается при среднесуточной температуре наружного воздуха 20 °C в возрасте около 3 сут. твердения, а при среднесуточной температуре наружного воздуха 15 °C – около 4 сут. твердения.

Для оценки вероятности образования трещин в бетонном массиве в наиболее опасных сечениях 1,75 и 2,75 м необходимо иметь значение прочности бетона на осевое растяжение. Условие отсутствия трещин в бетонном массиве

$$f_{ct} \geq \sigma. \quad (9)$$

Таблица 3

Расчетные значения температурных напряжений бетонного массива

Calculated values of temperature stresses of concrete massif

Время твердения, сут.	Исходные данные и расчетные температурные напряжения в бетонном массиве при температуре твердения							
	15 °C				20 °C			
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$E_0, \text{МПа}$	$E(\tau), \text{МПа}$	$\sigma, \text{МПа}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$E_0, \text{МПа}$	$E(\tau), \text{МПа}$	$\sigma, \text{МПа}$
0	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5	–	–	–	–	–	–	–	–
1	12	37000	6900	0,69	18	37000	6900	1,24
2	16	37000	12514	2,00	24	37000	12514	3,00
3	17	37000	17080	2,90	20	37000	17080	3,42
4	15	37000	20795	3,11	16	37000	20795	3,33
5	11	37000	23817	2,62	12	37000	23817	2,85

С достаточной для практических целей точностью прочность бетона на осевое растяжение можно определить по формуле

$$f_{ct} = 0,29 f_{cube}^{0,6}, \quad (10)$$

где $f_{cube}^{0,6}$ – прочность бетона на сжатие, МПа.

Для определения значения прочности бетона на сжатие в эквивалентном возрасте использовали ранее полученные результаты по оценке кинетики твердения бетона [6]. Прочность бетона на сжатие определяли интерполяцией в зависимости от возраста и средней температуры твердения бетона, которую, в свою очередь, также определяли интерполяцией по результа-

там расчета температурных полей в бетонном массиве.

В табл. 4 приведены результаты расчета прочности на осевое растяжение бетона и температурных деформаций в двух сечениях бетонного массива при твердении со средней температурой наружного воздуха 15 и 20 °C.

Анализ данных, приведенных в табл. 4, показывает, что возраст 2–4 сут. является критическим для бетона. В этот период высока вероятность образования температурных трещин. Также следует отметить, что снижение температуры наружного воздуха на 5 °C уменьшает вероятность образования трещин в бетонном массиве.

Таблица 4

Расчетные значения прочности бетона на осевое растяжение и температурных деформаций бетонного массива в сечениях «1,75 м» и «2,75 м»

Calculated values of concrete axial tensile strength and thermal deformations of concrete massif in sections “1.75 m” and “2.75 m”

Время твердения, сут.	Расчетные значения прочности на осевое растяжение и температурных деформаций бетона фундаментной плиты при температуре твердения											
	15 °C в сечениях						20 °C в сечениях					
	1,75 м			2,75 м			1,75 м			2,75 м		
	$f_{ct}, \text{МПа}$	$\sigma, \text{МПа}$	$f_{ct} - \sigma, \text{МПа}$	$f_{ct}, \text{МПа}$	$\sigma, \text{МПа}$	$f_{ct} - \sigma, \text{МПа}$	$f_{ct}, \text{МПа}$	$\sigma, \text{МПа}$	$f_{ct} - \sigma, \text{МПа}$	$f_{ct}, \text{МПа}$	$\sigma, \text{МПа}$	$f_{ct} - \sigma, \text{МПа}$
0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1	1,6	0,7	0,9	2,3	0,7	1,6	2,3	1,2	1,1	2,9	1,2	1,7
2	2,3	2,0	0,3	3,1	2,0	1,1	3,1	3,0	0,1	3,3	3,0	0,3
3	3,0	2,9	0,1	3,4	2,9	0,5	3,4	3,4	0	3,5	3,4	0,1
4	3,3	3,1	0,2	3,5	3,1	0,4	3,5	3,3	0,2	3,5	3,3	0,2
5	3,4	2,6	0,8	3,5	2,6	0,9	3,5	2,8	0,7	3,6	2,8	0,8

Сравнение расчетных и фактических значений температур в сечениях фундаментной плиты

Бетонирование фундаментной плиты производилось в период с 14 по 16 сентября 2020 г. Суммарно было уложено 9063 м³ бетонной смеси. Для контроля температур в процессе твердения фундаментной плиты использовали резистивные датчики температуры (термометры сопротивления), которые устанавливали на трех высотных отметках (100, 1750 и 3400 мм от основания плиты). Температурные датчики крепились к арматурному стержню проволочными скрутками и устанавливались в арматурный каркас фундаментной плиты непосредственно перед бетонированием. Датчики, установленные по периметру фундаментной плиты, размещались на расстоянии не менее 1000 мм от опалубки. Температуру контролировали в 99 точках по сечению плиты.

На рис. 9 представлен график изменения расчетных и фактических значений максимальных температур саморазогрева бетона по высоте фундаментной плиты.

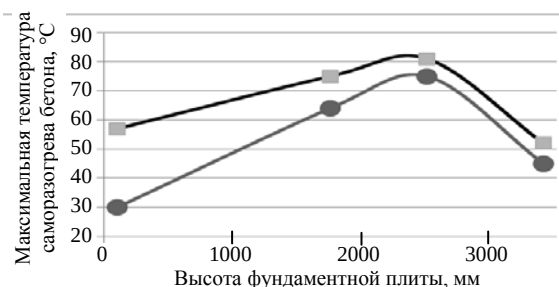


Рис. 9. Расчетные и фактические значения максимальных температур саморазогрева бетона по высоте фундаментной плиты: —●— расчет; —■— факт

Fig. 9. Calculated and actual values of maximum temperatures of concrete self-heating in height of foundation slab: —●— calculation; —■— actual

Анализ тенденции изменения расчетных и фактических значений максимальных температур саморазогрева бетонного массива по высоте фундаментной плиты (рис. 9) позволяет сделать вывод о возможных причинах расхождений расчетных и фактических значений температур:

- расчет выполнялся для средней температуры наружного воздуха 20 °С. Фактическая температура воздуха при бетонировании центральной части плиты (в отметках от –11950 до –10950) изменялась в диапазоне от 22 до 24 °С (повышение температуры воздуха на 5 °С приводит к повышению температуры саморазогрева бетона на (15–20) °С);

- в расчетах скорость бетонирования принималась 3000 м³/сут. По факту скорость бетонирования составила 5170 м³/сут. Увеличение скорости бетонирования могло привести к повышению температуры саморазогрева бетона на (5–10) °С;

- при выполнении расчета теплопоглощающая способность основания принималась максимальной (как наиболее неблагоприятный вариант с позиции перепада температур между нижним сечением плиты и ее центром). Фактические значения температур в нижнем сечении плиты свидетельствуют о достаточно низкой теплопоглощающей способности основания, что существенно снизило перепад температур и, следовательно, величину температурных деформаций.

На рис. 10 показаны кривые изменения средней температуры саморазогрева бетона по сечениям фундаментной плиты в зависимости от продолжительности твердения, построенные на основании данных контроля (мониторинга) температур.

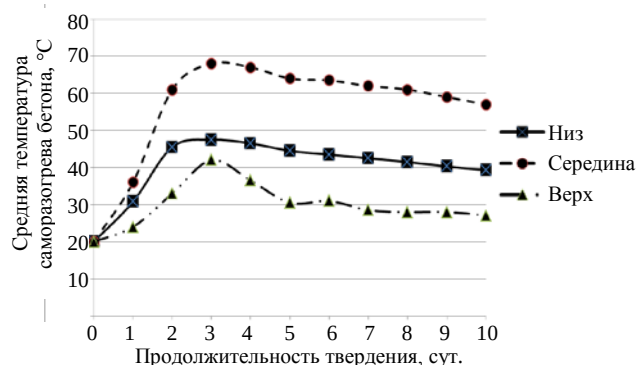


Рис. 10. Изменение средней температуры саморазогрева бетона по сечениям фундаментной плиты в зависимости от продолжительности твердения

Fig. 10. Average temperature change in concrete self-heating along sections of foundation slab depending on duration of hardening

ВЫВОДЫ

1. Характеристикой термонапряженного состояния бетонного массива может служить расчетная величина температурного напряжения. Выполненные расчеты температурных полей для твердеющего бетона заданного состава на цементе с пониженной экзотермией позволили определить величины температурных напряжений в наиболее опасных сечениях бетонного массива. Из расчетных данных следует, что критическим для твердеющего бетона является

возраст 2–4 сут. В этот период высока вероятность образования температурных трещин.

2. Снижение температуры наружного воздуха на 5 °С уменьшает вероятность образования трещин в бетонном массиве. Сравнение фактических значений температур с расчетными показало правильность принятой методики расчета температурных полей. Незначительные отклонения расчетных значений температур от фактических связаны с условиями ведения бетонных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ahmad, S. Controlling Temperatures in Mass Concrete / S. Ahmad // 34th Conference on Our World in Concrete & Structures, 16–18 Aug. 2009. Singapore, 2009. 9 p.
2. Analysis of Cracking Risk in Early Age Mass Concrete with Different Aggregate Types / B. Klemczak [et al.] // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. P. 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.209>.
3. Анишкин, Н. А. Прогноз трещинообразования бетонных массивных плотин при возведении в суровых климатических условиях / Н. А. Анишкин, Х. Нгуен // *Вестник МГСУ*. 2014. № 8. С. 165–178. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.8.165-178>.
4. Определение температурного поля и термонапряженного состояния укладываемого бетонного массива методом конечных элементов / Н. А. Анишкин [и др.] // *Вестник МГСУ*. 2018. № 11. С. 1407–1418. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418>.
5. Bergin Importance of Insulation at the Bottom of Mass Concrete Placed on Soil with High Groundwater / T. A. Do [et al.] // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2013. Vol. 2342, Iss. 1. P. 113–120. <https://doi.org/10.3141/2342-14>.
6. Разработать составы бетона, провести расчет термонапряженного состояния в процессе его твердения и осуществить контроль качества при возведении конструкции фундаментной плиты высотного здания на объекте «Строительство многофункционального комплекса в г. Минске в границах ул. Филимонова – просп. Независимости – ул. Макаенка»: отчет о НИР по х/д № 2917/20кр., науч. рук. Э. И. Батыновский. Этап 1.
7. Мчедлов-Петросян, О. П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О. П. Мчедлов-Петросян, А. В. Ушеров-Маршак, А. М. Урженко. М.: Стройиздат, 1984. 225 с.
8. Бибики, М. С. Общие принципы проектирования энергосберегающих режимов тепловой обработки железобетонных изделий в ямных пропарочных камерах / М. С. Бибики, В. В. Бабицкий // *Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сб. науч. ст. Гродно, 2010. С. 292–296*.
9. Бибики, М. С. Оценка кинетики твердения цементного камня с использованием термодатчиков системы «Термохрон» / М. С. Бибики, В. В. Бабицкий // *Строительная наука и техника*. 2010. № 4. С. 23–26.
10. Бибики, М. С. Об энергосберегающих режимах тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / М. С. Бибики, В. В. Бабицкий // *Строительная наука и техника*. 2010. № 4. С. 55–59.
11. Запорожец, И. Д. Тепловыделение бетона / И. Д. Запорожец, С. Д. Окорочков, А. А. Парийский. Л.: Изд-во литературы по стр-ву, 1966. 313 с.

Поступила 04.02.2021

Подписана в печать 14.04.2021

Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Ahmad S. (2009) Controlling Temperatures in Mass Concrete. 34th Conference on Our World in Concrete & Structures, 16–18 Aug. 2009. Singapore. 9.
2. Klemczak B., Batog M., Pilch M., Żmij A. (2017) Analysis of Cracking Risk in Early Age Mass Concrete with Different Aggregate Types. *Procedia Engineering*, 193, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.209>.
3. Aniskin N. A., Nguyen H. (2014) Forecast of Cracking of Concrete Massive Dams During Construction in Harsh Climatic Conditions. *Vestnik MGSU*, (8), 165–178. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.8.165-178> (in Russian).
4. Aniskin N. A., Nguyen Trong Chuc, Bryansky I. A., Dam Huu Hung (2018) Determination of the Temperature Field and Thermally Stressed State of the Laid Concrete Mass by the Finite Element Method. *Vestnik MGSU*, (11), 1407–1418. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418> (in Russian).
5. Do T. A., Lawrence A. M., Tia M., Bergin M. J. (2013) Bergin Importance of Insulation at the Bottom of Mass Concrete Placed on Soil with High Groundwater. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2342 (1), 113–120. <https://doi.org/10.3141/2342-14>.
6. Batyanovsky E. I. To Develop Concrete Compositions, to Calculate the Thermo-Stressed State in the Process of its Hardening and to Carry Out Quality Control During Erection of the Construction of the Foundation Slab of a High-Rise Building at the Object “Construction of a Multifunctional Complex in Minsk within the Boundaries of Filimonov Str. – Nezavisimosty Avenue – Makayonok Str.”: Research Report on Business Contract No 2917/20кр. Stage 1 (in Russian).
7. Mchedlov-Petrosyan O. P., Usharov-Marshak A. V., Urzhenko A. M. (1984) *Heat Release During Hardening of Binders and Concretes*. Moscow, Stroizdat Publ. 225 (in Russian).
8. Bibik M. S., Babitskii V. V. (2010) General Principles on Designing Energy Saving Modes for Heat Treatment of Reinforced Concrete Products in Pit Steaming Chambers. *Perspektivy Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov: Sb. Nauch. St.* [Prospects for Development of New Technologies in Construction and Training of Engineering Personnel: Collection of Scientific Papers]. Grodno, 292–296 (in Russian).
9. Bibik M. S., Babitskii V. V. (2010) Evaluation of the Hardening Kinetics of Cement Stone Using the Thermochron Sensors. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (4), 23–26 (in Russian).
10. Bibik M. S., Babitskii V. V. (2010) On the Energy-Saving Modes of Heat Treatment of Concrete and Reinforced Concrete Products. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (4), 55–59 (in Russian).
11. Zaporozhets I. D., Okorokov S. D., Pariysky A. A. (1966) *Heat Dissipation of Concrete*. Leningrad, Publishing House on Construction Literature. 313 (in Russian).

Received: 04.02.2021

Accepted: 14.04.2021

Published online: 31.05.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-216-223>

УДК 625.7/8.001.5

Прогнозирование ровности дорожных покрытий

Инж. Ю. В. Буртыль¹⁾, М. Г. Солодка¹⁾,
докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. При проектировании дорожных одежд применяется сложная система алгоритмов, основанных на математических вычислениях и инженерных решениях, с расчетом оценочных критериев. Именно соблюдение нормированных требований по расчетным критериям позволяет считать конструкцию дорожной одежды надежной, а автомобильную дорогу безопасной и удобной для движения транспорта в течение принятого срока службы. При расчете на прочность, исходя из прогнозной интенсивности движения и состава потока транспортных средств, проводится расчет по основным критериям: допускаемому упругому прогибу, сдвигу в слоях из неукрепленных материалов и в асфальтобетоне, а также по предельным растягивающим напряжениям в монолитных материалах с заданным уровнем надежности. Однако в принятых концепциях расчета прочности и надежности дорожных одежд непосредственно учитывается только силовое воздействие. Для учета факторов окружающей среды необходимо разработать комплексный показатель результирующего воздействия всех факторов. В статье приведен комплекс факторов, влияющих на безопасность движения транспорта, на дорожные деформации и высоту неровности, в частности на увеличение динамического воздействия на дорогу и амплитуду колебания колеса автомобиля на дороге с неровной поверхностью (при отрыве от поверхности дороги), совпадение частоты колебаний автомобиля с собственными частотами колебаний дорожной одежды и, как следствие, на поведенческие особенности вождения. Обоснованы доводы о том, что в прогнозных моделях не учитывается ряд факторов, оказывающих существенное влияние на процессы формирования необратимой деформации в слоях материалов дорожных конструкций.

Ключевые слова: автомобильные дороги, прочность, международный индекс ровности, покрытия, деформации, модель, жесткость конструкции, транспортная нагрузка, условия эксплуатации, измерения, коэффициент динамичности

Для цитирования: Буртыль, Ю. В. Прогнозирование ровности дорожных покрытий / Ю. В. Буртыль, М. Г. Солодка, Я. Н. Ковалев // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 216–223. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-216-223>

Predicting the Evenness of Road Surfaces

Yu. V. Burtyl¹⁾, M. G. Salodkaya¹⁾, Ya. N. Kovalev¹⁾

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

Abstract. The design of road surfaces involves application of a sophisticated algorithm system based on mathematical calculations and engineering solutions, with the calculation of evaluation criteria. It is precisely the observance of the standardized requirements in terms of design criteria that makes it possible to consider the design of the pavement as reliable, and the road as safe and convenient for traffic during the specified service life. When calculating the strength, based on the predicted traffic intensity and the composition of the traffic flow, calculations are carried out according to the main criteria: admissible elastic deflection, shear in layers of non-reinforced materials and in asphalt concrete, as well as the ultimate tensile stresses

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

in cast-in-situ materials with the specified reliability level. However, in the accepted concepts for calculating the strength and reliability of road pavements, only the force effect is directly taken into account. To take into account environmental factors, it is necessary to develop a comprehensive indicator of the resulting impact of all factors. The paper presents a complex of factors influencing on traffic safety, road deformations and irregularities the height of unevenness, in particular, an increase in the dynamic impact on the road and the amplitude of vibration of a car wheel on a road with an uneven surface (when detached from the road surface), the coincidence of the vibration frequency of the car with the natural frequencies of vibration of the road surface, and as a consequence, on the behavioral features of driving. The arguments have been substantiated that the predictive models do not take into account a number of factors that have a significant impact on the formation of irreversible deformation in the layers of materials of road structures.

Keywords: highways, strength, international evenness index, road surfaces, deformations, model, structural rigidity, transport load, operating conditions, measurements, dynamic coefficient

For citation: Burtul Yu. V., Salodkaya M. G., Kovalev Ya. N. (2021) Predicting the Evenness of Road Surfaces. *Science and Technique*. 20 (3), 216–223. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-216-223> (in Russian)

Введение

Деформации в слоях дорожной одежды характеризуют общее снижение прочности конструкции, сопровождаемое дальнейшим разрушением и разуплотнением материалов. Неровности образуются по причинам возникновения необратимых деформаций в покрытии и нижних слоях дорожной одежды под действием транспортных нагрузок и погодноклиматических факторов. При эксплуатации автомобильной дороги увеличение неровностей непосредственно связано с приростом деформаций. Анализ процесса накопления неровностей дорожных покрытий позволяет прогнозировать снижение прочности дорожной конструкции.

Причинами возникновения неровностей дорожных покрытий могут быть различные факторы: увлажнение грунтов и несвязных слоев основания, разуплотнение слоев из минеральных материалов, процессы замораживания и оттаивания, высокие положительные температуры, изменение вязкости битумных составляющих, а также срок службы дорожной конструкции и прирост интенсивности движения автомобилей. Все эти факторы формируют неровности с различной периодичностью и интенсивностью, но учитывать их при прогнозировании необходимо в комплексе.

Исследование процессов образования деформаций и неровностей дорожных покрытий

Рассматривая процесс прогнозирования необратимых деформаций, нужно одновременно

рассматривать процесс образования неровностей дорожных покрытий. Можно утверждать, что эти два процесса взаимосвязаны и отражение деформации материалов зависит от общей жесткости дорожной конструкции:

$$\Delta l = \varepsilon_N R, \quad (1)$$

где Δl – неровность покрытия, мм; ε_N – суммарная необратимая деформация в слоях дорожной одежды, мм; R – коэффициент, учитывающий жесткость дорожной конструкции, $R < 1$.

Деформации и неровности влияют на безопасность движения транспорта и долговечность автомобильной дороги:

а) деформации, отражаемые на покрытии в виде неровностей, увеличивают динамическое воздействие на дорогу и амплитуду колебания колеса, что приводит к скорейшему разрушению как дорожного покрытия, так и подвески автомобиля [1];

б) при совпадении частоты колебаний автомобиля с собственными частотами колебаний дороги при движении по неровностям возникает резкое возрастание амплитуды, что может привести к опрокидыванию автомобиля, особенно при дальнейшем торможении для погашения резонанса;

в) при движении автомобиля по неровностям возможен отрыв колес от покрытия, что может спровоцировать кратковременную потерю управления автомобилем при высоких скоростях (особенно на мокром покрытии) и резко увеличить динамические нагрузки от него на дорогу [2];

г) снижение скорости движения транспортного потока вследствие широкого разброса ча-

стот колебаний автомобиля, вызванных неровностями, приводит к ухудшению потребительских качеств дороги: пропускной способности, уровня загрузки движением, экологической безопасности;

д) нестабильное движение автомобиля по неровностям приводит к длительному повышенному вниманию и напряжению водителя, что в свою очередь ведет к общей утомляемости и снижению объективной оценки ситуации на дороге.

Структура дорожно-строительных материалов представляет собой систему упругих и вязкопластичных связей. При этом общая деформация дорожных покрытий определяется исходя из ее составляющих: обратимой (упругой) и необратимой (пластической).

В зарубежных исследованиях для прогнозирования деформаций разработаны модели, учитывающие такие параметры, как напряжения, начальная деформация в материалах, количество приложенных нагрузок, эмпирические параметры уравнений регрессии, полученные в результате испытаний. В табл. 1 приведены некоторые модели расчета необратимых деформаций ε_N в зарубежных источниках.

Представленные модели сориентированы в основном на силовые факторы: прочность дорожной конструкции и величину нагрузки (на-

пряжения). Необратимые деформации наиболее интенсивно формируются при условии превышения фактического количества нагрузок над расчетным значением. Общая схема развития деформации при приложении нагрузки приведена на рис. 1.

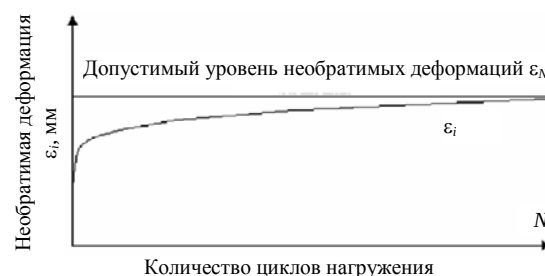


Рис. 1. Изменение необратимой (остаточной) деформации при повторных нагрузках N

Fig. 1. Change in irreversible (permanent) deformation under repeated loads N

Для дорожной одежды прочность и надежность будут обеспечены при выполнении условия

$$\sum_{i=1}^t \frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_i} \geq 1, \quad (2)$$

где t – расчетный период приложения нагрузки, лет; ε_N , ε_i – допустимый и фактический уровни необратимых деформаций за год, мм.

Таблица 1

Формулы для расчета необратимых деформаций при воздействии повторных нагрузок

Formulas for calculating irreversible deformations when exposed to repeated loads

Формула	Параметр формулы	Разработчик, источник
$\varepsilon_N = a + b \lg N$	N – количество приложенных расчетных нагрузок, ед.; a , b – параметр модели	Barksdale R. D., University of Michigan (Англия) [3]
$\varepsilon_N = \varepsilon_1 + a \lg N + b (\lg N)^2$	ε_1 – остаточная начальная деформация, возникающая при первом приложении нагрузки, мм; N – количество приложенных расчетных нагрузок, ед.; a , b – параметр модели	Leng J., North Carolina State University (США) [4]
$\varepsilon_N = A((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_s)^b (B + \lg N)$	A , b , B – параметры модели, являющиеся постоянными для различных материалов; σ_1 , σ_3 – нормальное напряжение по площадкам, МПа; σ_s – предельный девиатор напряжений, МПа	Cheung L. W., the University of Nottingham (Великобритания) [5]
$\varepsilon_N = \varepsilon_6 (NE/10^6)^{b_1} [E(10^\circ\text{C})/E(15^\circ\text{C})]^{0.5} k_c k_r k_s$	ε_6 – деформация при прохождении 10^6 циклов нагрузки, мм; NE – количество приложений нагрузки, ед.; $E(10^\circ\text{C})$, $E(15^\circ\text{C})$ – модуль упругости при 10 и 15 °С; k_c – коэффициент для различных типов асфальтобетона (1,0–1,5); k_r – коэффициент вероятности; k_s – то же неоднородности грунтов	Petit C., Diakhate M., Université de Limoges (Франция) [6]
$\varepsilon_N = (A + mN)(1 - \exp[-BN])$	N – количество приложенных расчетных нагрузок, ед.; m , A , B – параметры уравнения регрессии	Wolff H., Visser A. [7]

Формирование модели изменения показателя ровности дорожного покрытия

Выдвигается гипотеза о существовании линейной зависимости между сроком службы дорожной одежды и показателем ровности дорожного покрытия (IRI) жестких дорожных одежд. Для подтверждения данной гипотезы проведены измерения на 30 опытных участках после выполнения ремонтных мероприятий по устройству слоя асфальтобетонного покрытия [8]. Ежегодные значения показателя ровности на опытных участках обрабатывались с использованием статистического анализа (метод наименьших квадратов), и по средним годовым значениям строилась зависимость вида

$$IRI = TR + B, \quad (3)$$

где IRI – среднегодовое значение показателя ровности на опытном участке, м/км; T – период наблюдения, лет; R – коэффициент ежегодного прироста неровностей дорожного покрытия, м/(км·год); B – начальная величина показателя ровности, м/км.

В качестве опытных принимались участки дорожных конструкций на республиканской сети дорог с различной интенсивностью движения и начальной величиной показателя ровности дороги. Основным критерием подтверждения взаимозависимости двух величин (времени и неровности покрытия) является коэффициент корреляции.

Профилометрический метод позволяет определять ровности дороги широкого диапазона, а измерительная система, основу которой составляют лазерные датчики высокой частоты, имеет устойчивую систему отсчета при проведении измерений [9, 10]. Интегрирующим показателем измерения неровностей может служить показатель ровности IRI, представляющий собой отношение величины суммарного вертикального перемещения эталонной массы автомобиля к длине участка (м/км или мм/м).

В качестве параметра, оценивающего величину неровностей, принимали международный индекс ровности IRI. Прогнозная модель (3) в практических исследованиях будет иметь вид

$$IRI_t = TR + IRI_0, \quad (4)$$

где IRI_t – значение показателя ровности к концу расчетного срока, м/км; IRI_0 – то же в начале расчетного срока, м/км.

Допустимый прирост неровностей дорожного покрытия R зависит от типа дорожной конструкции и погодно-климатических факторов [11]. В зависимости от наличия и характеристики источников увлажнения участки дороги разделяются по типу местности и типу дорожной одежды, в соответствии с нормативными требованиями [12]. Проведенные полевые испытания подтверждают прирост неровностей дорожного покрытия, отражаемых на покрытии по аппроксимированной линейной зависимости (4).

Тип дорожной одежды по капитальности соответствует интенсивности движения и на наиболее прочных конструкциях, при существующей интенсивности движения прирост неровностей покрытия наблюдается меньше, чем на конструкциях облегченного типа с меньшей интенсивностью движения. Тип местности по увлажнению влияет на прирост неровностей при глинистых и суглинистых грунтах на дорогах низких категорий (табл. 2).

Таблица 2

Результаты измерений ежегодного прироста неровностей на дорогах с различными условиями эксплуатации
Results of measurements of annual increase in irregularities on roads with different operating conditions

Интенсивность, расч. авт./сут.	Тип местности по увлажнению	Тип дорожной одежды	Ежегодный прирост неровностей, мм/м
Более 2000	1, 2, 3	Капитальный	0,03
1500–2000	1	Капитальный	0,05
	2, 3		0,08
1000–1500	1	Капитальный	0,08
	2, 3		0,10
800–100	1, 2, 3	Капитальный	0,12
	1	Облегченный	0,08
	2		0,11
	3		0,13
400–800	1, 2, 3	Капитальный	0,06
	1	Облегченный	0,01
	2, 3		0,12
200–400	1	Облегченный	0,15
	2		0,18
	3		0,21

Устанавливая нормативное значение прироста неровностей покрытия для участков дорог одной классификации по условиям экс-

плуатации, можно определять надежность дорожной одежды по условию

$$K_{н,р} = \frac{R_{\phi}}{R_n} \geq 1, \quad (5)$$

где $K_{н,р}$ – коэффициент надежности дорожного покрытия; R_{ϕ} , R_n – фактическое и нормативное значение ежегодного прироста неровностей дорожного покрытия для дорог одной классификации, м/(км·год).

Определение коэффициента динамичности в зависимости от величины неровности дорожного покрытия

Исследование взаимодействия транспортного средства и автомобильной дороги – процесс, требующий глубокого анализа показателей динамического воздействия транспортного потока на конструкцию автомобильной дороги, а также учета степени влияния неровности дорожного покрытия на колебания конструкции транспортного средства [13].

Изучение увеличения динамического воздействия нагрузки и, как следствие, накопления неровностей необходимо при расчетах проектирования и эксплуатации автомобильных дорог, например в расчетах материального ущерба при проезде тяжеловесного и крупногабаритного транспорта [12].

В работах А. К. Бируля и А. В. Смирнова показано, что при повышении скорости движения наблюдается рост динамической составляющей воздействия, которая растет с увеличением величины неровности дорожного покрытия. При этом показатель динамического воздействия увеличивается и может в два и более раза превысить статическую нагрузку от транспортного средства. Амплитуды колебаний и их частотный диапазон зависят от высоты неровностей, а также от их формы и длины. Для различных микропрофилей поверхности автомобильных дорог в зависимости от преобладающих длин неровностей при различных скоростных режимах может наблюдаться значительное увеличение динамичности воздействия транспортного средства на конструкцию автомобильной дороги [14].

Процесс движения автомобиля по дороге сопровождается воздействием его колес на дорожное покрытие в области, представляющей по своей конфигурации овал шин различной формы, зависящей от типа и грузоподъемности транспортного средства. Исследования показали, что величины прогибов невелики и определяются десятками долями миллиметра. При этом чем выше скорость движения, тем меньше деформируется дорожная одежда, причем откосы прогиба неровности дорожного покрытия можно рассматривать как прямолнейные.

Касательные и вертикальные воздействия от колес транспортных средств на дорожное покрытие при движении имеют динамический характер и переменны по величине, направлению и статистическим показателям. Динамические нагрузки автомобиля на дорогу увеличиваются при движении по неровной поверхности дорожного покрытия и сопровождаются ударами и колебаниями колес и кузова автомобиля. Коэффициент динамичности нагрузки $K_{дин}$ отражает увеличение нагрузки (деформации) при динамическом воздействии по сравнению со статическим. Коэффициент $K_{дин}$ рекомендуется определять по формуле

$$K_{динi} = \frac{P_i}{P_{стi}}, \quad (6)$$

где $K_{динi}$ – коэффициент динамичности i -й, отражающий нагрузку оси автомобиля на дорожное покрытие при движении автомобиля; P_i – динамическая нагрузка колеса i -й оси автомобиля на дорожное покрытие при движении автомобиля, Н; $P_{стi}$ – статическая нагрузка колеса i -й оси автомобиля на дорожное покрытие, Н.

Максимальный коэффициент динамичности $K_{дин max}$ определяется отношением максимальной динамической нагрузки на заднюю ось базового грузового автомобиля к его статической нагрузке

$$K_{дин max} = \frac{P_{max}}{P_{ст}}, \quad (7)$$

где P_{max} – максимальное значение динамической нагрузки колеса на дорожное покрытие

при движении автомобиля, H ; $P_{ст}$ – статическая нагрузка колеса на покрытие, H .

При расчетах используют значение максимального коэффициента динамичности при динамическом воздействии грузового автомобиля на заданном участке автомобильной дороги. Для участков автомобильных дорог с различной высотой неровности коэффициенты динамичности следует рассчитывать на основе модели системы «транспортное средство – дорога», так как на этих участках наблюдается значительный разброс величин коэффициента динамичности (от 1,2 до 2,5) в зависимости от неровности дорожного покрытия, осевой нагрузки и скорости движения автомобиля.

В нормативных документах по проектированию дорожных одежд коэффициент динамичности вертикальной нагрузки $K_{дин}$ определяется как отношение значения вертикальной нагрузки автомобиля, передаваемой на поверхность дорожного покрытия при скорости его движения по горизонтальному участку дороги, к вертикальной нагрузке, передаваемой колесом на поверхность покрытия от неподвижного автомобиля. При значительных неровностях динамические нагрузки автомобиля на дорогу резко возрастают: с увеличением скорости движения до 80 км/ч коэффициент динамичности может повышаться до 3,0. Величина $K_{дин}$ зависит от массы и загруженности автомобиля: для грузовых транспортных средств при полной (номинальной) нагрузке его значение равно 2,0. Увеличение скорости движения сопровождается вначале быстрым ростом коэффициента динамичности, затем рост $K_{дин}$ замедляется. Так, при высоких скоростях он практически не меняется.

Для оценки динамического воздействия используется критерий, определяющий отношение динамических усилий, возникающих при проезде транспортного средства, к его статическому весу. При расчете нагрузки на дорожную конструкцию в отечественных нормативных документах коэффициент динамичности принимается равным 1,3. При $K_{дин} > 1,3$ нагрузки считаются динамическими перегрузками.

Для участков автомобильных дорог с неудовлетворительным показателем ровности $K_{дин}$ необходимо рассчитывать в зависимости от величины неровности дорожного покрытия, осевой нагрузки автомобиля и скорости его движения, так как их величины очень различаются. В качестве показателя расчетного коэффициента динамичности на эксплуатируемых автомобильных дорогах нужно использовать значение $K_{дин\max}$ при движении по планируемому участку со скоростью 85 км/ч.

По итогам моделирования динамического воздействия автомобиля с учетом неровностей поверхности дорожного покрытия были обнаружены следующие закономерности:

- с помощью коэффициента динамичности на выбранном участке дороги можно провести сравнительный анализ по уровню динамического воздействия автомобиля на дорогу;
- на достаточно ровных участках (с нормативным показателем ровности) средний коэффициент динамичности при эксплуатационных скоростных режимах движения 60–100 км/ч не превышает 1,3;
- на неровных участках дорог коэффициент динамичности достигает значений 1,3–2,0.

Расчеты позволили определить поле максимальных (критических) динамических нагрузок, коэффициентов динамичности $K_{дин}$ (рис. 2) в зависимости от различных значений показателя ровности дорожного покрытия IRI и скорости движения автомобилей v_a . Критерий $K_{дин}$ комплексно характеризует качество (стабильность) процесса перевозки грузов с учетом возможного вида повреждений дороги и автомобиля.

На основании анализа проведенных экспериментов (рис. 2) установлено, что величина максимального коэффициента динамичности на неровных участках дороги при скорости движения грузового автомобиля 60–100 км/ч составляет от 1,20 до 1,94, а также в определенных условиях может превышать 2,0. Максимальный коэффициент динамичности связан с неровностью дорожного покрытия и не отражает уровень динамического воздействия транспортных средств на всем участке автомобильной дороги.

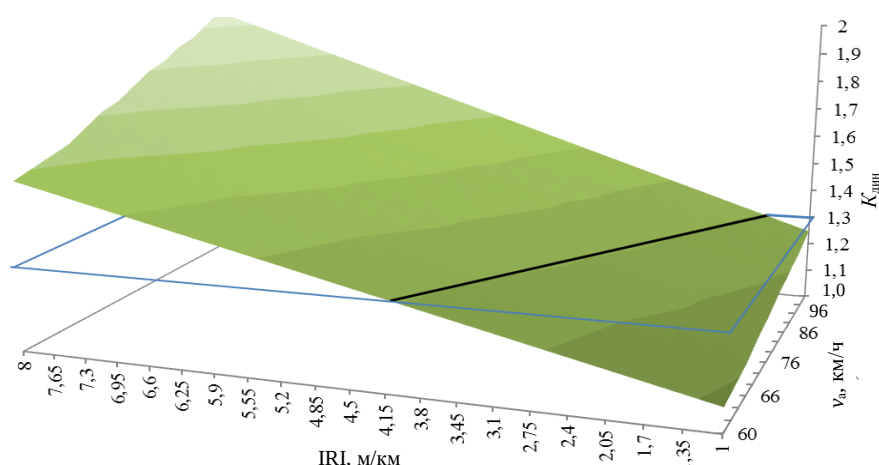


Рис. 2. Максимальные значения $K_{дин}$ для различных величин показателя ровности дорожного покрытия IRI и скорости движения автомобиля $v_a = 60–100$ км/ч

Fig. 2. Maximum values of K_{dyn} for various values of IRI pavement evenness indicator and vehicle speed of $v_s = 60–100$ km/h

ВЫВОДЫ

1. В существующих прогнозных моделях не учитывается ряд факторов, оказывающих существенное влияние на процессы образования необратимой деформации в слоях материалов дорожных конструкций:

а) при воздействии транспортных нагрузок на дорожное покрытие не учитываются усталостные свойства материалов, характеризующиеся не только количеством проходов транспортных средств, но и временной периодичностью приложения нагрузки в интервалах 0,10–0,01 с;

б) при возникновении переменных напряжений в элементарном слое асфальтобетонного покрытия на стадии непосредственного воздействия транспортной нагрузки и после ее снятия они не учитываются, хотя присутствует эффект Баушингера, при котором пластические деформации формируются при изменении знака напряжений независимо от величины нагрузки [8];

в) изменение структуры дорожного покрытия при перемешивании материалов и свойств битума при технологии асфальтобетона, влияние водной среды, а также дефекты на покрытии не позволяют рассматривать этот объект как стабильную систему, имеющую фиксированные прочностные характеристики в течение длительного времени;

г) при высоких температурах асфальтобетонное покрытие работает не только в упругой ста-

дии, но и в пластичной (закон вязкого течения), и в этом случае модель прогнозирования деформаций не будет соответствовать математической модели строго для упругой деформации.

2. Проведенные за длительный период на опытных участках измерения позволяют считать допустимым применение линейной модели изменения неровностей дорожного покрытия при оценке технического состояния сети автомобильных дорог в целом.

3. Полученная аппроксимированная модель прогнозирования образования неровностей подтверждается опытными исследованиями на сети республиканских дорог.

4. Предложенные качественные характеристики надежности дорожной одежды на основании результатов автоматизированных измерений за длительный период позволяют выявлять участки дорог с наибольшим приростом неровностей покрытия и соответственно с критической деформацией, т. е. наименьшей прочностью дорожной конструкции. Такое прогнозирование даст возможность планировать ремонтные мероприятия на сети дорог и устанавливать безопасные режимы движения с ограничениями транспортной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солодкая, М. Г. Исследование параметров колебаний в зоне контакта автомобиля с дорогой / М. Г. Солодкая, Я. Н. Ковалев // Наука и техника в дорожной отрасли. 2019. № 4. С. 26–29.

2. Исследование влияния дорожных неровностей на режим движения автомобиля с помощью электронных машин непрерывного действия / Ю. В. Беленький [и др.] // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1965. № 10. С. 128–133.
 3. Barksdale, R. D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials / R. D. Barksdale // Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements, London, Sept. 11–15, 1972. London: University of Michigan, 1972. P. 161–174.
 4. Leng, J. Characteristics and Behavior of Geogrid-Reinforced Aggregate under Cyclic Load / J. Leng. USA: North Carolina, North Carolina State University, 2002. 152 p.
 5. Cheung, L. W. Laboratory Assessment of Pavement Foundation Materials / L. W. Cheung. United Kingdom: Nottingham, the University of Nottingham, 1994. 224 p.
 6. Fatigue Performance of Interfaces and Longitudinal Top-Down Cracking in Multilayered Pavements / C. Petit [et al.] // Road Materials and Pavement Design. 2009. Vol. 10, No 3. P. 609–624.
 7. Wolff, H. Incorporating Elastic-Plasticity in Granular Layer Pavement Design Institution of Civil Engineers Transport / H. Wolff, A. Visser // Proceedings of Institution of Civil Engineers Transport. London, 1994. P. 259–272.
 8. Буртыль, Ю. В. Критерии эксплуатационной надежности автомобильных дорог с жесткими дорожными одеждами / Ю. В. Буртыль // Автомобильные дороги и мосты. 2012. № 2. С. 21–31.
 9. Дороги автомобильные общего пользования. Диагностика. Определение продольного микропрофиля дорожной поверхности и международного показателя ровности IRI. Общие требования и порядок проведения: СТО МАДИ 020665171–2006. Введ. 15.08.2006. М., 2006. 42 с.
 10. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий: СТ РК 1219–2003. Введ. 01.01.2005. Астана, 2005. 27 с.
 11. Безопасность автомобильных дорог: ТР ТС 014/2011. Введ. 15.02.2015. М.: Мин-во транспорта Рос. Федерации, 2015. 40 с.
 12. Автомобильные дороги. Нормы проектирования: ТКП 45-3.03-19–2006 (02250). Введ. 01.07.2006. Минск: Минстройархитектуры, 2006. 47 с.
 13. Бахрах, Г. С. Сопоставительная модель оценки срока службы дорожных одежд жесткого типа по критерию усталостного растрескивания при их конструировании / Г. С. Бахрах // Труды ГП «РосдорНИИ». М., 1998. Вып. 9. С. 51–59.
 14. Петкявичюс, Э. Анализ и оценка показателей качества асфальтобетонных покрытий автомагистралей Литвы / Э. Петкявичюс, Р. Петкявичюс // Вестник БНТУ. 2006. № 1. С. 21–26.
- Поступила 18.02.2021
 Подписана в печать 20.04.2021
 Опубликована онлайн 31.05.2021
- Advanced Science and Technology for Highways, (4), 26–29 (in Russian).
 2. Belen'kii Yu. B., Kovalev Ya. N., Lomako D. M., Furunzhiev R. I. (1965) Investigation of the Influence of Road Irregularities on Driving Mode of Vehicle Using Continuous Electronic Machines. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo i Arkhitektura* [Proceedings of Higher Education Institutions. Construction and Architecture], (10), 128–133 (in Russian).
 3. Barksdale R. D. (1972) Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. *Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements, London, Sept. 11–15, 1972*. London, University of Michigan, 161–174.
 4. Leng J. (2002) *Characteristics and Behavior of Geogrid-Reinforced Aggregate under Cyclic Load*. USA, North Carolina, North Carolina State University. 152.
 5. Cheung L. W. (1994) *Laboratory Assessment of Pavement Foundation Materials*. United Kingdom, Nottingham, the University of Nottingham. 224.
 6. Petit C., Diakhaté M., Millien A., Phelipot-Mardelé A., Pouteau B. (2009) Fatigue Performance of Interfaces and Longitudinal Top-Down Cracking in Multilayered Pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 10 (3), 609–624.
 7. Wolff H., Visser A. (1994) Incorporating Elastic-Plasticity in Granular Layer Pavement Design Institution of Civil Engineers Transport. *Proceedings of Institution of Civil Engineers Transport*. London, 259–272.
 8. Burtul Yu. V. (2012) Criteria for the Operational Reliability of Highways with Non-Rigid Road Clothes. *Avtomobil'nye Dorogi i Mosty* [Highways and Bridges], (2), 21–31 (in Russian).
 9. TO MADI [Organization Standard – Moscow Automobile and Road Construction Technical University] 020665171–2006. *Public Highways. Diagnostics. Determination of Longitudinal Micro-Profile of Road Surface and International Evenness Index IRI. General Requirements and Procedure*. Moscow, 2006. 42 (in Russian).
 10. ST RK [Standard of the Republic of Kazakhstan] 1219–2003. *Automobile Roads and Airfields. Methods for Measuring Unevenness of Substrates and Coatings*. Astana, 2005. 27 (in Russian).
 11. TR TS [Technical Regulations of the Customs Union] 014/2011. *Road Safety*. Moscow, Ministry of Transport of the Russian Federation, 2015. 40 (in Russian).
 12. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-3.03-19–2006 (02250). *Highways. Design Standards*. Minsk, Publishing House of Architecture and Construction, 2006. 47 (in Russian).
 13. Bakhrakh G. S. (1998) Comparative Model for Assessing the Service Life of Non-Rigid Road Pavements by the Criterion of Fatigue Cracking During their Design. *Trudy GP RosdorNII* [Proceedings State Enterprise Russian State Road Research Institute]. Moscow, (9), 51–59 (in Russian).
 14. Petkevicius E., Petkevicius R. (2006) Analysis and Evaluation of Qualitative Parameters of Highway Asphalt Concrete Pavements in Lithuania. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (1), 21–26 (in Russian).

REFERENCES

1. Solodkaya M. G., Kovalev Ya. N. (2019) Investigation of Vibration Parameters in the Contact Zone of the Car with the Road. *Nauka i Tekhnika v Dorozhnoy Otrastli* =

Received: 18.02.2021
 Accepted: 20.04.2021
 Published online: 31.05.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-224-233>

УДК 656

Анализ условий размещения на дорогах и характеристик железнодорожных переездов Республики Казахстан

Докт. техн. наук Д. В. Капский¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты Е. Н. Кот¹⁾, С. В. Богданович¹⁾,
инж. А. Г. Рыбинский²⁾, асп. К. Ибраев³⁾

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

²⁾Белорусский дорожный научно-исследовательский институт «БелдорНИИ» (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Компания «Голд Продактс» (Нур-Султан, Республика Казахстан)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Дорожно-транспортные происшествия автомобилей с подвижным составом железных дорог приводят к наиболее тяжелым последствиям. Многие железнодорожные переезды являются местами длительных задержек транспортных средств как до, так и после дорожно-транспортного происшествия. Во многих случаях пересечения автомобильных дорог с железнодорожными путями резко ограничивают пропускную способность автомобильной дороги. Железнодорожные переезды требуют самого пристального внимания службы организации дорожного движения, поскольку должны включать не только устройства для движения автомобилей, но также пешеходные и запасные пути. Несмотря на то что проблема дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах не является новой, во всем мире продолжают исследования и анализы статистики в данной области. В статье рассмотрены железнодорожные переезды на республиканских автомобильных дорогах Казахстана. Выполнены исследования направлений повышения безопасности движения на таких переездах. Изучены ситуации на железнодорожных переездах дорог республиканского значения, а также возможные ограничения и нормативные требования. Приведены результаты детального сбора данных на объектах, что послужит основанием для совершенствования нормативно-технической базы дорожного сектора Казахстана по улучшению безопасности дорожно-транспортной инфраструктуры с учетом существующих стандартов. Даны рекомендации по внедрению и обобщению передового международного опыта в организации дорожного движения на железнодорожных переездах, что будет способствовать адаптации Республики Казахстан в условиях развития транспорта и коммуникаций.

Ключевые слова: железнодорожные переезды, безопасность дорожного движения, обследование

Для цитирования: Анализ условий размещения на дорогах и характеристик железнодорожных переездов Республики Казахстан / Д. В. Капский [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 224–233. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-224-233>

Analysis of Placement Conditions on Roads and Characteristics of Railway Crossings in the Republic of Kazakhstan

D. V. Kapskiy¹⁾, E. N. Kot¹⁾, S. V. Bogdanovich¹⁾, A. G. Rybinskiy²⁾, K. Ibrayev³⁾

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

²⁾Belarusian Road Scientific-Research Institute “BeldorNII” (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾GOLD PRODUCTS LLP (Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan)

Abstract. Road traffic accidents of vehicles with a rolling stock of railways lead to the most serious consequences. Many level crossings are places of long delays of vehicles both before and after the traffic. In this case and in many others,

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-05-48
atf@bntu.by

Address for correspondence

Kapskiy Denis V.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-05-48
atf@bntu.by

the intersections of highways with railways sharply limit the capacity of the highway. Level crossings require the utmost attention of the traffic organization, since they must include not only devices for the movement of cars, but also pedestrian and sidings. Despite the fact that the problem of road traffic accidents at level crossings is not new, research and analysis of statistics in this area continues around the world. The paper considers the level crossings on the Republican highways of the Republic of Kazakhstan. Research has been carried out on ways to improve traffic safety at such crossings. The situation at the level crossings of the roads of Republican significance, as well as possible restrictions and regulatory requirements, have been studied in the paper. The paper presents results of a detailed collection of data at the facilities, which will serve as the basis for the development of a detailed program for improving the regulatory and technical base of the road sector in Kazakhstan to improve the safety of road transport infrastructure, taking into account existing standards. Recommendations are given for the implementation and generalization of advanced international experience in organizing road traffic at railway crossings, which will contribute to the adaptation of the Republic of Kazakhstan in the context of the development of transport and communications.

Keywords: level crossings, road safety, examination

For citation: Kapskiy D. V., Kot E. N., Bogdanovich S. V., Rybinskiy A. G., Ibrayev K. (2021) Analysis of Placement Conditions on Roads and Characteristics of Railway Crossings in the Republic of Kazakhstan. *Science and Technique*. 20 (3), 224–233. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-224-233> (in Russian)

Введение

Гибель людей на железнодорожных переездах остается постоянной проблемой безопасности как на автомобильных, так и на железных дорогах. По статистическим данным, каждый год на пересечениях автомобильных и железных дорог регистрируется в среднем 400 смертей в Европейском союзе и 300 – в США. Вот почему исследования транспортной системы на железнодорожных переездах требуют пристального внимания.

Дорожно-транспортные происшествия автомобилей с подвижным составом железных дорог приводят к наиболее тяжелым последствиям [1–3]. Многие железнодорожные переезды являются местами длительных задержек транспортных средств как до, так и после ДТП. Во многих случаях пересечения автомобильных дорог с железнодорожными путями относятся к «узким» местам повышенной опасности, резко ограничивающим пропускную способность дороги. Железнодорожные переезды требуют самого пристального внимания службы организации дорожного движения, поскольку должны включать не только устройства для движения автомобилей, но также пешеходные и запасные пути [4, 5].

Железнодорожные переезды представляют собой ключевую проблему для исследователей и практиков в области безопасности дорожного движения и железнодорожного транспорта. Частота травм на железнодорожных переездах

является серьезным предупреждением о том, что существующий подход к безопасности железнодорожных переездов не работает и необходим новый.

По причине роста интенсивности движения поездов и транспортных средств через железнодорожные переезды, отсутствия единых требований по обустройству техническими средствами регулирования дорожным движением, регулируемых переездов с автоматическими устройствами заграждения переезда, а также установки на регулируемых и нерегулируемых переездах с высокой интенсивностью транспортного потока приборов фото- и видеофиксации нарушений правил проезда переездов и интеграции их с процессинговыми центрами административной полиции требуется принятие национального стандарта, включающего в себя комплекс мер по повышению уровня безопасности дорожного движения [6–8].

Разнообразие устройств для организации дорожного движения на железнодорожных пересечениях Казахстана не позволяет унифицировать современные имитационные модели. Необходимо выполнить широкоформатные исследования имеющихся недостатков, снижающих безопасность и пропускную способность транспорта, а также рассмотреть наиболее эффективные решения в организации движения на действующих переездах [7, 8]. С этой целью необходимо выполнить сбор данных на железнодорожных переездах на дорогах I–IV категорий республиканского значения. До настоящего

времени детальный анализ всех железнодорожных переездов с таких позиций не проводился.

Уровень безопасности на железнодорожных переездах

Безопасность железнодорожных переездов – серьезная проблема как для железных дорог, так и для участников дорожного движения. Согласно статистике, опубликованной Европейским железнодорожным агентством (ERA), в Евросоюзе из около 123000 железнодорожных переездов почти половина нерегулируемые, без каких-либо активных устройств предупреждения или защиты, таких как световая или звуковая сигнализация, либо шлагбаумы [9]. Примерно 45 % аварий в Евросоюзе происходит на нерегулируемых железнодорожных переездах, а 65 % участников дорожного движения, попавших в аварии, – это водители или пассажиры легковых или тяжелых транспортных средств [9].

В 2016 г. в Евросоюзе на железнодорожных переездах было зарегистрировано 433 несчастных случая [10]. Это составляет 29,0 % несчастных случаев на железных дорогах, но только около 1,2 % всех несчастных случаев на автомобильных дорогах [10]. Большинство причин связано с поведением участников дорожного движения, например с отвлечением внимания [10]. Также выявлены другие причины аварий, такие как погодные условия или состояние водителя (опьянение алкоголем, наркотиками).

Оценка данных об авариях на 256 железнодорожных переездах проводилась в рамках проекта SELCAT (Безопасная европейская система переезда на железнодорожных переездах). Установлено, что около 91 % аварий на железнодорожных переездах вызваны человеческими ошибками и более 80 % связаны с тем, что водитель дорожного транспортного средства не соблюдал правил дорожного движения [11].

В государствах, входящих в ERA, число железнодорожных переездов варьируется в широких пределах: 124 – в Люксембурге, 3100 – в Турции, 16000 – во Франции, 210000 – в США. Как правило, это зависит от размера страны и плотности железнодорожной и автодорож-

ной сетей [12]. Железнодорожные переезды с устройствами ограждения различных типов и без них тоже отличаются друг от друга в разных странах и зависят от ряда факторов. Среднее расстояние между железнодорожными переездами составляет от 1 км (Норвегия, США) до 8 км (Россия).

В последние годы число железнодорожных переездов в большинстве стран ERA сократилось: с 2010 по 2015 г. оно составило от 30 % (Швеция) до 2 % (Дания, Словакия). В пяти государствах ERA зарегистрировано увеличение числа железнодорожных переездов, составившее от 1 % (Венгрия, Латвия) до 14 % (Греция), а в некоторых странах – 20 % (Болгария, Испания). В других государствах число железнодорожных переездов уменьшилось или осталось без изменений (США).

Уровень безопасности на железнодорожных переездах можно оценить путем объединения данных о количестве аварий и данных, нормализованных к числу железнодорожных переездов и поездо-километров пробега. Чем меньше аварий из расчета на один железнодорожный переезд, тем выше уровень безопасности. Аналогичным образом, чем меньше число аварий из расчета на один пройденный миллион поездо-километров, тем выше уровень безопасности. Уровень безопасности является самым высоким при относительно малом количестве аварий в расчете на железнодорожный переезд и одновременно при небольшом числе аварий из расчета на поездо-километр.

В ряде стран сбор данных об авариях осуществляется по типу пользователей железнодорожных переездов с учетом столкновений с препятствиями или животными, а также применительно к авариям без участия железнодорожного состава. Данные о смертности и травматизме разделяют также в зависимости от конкретного пользователя железнодорожного переезда или машиниста/персонала/пассажиров поезда.

К числу потерь, которые учитываются наиболее часто, на первом месте – ущерб имуществу. На втором находятся расходы на компенсацию ущерба окружающей среде и стоимость задержек (рис. 1).



Рис. 1. Тип издержек, регистрируемых для отдельных аварий на железнодорожных переездах [4]

Fig. 1. Types of costs recorded for individual level crossings accidents [4]

Общая характеристика железнодорожной сети Республики Казахстан

Дорожное движение на железнодорожных переездах Республики Казахстан регулируется Законом «О дорожном движении» [13] и Правилами дорожного движения [14]. Эксплуатация железнодорожных переездов осуществляется в соответствии с Правилами эксплуатации железнодорожных переездов [15].

Эксплуатационная длина железнодорожной сети Казахстана на конец 2017 г. составляла 16040 км (табл. 1). Железнодорожные линии есть во всех 14 областях страны, а также на территории всех городов республиканского значения (Астана, Алматы, Шымкент).

Наибольшая протяженность железнодорожных линий – на территории Карагандинской области (2467 км), наименьшая – в Западно-Казахстанской области (319 км). Суммарная протяженность железнодорожных линий в шести областях (Западно-Казахстанской, Атырауской, Туркестанской, Костанайской, Павлодарской, Восточно-Казахстанской), включенных в исследование железнодорожных переездов, составляет 4881 км (30 % от общей эксплуатационной длины железных дорог Казахстана).

В структуре железнодорожной сети Республики Казахстан есть существенные особенности (табл. 2):

– 275 км железных дорог страны проходят по территории соседних государств (259 км – в России, 16 км – в Кыргызстане);

– 574 км железных дорог других государств (России и Кыргызстана) проходят по территории Казахстана.

Таблица 1

Протяженность железнодорожных линий Республики Казахстан (данные за 2017 г.)

Length of railway lines in the Republic of Kazakhstan (data for 2017)

Область	Эксплуатационная длина железных дорог, км
Акмолинская	1559,0
Актюбинская	1826,7
Алматинская	1401,4
Атырауская	742,3
Западно-Казахстанская	319,7
Жамбылская	1043,5
Карагандинская	2467,1
Костанайская	1270,3
Кызылординская	870,9
Мангистауская	1096,6
Южно-Казахстанская	551,6
Павлодарская	788,4
Северо-Казахстанская	618,7
Восточно-Казахстанская	1209,0
ВСЕГО	16040,3

Технические характеристики железнодорожных линий приведены в табл. 3.

Таблица 2

Особые железнодорожные линии Республики Казахстан
Special railway lines of the Republic of Kazakhstan

Наименование	Эксплуатационная длина, км
Железнодорожные линии Казахстана, проходящие по территории:	275,1
России:	259,0
Оренбургской области	155,0
Алтайского края	104,0
Кыргызстана	16,1
Железнодорожные линии других государств, проходящие по территории Казахстана, в том числе:	574,0
Южно-Уральская железная дорога, проходящая по областям:	266,0
Актюбинской	12,0
Костанайской	66,0
Северо-Казахстанской	188,0
Западно-Сибирская железная дорога, проходящая по Павлодарской области	137,0
Приволжская железная дорога, проходящая по Западно-Казахстанской области	111,0
Кыргызская железная дорога, проходящая по Жамбылской области	60,0

Таблица 3

Технические характеристики железнодорожных линий Республики Казахстан

Technical characteristics of the railway lines of the Republic of Kazakhstan

Основная характеристика	Эксплуатационная длина дорог, км	
	электрифицированных	неэлектрифицированных
По числу путей:	4217,0	11823,3
однопутные	457,6	10682,4
двухпутные или более	3759,4	1140,9
По ширине колеи:	4217,0	11823,3
нормальная	–	18,6
широкая	4217,0	11804,7
По типу перевозок:	4217,0	11823,3
пассажирские и грузовые	4217,0	11823,3
По типу тока:	4217,0	–
переменный	4195,9	–
постоянный напряжением 3000 В	21,1	–

Большинство железнодорожных линий в Республике Казахстан однопутные (11140 км, 69 % от общей протяженности). Доля электрифицированных составляет 26 %, однако для

двух- и многопутных линий этот показатель намного больше – 77 %. Почти 99 % электрифицированных линий работают на переменном токе, только на одном участке используется постоянный ток напряжением 3000 В.

Все железнодорожные линии используются как для грузовых, так и для пассажирских перевозок. Средняя участковая скорость движения поездов составляет 44 км/ч.

Характеристика железнодорожных переездов Республики Казахстан

Классификация железнодорожных переездов установлена Правилами [15]. На первом этапе в исследуемую группу включены все переезды, расположенные на пересечениях республиканских автомобильных дорог и железнодорожных линий на территории шести областей Республики Казахстан.

Распределение железнодорожных переездов (ЖДП) по шести областям приведено на рис. 2.

Основные характеристики исследуемых железнодорожных переездов приведены в табл. 4. 79 % переездов являются неохраняемыми, а 21 % – охраняемыми. К I категории отнесен один железнодорожный переезд (3 %),

ко II – 4 (14 %), к III – 13 (45 %), к IV категории – 11 железнодорожных переездов (38 %).

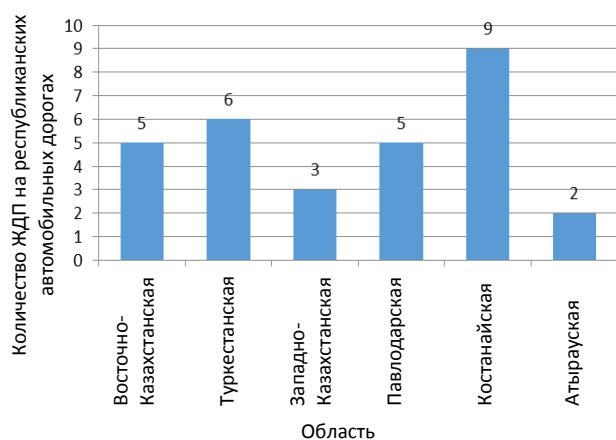


Рис. 2. Распределение железнодорожных переездов по областям

Fig. 2. Distribution of level crossings by regions

В классификации дорожно-транспортных происшествий (ДТП), применяемой в Республике Казахстан, отсутствует отдельная категория «ДТП с участием железнодорожного транспортного средства» [16] (например, в Республике Беларусь такая категория ДТП выделяется). Дорожно-транспортные происшествия, зафиксированные на железнодорожных переездах, относятся к категории «Прочие (иные) ДТП», отдельно среди других ДТП в этой категории не выделены. В результате из статистических данных о дорожной аварийности в Рес-

публике Казахстан, предоставленных для анализа, никакая информация о дорожно-транспортных происшествиях на железнодорожных переездах не может быть извлечена.

В связи с этим направлены запросы в областные филиалы предприятия «Казахавтодор», а также в областные подразделения дорожной полиции с целью выявления дорожно-транспортных происшествий, произошедших на железнодорожных переездах. В последующем будет составлена статистика в соответствии с рекомендациями ЕЭК ООН.

Для каждого железнодорожного переезда с целью выполнения дальнейшей аналитической работы требуется следующая информация:

- категория переезда;
- категория железнодорожной линии (и разрешенная скорость движения поездов);
- число путей;
- наличие электрификации железнодорожной линии;
- интенсивность движения поездов;
- категория автомобильной дороги на участке размещения железнодорожного переезда;
- номер автомобильной дороги и привязка железнодорожного переезда по ней (км+);
- количество полос движения на автомобильной дороге;
- интенсивность движения по автомобильной дороге;

Таблица 4

Основные характеристики железнодорожных переездов
Main characteristics of level crossings

Номер и наименование автомобильной дороги	Длина, км+	Охраняемый переезд	Категория	Шлагбаум	Количество путей, шт.	Ширина переезда, м	Тип дорожной одежды
А-11 Семей – граница РФ (на Барнауле)	27	Нет	3	Нет	1	7,0	А/б
Р-25 Усть-Каменогорск – Зыряновск – Улкен Нарын – Катон-Карагай – Рахмановские ключи	97	Нет	3	Нет	1	7,0	А/б
А-9 Усть-Каменогорск – Риддер – граница РФ	82	Нет	3	Нет	1	7,0	А/б
	90	Нет	3	Нет	1	7,0	А/б
А-10 Усть-Каменогорск – Шемонаиха – граница РФ	28	Нет	3	Нет	1	7,0	А/б

- вид дорожной одежды на подходах автомобильной дороги;
- наличие охраны (дежурного по переезду);
- наличие шлагбаума (с указанием вида);
- наличие светофорной сигнализации (с указанием типа светофоров и режима их работы);
- наличие звуковой сигнализации на железнодорожном переезде;
- наличие барьера-автомата на железнодорожном переезде;
- вид настила на железнодорожном переезде;
- ширина настила;
- состояние настила (ровность, скользкость и т. п.);
- наличие пешеходной дорожки через пути;
- расстояние видимости переезда со стороны железной дороги, в том числе два фото, по одному с каждой стороны, примерно с места машиниста поезда;
- расстояние видимости переезда со стороны автомобильной дороги, в том числе два фото с подъездов к железнодорожному переезду по автомобильной дороге;
- наличие освещения на железнодорожном переезде и его характеристики;
- наличие видеофиксации на железнодорожном переезде;
- среднее время от закрытия переезда до прихода поезда;
- среднее время закрытого состояния железнодорожного переезда;
- среднее количество закрытий (в сутки или в неделю);
- данные по аварийности за последние 10 лет – подробные по каждому ДТП на переезде;
- условия движения через переезд (в том числе количество нарушений ПДД за несколько часов);
- другие факторы, влияющие на условия движения через переезд (в том числе провоцирующие на нарушения ПДД).

Как видно, количество исходных данных достаточно велико. Минимальный набор первичных данных, касающийся железнодорожных переездов, включает:

- наличие охраны;
- наличие шлагбаума;

- наличие переездной сигнализации;
- число железнодорожных путей;
- ширину переезда;
- материал настила переезда;
- наличие устройства защиты переезда (барьера-автомата).

Обработка полученной информации показала, что даже минимальный набор данных в ряде случаев собрать не представлялось возможным. Всего удалось собрать информацию для 69 % переездов. Для 24 железнодорожных переездов большинство данных, включая основные (категорию, наличие охраны), отсутствует. Распределение таких переездов по областям приведено на рис. 3.



Рис. 3. Распределение железнодорожных переездов по областям с отсутствием части данных

Fig. 3. Distribution of level crossings by regions with missing data

На 32 железнодорожных переездах устроен железобетонный настил, на 17 применяются относительно редкие варианты настилов – из рельсов, шпал, металлических конструкций, дерева. Современный резинометаллический настил устроен только на трех переездах.

На рис. 4 приведены общие данные о количестве ДТП в 2011–2016 гг. на всех железнодорожных переездах Республики Казахстан (включая республиканские и местные автомобильные дороги) и пострадавших в них.

Следует обратить внимание на необходимость регулярного сбора качественных исход-

ных данных по железнодорожным переездам. Без их наличия любой вид деятельности, рассчитанный на повышение безопасности на переездах, не принесет нужных результатов.

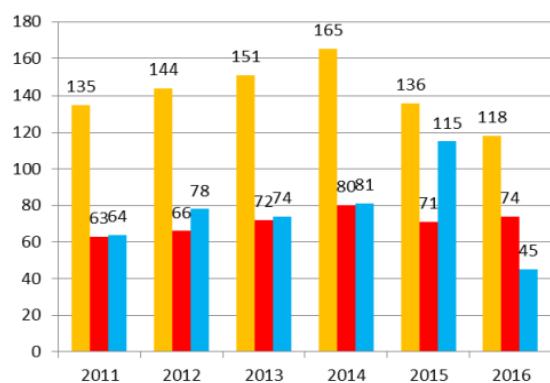


Рис. 4. Показатели аварийности на всех железнодорожных переездах Республики Казахстан:

■ – количество ДТП; ■ – погибшие; ■ – раненые

Fig. 4. Accident rate indicators at all railway crossings of the Republic of Kazakhstan:

■ – number of accidents; ■ – dead; ■ – wounded

Оценка возможности сохранения железнодорожного переезда на республиканской автомобильной дороге Республики Казахстан

Наиболее радикальным способом устранения ДТП на железнодорожных переездах является ликвидация самого переезда. К сожалению, данный способ часто не осуществим в силу многих причин. Одна из них – недостаточность информации и отсутствие необходимой методики принятия решения. Авторами статьи разработан алгоритм экспертной оценки возможности сохранения железнодорожного переезда на республиканской автомобильной дороге Казахстана, включающий 11 основных шагов.

Шаг 1. Оценка категории железнодорожного переезда. Для переездов I и II категорий их сохранение не допускается, для переездов III и IV категорий проверяются дальнейшие критерии.

Шаг 2. Оценка категории автомобильной дороги. На автомобильных дорогах I и II категорий сохранение железнодорожных переездов не допускается. Для автомобильных до-

рог III, IV, V категорий проверяются дальнейшие критерии.

Шаг 3. Оценка количества полос движения на автомобильной дороге. При числе полос более двух сохранение железнодорожных переездов не допускается. При двух полосах проверяются дальнейшие критерии.

Шаг 4. Оценка количества железнодорожных путей на переезде. При числе путей более двух сохранение железнодорожных переездов не допускается. При двух путях сохранение переездов, как правило, не допускается. При одном пути проверяются дальнейшие критерии.

Шаг 5. Оценка категории железнодорожной линии. Для железнодорожных переездов на магистральной железнодорожной линии проверяются дальнейшие критерии. Для подъездного железнодорожного пути переезд может быть сохранен.

Шаг 6. Оценка наличия электрификации на железнодорожной линии. При наличии электрификации железнодорожные переезды, как правило, не допускаются. При отсутствии электрификации проверяются дальнейшие критерии.

Шаг 7. Оценка альтернативных возможностей для пересечения железнодорожной линии. При наличии путепровода или тоннеля для пересечения железнодорожной линии на расстоянии менее 1 км в населенном пункте или менее 2 км вне населенного пункта железнодорожные переезды не допускаются. При больших расстояниях между железнодорожным переездом и путепроводом (тоннелем) проверяются дальнейшие критерии.

Шаг 8. Оценка показателей аварийности на конкретном железнодорожном переезде. При значении показателя более среднего для всех железнодорожных переездов на республиканских дорогах сохранение переездов не допускается. При значении показателя менее или равного среднему значению для всех железнодорожных переездов на республиканских дорогах проверяются дальнейшие критерии.

Шаг 9. Оценка условий движения на конкретном железнодорожном переезде. При количестве нарушений ПДД или конфликтных

ситуаций в зоне железнодорожного переезда более установленного допустимого значения сохранение переезда не допускается. При значении показателя менее или равного допустимому среднему значению проверяются дальнейшие критерии.

Шаг 10. Оценка экономических потерь в дорожном движении от задержек дорожных транспортных средств на конкретном железнодорожном переезде. При уровне экономических потерь в зоне железнодорожного переезда более установленного значения сохранение переезда не допускается. При значении показателя менее или равного допустимому среднему значению проверяются дальнейшие критерии.

Шаг 11. Оценка экологических потерь в дорожном движении от задержек дорожных транспортных средств на конкретном железнодорожном переезде. При уровне экологических потерь в зоне железнодорожного переезда более установленного значения (отдельно – для населенного пункта, отдельно – для незастроенной территории) сохранение железнодорожного переезда не допускается. При значении показателя менее или равного допустимому среднему значению переезд может быть сохранен.

Как видно из описания алгоритма, большое значение в его использовании играет наличие исходных данных.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен сбор имеющихся исходных данных по железнодорожным переездам на автомобильных дорогах Республики Казахстан в Западно-Казахстанской, Атырауской, Туркестанской, Костанайской, Павлодарской, Восточно-Казахстанской областях.

2. Приведены общая характеристика железнодорожной сети Республики Казахстан, характеристика и классификация железнодорожных переездов. Дана характеристика исследуемой группы железнодорожных переездов. Выполнена оценка безопасности движения на переездах. Сформулированы методика детального исследования железнодорожных переездов и основные требования к проведению анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский, Д. В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д. В. Капский. Минск: БНТУ, 2008. 243 с.
2. Повышение безопасности движения на пересечениях автомобильных дорог с железнодорожными путями / Е. Н. Кот [и др.] // Вестник БелГУТ. Наука и транспорт. 2005. Т. 10, № 1. С. 28–31.
3. Врубель, Ю. А. Опасности в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский. М.: Новое знание, 2013. 244 с.
4. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 252 с.
5. Организация движения на пересечениях автомобильных и железных дорог / Д. В. Капский [и др.] // Дороги и мосты: сб. науч. статей. Киев, 2006. Вып. 4. С. 337–346.
6. Совершенствование организации движения на железнодорожных переездах Республики Беларусь / Д. В. Капский [и др.] // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: АМБ, 2006. С. 107–112.
7. Пересечение автомобильных дорог с железнодорожными путями / Е. Н. Кот [и др.] // Вестник БНТУ. 2006. № 3. С. 65–68.
8. Аудит безопасности дорожного движения / Д. В. Капский [и др.]. Гомель: БелГУТ, 2015. 428 с.
9. Railway Safety in the European Union. Safety Overview 2017 [Electronic resource] / European Railway Agency. Mode of access: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/library/docs/safety_interoperability_progress_reports/railway_safety_performance_2017_en.pdf.
10. Report on Railway Safety and Interoperability in the EU. 2018 [Electronic resource] / European Railway Agency. Mode of access: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/library/docs/safety_interoperability_progress_reports/railway_safety_and_interoperability_in_eu_2018_en.pdf.
11. SELCAT D2 – Report about Examination of Actual and Potential Technologies for Level Crossing [Electronic resource] / R. Slovak. 2008. Mode of access: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20120320_102051_63772_Final%20Report%20for%20Publication.pdf. Date of access: 20.03.2019.
12. Assessment of Safety at Level Crossings in UNECE Member Countries and Other Selected Countries and Strategic Framework for Improving Safety at Level Crossings: ECE/TRANS/WP.1/2017/4 [Electronic resource] / Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee. Geneva, 2017. Mode of access: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/wp1/ECE-TRANS-WP1-2017-4e.pdf>.
13. О дорожном движении [Электронный ресурс]: Закон Республики Казахстан от 17 апреля 2014 года № 194-V ЗРК, с изм. и доп. по сост. на 01.01.2019. Режим доступа: ИПС Әділет.

14. Правила дорожного движения [Электронный ресурс]: постановление Правительства Республики Казахстан от 13 ноября 2014 года № 1196, с изм. и доп. по сост. на 01.01.2019. Режим доступа: ИПС Әділет.
15. Правила эксплуатации железнодорожных поездов [Электронный ресурс]: приказ министра транспорта и коммуникаций Республики Казахстан от 25 марта 2011 года № 168, с изм. и доп. по сост. на 30.06.2017. Режим доступа: ИПС Әділет.
16. Об утверждении формы статистического отчета «О дорожно-транспортных происшествиях, повлекших гибель или ранение людей» и Инструкции по его формированию [Электронный ресурс]: приказ Генерального прокурора Республики Казахстан от 16 ноября 2015 года № 131, с изм. и доп. по сост. на 26.09.2017. Режим доступа: ИПС Әділет.

Поступила 17.05.2019

Подписана в печать 06.08.2019

Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Kapsky D. V. (2008) *Traffic Accident Prediction*. Minsk, Belarusian National Technical University. 243 (in Russian).
2. Kot E. N., Kapsky D. V., Rozhanskii D. V., Karasevich S. N. Increasing Safety of Movement on Highway Railway Crossings. *Vestnik Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Transporta: Nauka i Transport = Bulletin of Belarusian State University of Transportation. Science and Transport*, 10 (1), 28–31 (in Russian).
3. Vrubel Yu. A., Kapsky D. V. (2013) *Dangers in Traffic*. Minsk, Novoe Znanie Publ. 244 (in Russian).
4. Vrubel Yu. A., Kapsky D. V., Kot E. N. (2006) *Determination of Losses in Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 252 (in Russian).
5. Kapsky D. V., Kot E. N., Rozhanskii D. V., Karasevich S. N. (2006) Organization of Traffic at the Intersections of Automobiles and Railways. *Dorogi i Mosty: Sb. Nauch. Statei* [Roads and Bridges: Collection of Scientific Papers], Kiev, (4), 337–346 (in Russian).
6. Kapsky D. V., Kot E. N., Rozhanskii D. V., Karasevich S. N. (2006) Improvement of the Organization of Traffic at Railway Crossings in the Republic of Belarus. *Sotsial'no-Ekonomicheskie Problemy Razvitiya Transportnykh Sistem Gorodov i Zon ikh Vliyaniya: Materialy XII Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Socio-Economic Problems on Development of Transport Systems in Cities and Zones of their Influence: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference]. Ekaterinburg, AMB Publ., 107–112 (in Russian).
7. Kot E. N., Kapsky D. V., Rozhanskii D. V., Karasevich S. N. (2006) Intersection of Roads with Railways. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (3), 65–68 (in Russian).
8. Kapskii D. V., Azemsha S. A., Mozalevskii D. V., Skirkovskii S. V., Korzhova A. V., Polkhovskaya A. S., Ermakova N. S., Artyushevskaya S. N., Kuz'menko V. I. (2015) *Road Safety Audit*. Gomel, Belarusian State University of Transportation. 428 (in Russian).
9. European Railway Agency (2017) *Railway Safety in the European Union. Safety Overview 2017*. Available at: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/library/docs/safety_interoperability_progress_reports/railway_safety_performance_2017_en.pdf.
10. European Railway Agency (2018) *Report on Railway Safety and Interoperability in the EU. 2018*. Available: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/library/docs/safety_interoperability_progress_reports/railway_safety_and_interoperability_in_eu_2018_en.pdf.
11. Slovak R. (2008) *SELCAT D2 – Report about Examination of Actual and Potential Technologies for Level Crossing*. Available at: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20120320_102051_63772_Final%20Report%20for%20Publication.pdf. (Accessed 20 March 2019).
12. Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee (2017) *Assessment of Safety at Level Crossings in UNECE Member Countries and Other Selected Countries and Strategic Framework for Improving Safety at Level Crossings: ECE/TRANS/WP.1/2017/4*. Geneva. Available at: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/wp1/ECE-TRANS-WP1-2017-4e.pdf>.
13. On the Road Traffic: Law of the Republic of Kazakhstan dated April 17, 2014 No 194-V ZRK [Law of the Republic of Kazakhstan], with Amendments and Additions as of 01.01.2019. Available at: Information Legal System “Adilet” (in Russian).
14. Traffic Regulations: Order of the Government of the Republic of Kazakhstan dated November 13, 2014, No 1196, with Amendments and Additions as of 01.01.2019. Available at: Information Legal System “Adilet” (in Russian).
15. Rules for the Operation of Level Crossings: Order of the Minister of Transport and Communications of the Republic of Kazakhstan dated March 25, 2011, No 168, with Amendments and Additions as of 30.06.2017. Available at: Information legal system “Adilet” (in Russian).
16. On the Approval of the Form of the Statistical Report “On Road Accidents that Resulted in the Death”: Order of the Prosecutor General of the Republic of Kazakhstan from November 16, 2015, No 131, with Amendments and Additions as of 26.09.2017. Available at: Information Legal System “Adilet” (in Russian).

Received: 17.05.2019

Accepted: 06.08.2019

Published online: 31.05.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-234-242>

УДК 625.122+625.142.4

Рельсовый путь с обжатием рельса

Канд. техн. наук, доц. В. Н. Суходоев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Проблема гашения шума на рельсовых путях, возникающего при движении поезда, решается достаточно просто, если рельс с прокладками уложить внутри продольно расположенной ленточной шпалы-механизма. Результат – слоистая рельсовая нить, состоящая из лент: лента рельса с упругими прокладками по трем сторонам, лента шпалы-механизма и балластного слоя. Единение слоев осуществляется благодаря собственной массе. Это – статика пути без внешней нагрузки. Обжатие рельса – эффективное свойство рельсовых путей – образуется в шпале-механизме под воздействием вертикальных сил с подвижками и их горизонтальных производных. При нагружении пути обжатие осуществляется многократно с последующей разгрузкой. При этом каждые предшествующие изменения условий в работе пути учитываются в дальнейшем цикле нагружения и разгрузки. Рельсовый путь с обжатием рельса – разновидность самоприспосабливающейся линейной системы, необходимая при частых изменениях нагрузки и условий эксплуатации для бесшумного исполнения функционального предназначения. Специфика такого пути в том, что движением колеса создаются вибрация рельса и шум, которые тут же гасятся обжатием с демпфированием. Баланс между возникновением шума и его гашением достигается соотношением длин плеч полушпалы как рычага. Условием появления сдвига сил обжатия в направлении от вертикального плеча полушпал служат неодинаковые осадки горизонтального плеча полушпалы L-образной формы и внецентренное ее нагружение. В результате исследований установлены преимущества рельсового пути с обжатием рельса, что является гарантом устойчивости расчетных параметров при продолжительной эксплуатации пути. Стоимость рельсового пути с обжатием рельса в результате экономии стали, снижения расходов на производство работ и эксплуатационные потребности уменьшается в два раза.

Ключевые слова: рельс, обжатие, эффект обжатия рельса, полушпала L-образного сечения, гашение шума, рельсовая нить, цельный участок, механизм обжатия

Для цитирования: Суходоев, В. Н. Рельсовый путь с обжатием рельса / В. Н. Суходоев // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 234–242. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-234-242>

Rail Track with Rail Compression

V. N. Sukhodoiev¹⁾

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

Abstract. The problem of damping the noise on the track, arising from the movement of the train, is solved sufficiently but it is simple, if the rail with spacers is laid inside the longitudinally located band sleeper-mechanism. The result is a layered rail thread, consisting of belts: a rail tape with elastic spacers on three sides, a tie-mechanism tape and a ballast layer. The unity of the layers is carried out due to their own mass. This is the static track without external load. Rail compression is an effective property of rail tracks. It is formed in the sleeper mechanism under the influence of vertical forces with displacements and their horizontal derivatives. When loading the track, the compression is carried out repeatedly with subsequent unloading. In this case, each previous changes in the conditions in work of the track are taken into account in the subsequent cycle of loading and unloading. A rail track with a rail compression is a kind of self-adapting linear system, which is necessary with frequent changes in load and operating conditions for silent performance of a functional purpose. The specificity of this path is that the movement of the wheel creates rail vibration and noise, which are immediately damped by compression with damping. The balance between the occurrence of noise and its suppression is achieved by the ratio of the lengths of half-sleeper shoulders as a lever. The condition for the appearance of a shift of the compression forces in the direction from vertical shoulder of the half-sleepers is the unequal settlements of the horizontal shoulder of the L-shaped half-sleepers and its eccentric loading. As a result of the research, the advantages of a rail track with rail compression have been revealed, which is

Адрес для переписки

Суходоев Валерий Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/3,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-04
vm3_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Sukhodoiev Valeriy N.
Belarusian National Technical University
65/3, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-04
vm3_ftk@bntu.by

a guarantor of the stability of the design parameters during long-term operation of the track. The cost of a rail track with rail reduction is halved as a result of steel savings, lower labor costs and operational needs.

Keywords: rail, compression, rail compression effect, half-sleeper with L-shaped section, noise suppression, rail thread, solid plot, compression mechanism

For citation: Sykhodoev V. N. (2021) Rail Track with Rail Compression. *Science and Technique*. 20 (3), 234–242. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-234-242> (in Russian)

Введение

Рельс с прокладками внутри продольно расположенной ленточной шпалы-механизма образуют слоистую рельсовую нить. В статике единение слоев осуществляется благодаря собственной массе. В динамике, которую создает накат груженого колеса, происходит постепенно нарастающее единение рельса с ленточной шпалой обжатием и практически одновременно гасятся образованные накатом колеса вибрация рельса и шум.

Цель исследований – создание конструкции бесшумного ленточного рельсового пути с обжатием рельса, изучение специфики обжатия рельса и демпфирования шума, выявление закономерностей, на базе которых можно создавать бесшумные рельсовые пути.

Описание работы ленточного рельсового пути

Движение поезда по рельсовому пути сопровождается шумом и вибрацией рельса. Следует отметить, что металлический рельс не зазвучит, если осуществлять единение его с массой железобетонной шпалы-механизма и массой основания из балласта и грунта при каждом накате колеса с последующей разгрузкой. Решается такая проблема просто – прокладкой рельсов внутри продольно расположенных ленточных шпал-механизмов.

В процессе наката колеса с грузом в рассчитываемом сечении происходит постепенное увеличение загрузки и упругих подвижек. Рельс по вертикали загружается колесом с грузом с ответной реакцией основания, по горизонтали – производными вертикальных сил (силами обжатия с подвижками). Таким образом, при каждом накате колеса происходит сжатие рельса в двух плоскостях, единение его с массой железобетонной шпалы-механизма и массой основания из балласта и грунта. То есть рассматриваемый ленточный путь характеризуется обжатием рельса, демпфированием, гашением шума и вибрацией. Подвижки сил обжатия в шпале-механизме ограничены величиной

деформации боковых прокладок рельса и возможностями производных сжимаемости основания.

Формируется цельный участок в зоне колеса с грузом, и по нему принимаются координаты рассчитываемого сечения рельса и рельсовой нити. Отметим, что в зоне загрузки сосредоточенной силой данное сечение располагается под колесом. На цельном участке рельсовой нити под грузом обжатый рельс работает в условиях, аналогичных работе жесткой арматуры в бетоне. Это максимальная статика процесса единения. Динамическое единение рельсовой нити с повторностью – объект разработки, исследования и систематизации результатов с целью получения гарантированных условий обжатия рельса и демпфирования для гашения шума [1–12] при движении поезда по трассе с возможными изменениями грунтовых условий либо схемы или величины загрузки.

Своеобразный шум образуется при движении поезда по рельсам с постоянной скоростью, например, электрички на прямых участках пути. Движение трамвая в городских условиях происходит с частым изменением скорости и шумом, движение поезда метро – с шумом, который усиливается в ограниченном пространстве [13]. Отсюда вывод: нужно гасить шум в момент его возникновения. Наиболее простое решение – обжатие рельса на длине цельного участка рельсовой нити при накате груженого колеса.

Упругое сопротивление зернистой среды возможно при небольших ее деформациях – доли миллиметров сжимаемости основания цельного участка [7]. Условием появления достаточно значимых подвижек, т. е. сдвига сил обжатия в направлении от вертикального плеча полушпал, служат неодинаковые осадки горизонтального плеча полушпалы L-образной формы и внецентренное ее нагружение. Для обжатия подходит основание из натуральных материалов (щебня, грунта) с неизменными характеристиками, либо основание-конструкция, обладающее постоянными свойствами. Дополнительные факторы, влияющие на величину

чину подвижек, – характеристики полушпалы-рычага и сжимаемость основания.

На протяжении 220 лет продолжают разработку и внедрение рельсовых путей, уложенных на поперечно расположенные шпалы, а также 20 лет после патентования [14] разрабатывается рельсовый путь с обжатием рельса. Конкуренцию последнему обеспечивают простота конструкции рельсовой нити и пути в целом, доступная технология строительства и обжатия рельсов, бесшумность работающего пути, меньшая стоимость, а также улучшенная защита балласта от загрязнения и рельса от внешней агрессивной среды. Все это – в процессе качения колеса без привлечения дополнительных ресурсов.

Если в рельсовом пути изменить конструкцию шпального фундамента [14], для чего рельс уложить не по верху поперечно расположенных шпал, а на горизонтальные плечи L-образной формы ленточных полушпал в составе шпал-механизмов, тогда прерывистый фундамент рельсовой нити будет заменен ленточным фундаментом с новыми эффективно работающими свойствами. Специфика работы системы проявляется каждый раз при накате колеса и единении контактирующих слоев рельсовой нити в одно целое. Такие две рельсовые нити образуют конструкцию ленточного рельсового пути [13], где создание условий образования обжатия рельса и демпфирования шума в процессе строительства рельсовой нити сделает рельсовый путь бесшумным при эксплуатации. Итак, если заменить шпальный фундамент с поперечно расположенными шпалами и уложенными по ним рельсами на продольно расположенные ленточные шпалы-механизмы с вложенными рельсами, появляется возможность гасить шум обжатием рельса одновременно с накатом колеса, создающего шум.

Энергия наезжающего колеса расходуется на упругое обжатие половины длины цельного участка впереди колеса и на высвобождение упругих сил при откате. Следующий накат колеса осуществляется на уже бывшее в употреблении сечение и восстановленное в процессе отката колеса освобожденными силами упругости в первоначальное состояние с учетом износа, происходит притирка поверхностей качения сосредоточенными силами. Совершается цикл «нагрузка – разгрузка» с частотой и скоростью проезжающих поездов. Многократный цикл «нагрузка – разгрузка» рельса

создает самоприспособливание рельсовой нити к меняющимся внешним воздействиям.

Хороший результат дают обжатие рельса с упругими прокладками на его стенке, механический стык рельсов, балласт, а обжатием с демпфированием достигается бесшумность. Обжатые механические стыки рельсов становятся жесткими и безударными. В сравнении с жесткостью одиночного рельса на шпальной решетке вертикальная жесткость обжатой рельсовой нити в три-четыре раза больше, а ее жесткость по горизонтальному направлению увеличивается в 60–70 раз. Единение рельсовой нити с основанием усилено заглублением, а также увеличением длины слоев рельсовой нити. Эти факторы предупреждают, кроме того, сдвиг рельсов от угона.

В [13] специфические отличия нового пути, его технические, экологические и экономические преимущества показаны на примере конструкции трамвайного пути с эффектом обжатия рельса. Авторы [13] систематизировали сведения, приведенные в [1–4, 13–15], и дополнили их информацией о слабых местах новой конструкции пути. При этом термин «эффект обжатия» отличается от термина «эффект граблей» только названием. В [13] расчеты рельсовой нити произведены с осредненными исходными значениями: сила обжатия по горизонтали 17,5 % груза, коэффициент трения бетона по щебню балласта 0,3. Результаты расчетов с использованием гипотезы Фусса – Винклера и уравнения равновесия статики подтверждают аналогичные расчеты, выполненные с помощью метода конечных элементов. Роль массы рельса оценивалась соотношением массы груза и рельса на длине цельного участка.

По мере наката колеса с грузом к рассчитываемому сечению происходит увеличение его загрузки по эпюре растущего треугольника с ориентировочной длиной основания $3d$, соответственно увеличиваются силы обжатия рельса и гашение шума. Груз колеса распределяется рельсовой нитью по эпюре равнобедренного треугольника, составленного из двух прямоугольных симметрично расположенных относительно расчетного сечения треугольников под колесом [15]. Высота треугольника равна значению груза, длина основания $6d$ – расчетной длине цельного участка как функции силового фактора [13]. Аналогично происходит изменение суммарной жесткости сечения рельсовой нити и сил обжатия. В результате возникает стабильность напряженно-деформированного

состояния пути, увеличивается продолжительность его эксплуатации, а также устанавливается низкий уровень шума.

Необходимость установки поперечных связей между полушпалами в основном диктуется технологичностью транспортных и монтажных работ. Если в процессе эксплуатации произойдет раздвижка полушпал в шпале-механизме, это приведет к увеличению эксцентриситета нагрузки и росту сил обжатия. Если в эксплуатационный период происходят износ частей рельсового пути, некоторое нарушение плотности их взаимодействия, появление шума, то они просто устраняются в процессе повторного цикла «нагрузка – разгрузка».

Полушпала – железобетонная балка с поперечным сечением L-образной формы, работает в составе шпалы-механизма, служит конструктивным элементом, преобразующим вертикальные силы и сжимаемость основания в силы обжатия и их подвижки. При этом величина подвижек сил обжатия превышает значение деформации боковых прокладок, что гарантирует обжатие. Существенным для процесса обжатия является внецентренное нагружение горизонтального плеча полушпал. Неодинаковая сжимаемость основания при внецентренном нагружении полушпалы сопровождается неравномерной ее осадкой и наклоном горизонтального плеча. Отсюда – крен вертикального плеча и горизонтальные подвижки (перпендикулярные ему) сил обжатия, распределенные по эпюре треугольного очертания.

В процессе исследований для удобства вычислений и анализа результатов произведена замена распределенной нагрузки равнодействующими – горизонтальной силой обжатия и ее подвижкой. Аналогично выполнена замена реактивного давления основания на горизонтальное плечо полушпалы. В результате полушпала получила свойства рычага L-образной формы, что упростило исследование и вариантное проектирование производных сил и перемещений. Закономерности движения полушпалы характеризуют определенность движения звеньев и сил рельсового пути новой конструкции. Сдвоенные полушпалы образуют шпалу-механизм, в которой при накате колеса создается плотное единение с вложенным рельсом.

Шпала-механизм – ленточный фундамент с разъемом внизу и канавкой в верхней части. Состоит из двух железобетонных полушпал, смонтированных по разные стороны шейки рельса. Вариант проектного решения железобе-

тонной шпалы-механизма под нагрузку 70 кН изложен в ТУ РБ 100649841.338–2003 «Шпалы-механизмы железобетонные сборные». С целью гарантированного наклона ее и крена вложенного в канавку рельса образуют шпалу-механизм из полушпал разной ширины. Это позволяет изменением ширины постелей полушпал регулировать величину крена рельсовой нити и вложенного рельса.

Встречный крен рельсовых нитей на целом участке необходимо устраивать для сохранения проектной ширины колеи от действия изменчивой по величине динамической нагрузки проезжающих поездов. Это автоматически срабатывающая регулировка вместо нерегулируемого наклона рельса при строительстве пути на шпальной решетке. Постоянство колеи сохраняется сопротивлением поперечному сдвигу по балласту и грунту основания заглубленных в грунт длинных рельсовых нитей. Некоторый аналог – сопротивление сдвигу поперечно расположенной в составе шпальной решетки короткой шпалы продольному угону рельса.

Массивная шпала-механизм на длине целого участка обжатием «навешивается» на длинный рельс, при этом коэффициент устойчивости на опрокидывание рельса увеличивается (например, устойчивость Р43 – до 3,26 с устойчивости 1,63) [3, 4].

Проведены натурные испытания отрезка рельсового пути, сравнимого с длиной целого участка. Результаты – положительные, на них не сказалась даже впервые выполненная подготовка участка [4]. Это характеризует устойчивость рельсового пути с обжатием. В технологии изготовления шпалы-механизма проявились технологические неудобства заполнения формы бетоном вручную. Форма раскрылась легко, а это – фактор технологичности ремонтных работ по замене рельса с изношенной головкой.

Обжатие – процесс единения рельса и шпалы-механизма сжатием вертикальными силами наезжающего колеса и реакции основания, сжатием с боков через полушпалы горизонтальными силами с подвижками, демпфированием вибрации и шума. Значимое обжатие происходит на длине целого участка по мере наката колеса с грузом с участием рычагов L-образной формы (полушпал) вместе со сжимаемостью основания рельсовой нити. Безотказное действие сил обжатия и их подвижки можно гарантировать потому, что создаются они преобразо-

ванием полушпалами прочностных и упругих свойств вертикально деформируемого основания шпалы-механизма, нормируемого.

Подвижки сил обжатия – производные сжимаемости основания. Задача – формирование возможной подвижки силы обжатия по величине, равной деформации сжатия этой силой вертикальной прокладки, уложенной сбоку шейки рельса. На рельсовом пути с обжатием рельса задача решалась с большим запасом. Мощность основания полушпалы во много раз превышала толщину боковых прокладок, поэтому сжимаемость основания была больше деформации боковых прокладок. Этим превышением гарантируются обжатие рельса и самоприспособливание рельсовой нити к меняющимся внешним условиям в процессе длительной эксплуатации. Кроме того, можно рассматривать варианты устройства основания [3] и преобразовывающие возможности полушпалы-рычага. Например, подвижка на уровне равнодействующей сил обжатия составила 1,1 мм при осадке от сжимаемости основания 0,4 мм [13].

На момент переката колеса через расчетное сечение рельсовая нить приобретает свойства балки с жесткой арматурой и погашенным обжатием и демпфированием шума. Далее происходит уменьшение силы обжатия с разуплотнением слоев, что позволяет погасить вибрации и шум на длинном рельсе. Значительные обжатие и разуплотнение образуют в сумме нагруженный участок рельсовой нити – цельный участок в зоне воздействия колеса на длине около $6d$ [1, 2]. Здесь $6d$ – длина первой волны прогибов рельсовой нити с максимальным прогибом, остальные волны прогибов рельсовой нити практического значения не имеют [3, 13]. Кроме того, упаковывая рельс в бетон через упругие прокладки по трем сторонам, снижаются напряженно-деформированное состояние рельсовой нити в целом и воздействие рельса на бетон через контактирующие поверхности, в связи с чем уменьшается уровень производимого колесом и рельсом шума. Такая ситуация – следствие перехода на распределенную передачу сил между слоями и на ленточные элементы в конструкции пути. В данном случае лента выделяется как объект, формирующий рельсовый путь с обжатым рельсом: лента балластного слоя, лента рельсовой нити, лента шпалы-механизма, лента рельса. Поэтому предлагаемый рельсовый путь – путь без концентрации напряжений и деформаций с увеличенным ремонтным периодом.

Ленточное единение со шпалой-механизмом обеспечивается без концентраторов, т. е. без отверстий, болтов и костылей. Рельс в конструкции пути с обжатием не испорчен отверстиями под болты скрепления. На рельсовом пути с обжатием рельса не происходит накопление остаточных деформаций, поскольку рельсовая нить после каждого нагружения-разгрузки автоматически восстанавливается с учетом износа, т. е. срабатывает самоприспособливание системы. За пределами цельного участка собственный вес рельса предохраняет рельсовую нить от образования щелей между слоями и от загрязнения.

Износ головки рельса поначалу улучшает контакт поверхностей качения колеса и рельса, осуществляется притирка. Однако колеса поезда имеют разное состояние наката. Поэтому контакт колеса и рельса не постоянен. Возрастает роль обжатия, являющегося фактором единения слоев, улучшенной передачи динамической нагрузки на основание.

Бесшумность гарантируется обжатием рельса с демпфированием шума, а также правильным исполнением обозначенных факторов. Рельсы, зажатые в железобетонной шпале-механизме, теряют возможность вибрировать. В двух плоскостях возрастают несущая способность и устойчивость рельса, поэтому часть его функций принимает шпала-механизм. Отсюда – возможность уменьшения массы рельса, отсутствие потребности в крепежных деталях. Надежность гарантируют простота конструкции и обжатие рельса внецентренным нагружением, отсутствие мест концентраторов, удобство качественной укладки ленточного рельсового пути с обжатием рельса.

Величину силы обжатия следует находить из уравнения моментов относительно горизонтальных связей полушпал, расположенных в шпале-механизме на уровне толщины защитного слоя из бетона [13]. Обжатие рельса усиливается, если уменьшать высоту шпалы-механизма при неизменной ширине.

В научных трудах разработаны и предлагаются к обсуждению специальные термины с описанием их содержания, характеризующие конструкцию бесшумного рельсового пути, сопутствующий потенциал его развития на городском общественном транспорте. Термины служат пособием для написания разрабатываемой нормативно-технической документации проектирования, строительства и эксплуатации бесшумных рельсовых путей с обжатием рельса.

Эффект обжатия – результат обжатия рельса на длине цельного участка с демпфированием шума. Эффект обжатия можно увеличить, если применить трапецеидальную форму поперечного сечения [8–12, 14] рельсовой нити (резерв). При этом создается обжатие и самой шпалы-механизма, увеличиваются сила обжатия и обжатие вложенного в шпалу рельса, но под действием вибрации ослабевают стабильность единения рельсовой нити с балластом. Из чего следует, что сначала нужно рассматривать и анализировать работу шпалы-механизма прямоугольного сечения.

Проектирование рельсового пути с обжатием рельса под заданную нагрузку включает расчет рельсовой нити как балки на упругом основании с помощью гипотезы Фусса – Винклера [13]. Если учитываются распределенные силы обжатия по высоте вертикального плеча полушпалы, расчет производится по методу конечных элементов. Также с помощью этого метода рекомендуется выполнять расчет рельсовой нити в случае конструирования основания или расчет рельсовой нити и железобетонной шпалы-механизма при изгибе с кручением.

Длинные конструктивные элементы оценивают по свойствам и параметрам участка «единичной» длины. За такой участок на рельсовой нити принята длина первого участка из волн ее прогибов [13], определенных по методу расчета балки на упругом основании. С использованием гипотезы Фусса – Винклера вычисляют ее длину и прогиб максимального значения. Параметры волны, симметрично расположенной относительно линии действия груза, характеризуют рельсовую нить в максимально нагруженном, но безопасном состоянии. Поэтому ее длина принимается за расчетную длину цельного участка.

Цельный участок – это обжатый участок рельсовой нити с улучшенными параметрами, со свойствами, по которым можно оценивать рельсовую нить в нагруженном состоянии. Движение колеса по рельсу сопровождается непрерывным образованием и смещением цельных участков со скоростью перемещения груза. Для описания многократного образования на рельсовой нити цельных участков с процессом самоприспособливания обжатия подходит словосочетание «механизм обжатия».

Механизм шпалы-механизма – это подвижно соединенные полушпалы, совершающие под действием приложенных сил определенные движения в двух плоскостях. Механизм рель-

совой нити приводится в действие нарастающей нагрузкой при накате колеса и убывающей нагрузкой при его откате. Соответственно, при наезде происходит единение слоев, при откате срабатывает разуплотнение контактов. Единение и разуплотнение слоев – регулируемые факторы при выборе допустимого уровня шума в окружающую среду.

Многократный цикл «нагрузка – разгрузка» рельсовой нити – механизм стабильности параметров рельсового пути с обжатием рельса для безопасности поездок в эксплуатационный период. Многократным обжатием разнородных слоев механизм придает слоеной конструкции рельсовой нити необходимые для рельсового пути свойства. Механизм восстанавливает функциональные параметры рельсовой нити до уровня исходных (проектных), сохраняет условия эксплуатации, реагирует на появление дефектов в работе элементов пути.

При передаче основанию энергии удара существенно возрастает роль контакта слоев и массы. На площади цельного участка суммарно улучшенный контакт с балластом подошвы двух ленточных параллельно расположенных шпал-механизмов эффективнее включает массу грунта в гашение шума в сравнении с такой же величиной суммарной площади контакта подошвы из поперечных, прерывисто разложенных шпал. Менее заглубленные шпалы, короткие, с большим количеством углов на площади контакта – это концентраторы напряжений и деформаций [5, 13].

В упругой стадии многократные (даже минимальные) перемещения расшатывают систему рельсового пути, уложенного на поперечно расположенные шпалы. В связи с чем ремонтная служба пути должна восстанавливать его исправное состояние. На рельсовом пути с обжатием рельса совершается процесс самовосстановления исправного состояния, поэтому многократно повторяемые подвижки не расшатывают систему рельсового пути, уложенного на продольно расположенные шпалы. Образуется цельный массивный участок, поглощающий вибрацию или передающий ее на балласт и грунт с меньшим количеством концентраций напряжений и деформаций.

Вне пределов цельного участка рельсовая нить состоит из лент без жесткой связи между слоями. Единение слоев образуется массой расположенного выше слоя. Непостоянство жесткости рельсовой нити за пределами цельного участка эффективно скажется на погаше-

нии вибрации, поступающей вдоль по рельсу от источника, находящегося за его пределами.

Угон пути – продольное смещение железнодорожных рельсов в сторону движения, вызванное продольными усилиями в рельсовых нитях, возникающими при движении поездов от ударов колес в концы рельсов на стыках, при торможении подвижного состава. На рельсовом пути с обжатием не образуется угон рельсов. Практически нет колебаний и изгиба рельсов со смещением опорных сечений, свойственных рельсовой нити, состоящей только из рельса на шпальной решетке с допускаемым его прогибом 2–4 мм. На новом пути в обжатом стыке не увеличивается зазор; обжатый стык работает как цельный рельс.

По Г. Амонтоу, силы сопротивления сдвигу зависят от коэффициента трения и давления и не зависят от размеров контактных поверхностей. Коэффициент трения металлического рельса по прессованной резине прокладок, уложенных по бокам шейки рельса и под подошвой, больше коэффициента трения металлического колеса по металлу рельса. Поэтому угон рельса и любого другого слоя в ленточном рельсовом пути не образуется даже при появлении сдвигающей силы торможения или разгона.

При упаковке рельса (с прокладками из прессованной резины по сторонам шейки рельса и с прокладками под его подошвой) в железобетонную шпалу-механизм увеличивается устойчивость рельса и рельсовой нити, практически исключаются боковые силы трения, но срабатывают силы трения по подошве.

Пример. Рельсовый путь с обжатием рельса, торможение колеса. Силы сдвига, силы трения – металл колеса по металлу головки рельса. Силы сопротивления уgonу – металл подошвы рельса по уплотненной прорезиненной прокладке. Из-за различия коэффициентов трения образуется больше сил сопротивления сдвигу, т. е. угона нет. А если нет угона, то нет и сдвига по контактным поверхностям шейки рельса резиновых прокладок, нет горизонтальных боковых продольных сил трения.

В упругой постановке задачи продольные боковые силы трения проявятся после преодоления сил трения по подошве. Иначе эти силы не работают и составляют резерв. Вертикальные подвижки рельса ограничены деформациями (амплитудой) прокладки под подошвой рельса на длине цельного участка. Колебаться – значит, раскачиваться сверху вниз. Например, в трамвайном пути рельсовая нить с обжатием

имеет амплитуду 0,4 мм [13], значение которой мало, поэтому нет условий для образования колебаний рельса, работающего совместно с железобетонной упаковкой, как невозможно раскатать механическое единение слоев рельсовой нити, работающее в системе «обжатие – отжатие» совместно с массой основания из балласта и грунта при многократном цикле «нагрузка – разгрузка».

Вывод – угон рельсов не образуется по нескольким причинам. Из-за увеличения через обжатие массы рельса массой железобетонной шпалы-механизма исключается его вибрация. Практически исключен его прогиб благодаря увеличению жесткости рельсовой нити. Коэффициент трения прорезиненной прокладки под подошвой рельса больше, чем колеса по рельсу. Удар колеса в торец принимающего рельса, зажатого обжатием в железобетонной шпале-механизме, возможен при наличии большого зазора и как исключение. За пределами цельного участка слои рельсовой нити разной жесткости если и вибрируют, то неодинаково, и не могут создать резонанс колебаний.

В рельсовом пути с обжатием на участке перекачивания колеса механическое единение рельсов сработает как сварной стык, если соединение будет обжато и усилено шпалой-механизмом. Схема соединения может быть в разных вариантах исполнения. Рассмотрим возможный случай. В процессе эксплуатации в рельсе появилась трещина, такое место можно сравнить с устройством механического стыка рельсов торцами. Несущая способность рельсовой нити не уменьшилась. Исходя из условия восстановления прочности рельсовой нити, ремонт не требуется. Но для рельсового пути с обжатием, учитывая его новизну, нужно выбрать тип электрического соединения с учетом его обжатия в механически обжатом стыке рельсов. Как вариант, представляет интерес устройство контактного электрического соединения по правилу вилки с розеткой. Такое соединение не требует выполнения сварочных работ на линии, но является временным.

Производимый рельсом шум уменьшается поглощением колебаний массой шпалы-механизма, балласта и грунта – как результат улучшенных обжатием контактов ленточных слоев. При этом сопутствующие факторы с гарантией обеспечивают небольшое, без образования щелей между слоями рельсовой нити, но постоянное обжатие также и за пределами цельного участка. То есть регулируемое гашение шума на рельсовом пути с обжатием рельса

осуществляется в процессе обжатия рельса на цельном участке производными груза и сопутствующих факторов, нерегулируемое – только собственной массой слоев.

Рельс и длинная железобетонная шпала-механизм – ленты с постоянными свойствами, еще один фактор бесшумности. Такие ленты на рельсовом пути с обжатием рельса обеспечат конечную цель: рельсовая нить – постоянство сжимаемости на всем пути.

Звукопоглощающая среда рельсового пути с обжатием – это звукопоглощение, звукоизоляция, демпфирование. Звукопоглощающие свойства акустических материалов обусловлены пористой структурой, наличием большого числа открытых, сообщающихся между собой пор (например, балласт из щебня, материковый грунт, искусственные материалы). Большая разновидность свойств этих материалов используется при конструировании основания из них [13].

Звукоизоляция достигается шумозащитными экранами из железобетонных вертикальных стенок канавки, упругими прокладками по бокам шейки рельса и под подошвой, т. е. звукоизоляцией его упругими прокладками и железобетонным обрамлением с трех сторон.

В холодное время года в два-три раза увеличивается жесткость пути вследствие промерзания земляного полотна, балластного слоя, снижения упругости резиновых прокладок. Но вместе с этим резко возрастет динамика воздействия колеса на промерзшие элементы пути: вибрация и деформация слоев будут способствовать разрушению промерзания, восстановлению свойств слоев и их единению. Резкие колебания температуры может сгладить работа рельса в массе железобетонной шпала-механизма. Так, при охлаждении происходит выправление рельса растяжением, при повышении температуры головка рельса открыта для лучей солнца, шейка и подошва закрыты в бетоне. Имеет место взаимовлияние различных деформаций, но без выброса пути.

ВЫВОДЫ

1. Установленные преимущества рельсового пути с обжатием рельса служат гарантом устойчивости его работы в процессе эксплуатации:

– простота конструкции обеспечивает удобство для качественного и безопасного исполнения ленточного единения рельса со шпалой-механизмом обжатием без крепежных деталей,

а также самовосстановление обжатия при постоянном износе пути;

– безопасность поездок по рельсовому пути с обжатием рельса усилена и гарантируется работой длинных рельсовых нитей, которая отличается от работы шпальной решетки из коротких, поперечно разложенных шпал и рельса по ним;

– устойчивость колеи и основания достигается работой длинных рельсовых нитей со встречным наклоном подошв и встречным креном рельсов, стабильностью сопутствующих факторов, таких как внецентренное нагружение рельсовых нитей, сжимаемость основания и преобразующая полушпала-рычаг.

2. Рельсовые пути с обжатием создаются и работают по известным закономерностям, поэтому нет проблем с их внедрением. Простая по устройству ленточная конструкция рельсовой нити – основа проектирования бесшумных рельсовых путей с обжатием рельса для различных видов городского транспорта (трамвая, метро, железной дороги).

3. Выполненные исследования доказывают, что рельсовый путь с обжатием рельса благодаря простоте исполнения и эффективности в процессе работы может быть одним из условий решения транспортных проблем города с гарантией безопасности и бесшумности. При этом период строительства километра пути – один-два месяца. Новизна проекта подтверждена патентами Республики Беларусь и Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суходоев, В. Н. Ленточный путь избавления от грохота / В. Н. Суходоев // Ахова працы. 2001. № 6. С. 28–29.
2. Суходоев, В. Н. О надежности и долговечности ленточного трамвайного пути / В. Н. Суходоев // Перспектива развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: Междунар. сб. науч. тр. Гомель: БелГУТ, 2005. С. 120–122.
3. Суходоев, В. Н. О прочности скрепления рельса со шпалой механизмом в ленточном трамвайном пути / В. Н. Суходоев // Инновационные технологии в строительстве автомобильных дорог, мостов и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2008. С. 356–367.
4. Суходоев, В. Н. Результаты натурных испытаний шпала-механизма и отрезка ленточного трамвайного пути / В. Н. Суходоев, Р. С. Юренин, В. В. Коробан // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2006. Т. 1. С. 405–407.

5. Суходоева, Н. В. Зависимость интенсивности шума от величины обжатия рельса / Н. В. Суходоева, А. Е. Кончиц, А. В. Трушкина // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2012. Т. 2. С. 225.
6. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов / С. П. Тимошенко. М.: Наука, 1965. Т. 2. С. 18–20.
7. Соболевский, Д. Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д. Ю. Соболевский. Минск: Наука і тэхніка, 1994. 232 с.
8. Байков, В. Н. Железобетонные конструкции / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. М.: Стройиздат, 1985. 368 с.
9. Суходоев, В. Н. Алгоритм и программа расчета силы обжатия рельса / В. Н. Суходоев, Л. В. Конотоп, М. В. Кравченко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2012. Т. 2. С. 224.
10. Сосыанц, В. Г. Рельсовые пути и дороги / В. Г. Сосыанц. М.: Стройиздат, 1965. С. 117, 145–148.
11. Мелентьев, Л. П. Об оптимальном соотношении механических свойств элементов верхнего строения пути / Л. П. Мелентьев // Совершенствование конструкций пути и стрелочных переводов: тр. ЦНИИ МПС. М.: Транспорт, 1973. Вып. 501. С. 31–35.
12. Смолин, Ю. П. Напряжения в земляном полотне от поездной нагрузки / Ю. П. Смолин // Известия вузов. Строительство. 1997. № 7. С. 98–101.
13. Суходоев, В. Н. Эффект обжатия нагружаемого рельса полушпалами L-образного сечения и трамвайный путь / В. Н. Суходоев, А. В. Трушкина, Н. В. Лапенок // Наука и техника. 2015. № 3. С. 79–86.
14. Рельсовый путь: пат. Респ. Беларусь № 3262: МПК E01 B 2/00, E 01B 21/00 / В. Н. Суходоев, А. В. Трушкина. Оpubл. 30.03.2000.
15. Суходоев, В. Н. Конструкция трамвайного пути с эффектом граблей / В. Н. Суходоев // Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы МНТК. Минск: БНТУ, 2013. Ч. 2. С. 276–290.
- ring Personnel in the Republic of Belarus: Proceedings of the 6th International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 356–367 (in Russian).
4. Sukhodoev V. N., Yurenja R. S., Koroban V. V. (2006) Field Test Results of a Sleeper-Mechanism and a Section of Belt Tram Ways. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 3-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 405–407 (in Russian).
5. Sukhodoeva N. V., Konchits A. E., Trushkina A. V. (2012) Dependence of Noise Intensity from the Amount of Rail Compression. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 10-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 225 (in Russian).
6. Timoshenko S. P. (1965) *Resistance of Materials*. Vol. 2. Moscow, Nauka Publ. 18–20 (in Russian).
7. Sobolevskii D. Yu. (1994) *Strength and Bearing Capacity of Dilating Soil*. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ. 232 (in Russian).
8. Baikov V. N., Sigalov E. E. (1985) *Reinforced Concrete Structures*. Moscow, Stroiizdat Publ. 368 (in Russian).
9. Sukhodoev V. N., Konotop L. V., Kravchenko M. V. (2012) Algorithm and Program for Calculating Rail Compression. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 10-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 224 (in Russian).
10. Sosyants V. G. (1965) *Railways and Roads*. Moscow, Stroiizdat Publ. 117, 145–148 (in Russian).
11. Melentiev L. P. (1973) On Optimal Ratio of Mechanical Properties in Elements of Track Superstructure. *Sovershenstvovanie Konstruktsiy i Strelochnykh Perevodov. Tr. TsNII MPS* [Improvement of Track and Turnout Designs: Proceedings of Central Research Institute of the Ministry of Railways]. Moscow, Transport Publ. (501), 31–35 (in Russian).
12. Smolin Yu. P. (1997) Stresses in Subgrade from Train Load. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo = News of Higher Education Institutions. Construction*, (7), 98–101 (in Russian).
13. Sukhodoev V. N., Trushkina A. V., Lapionok N. V. (2015) Squeezing Effect of Rail Loaded by Semi-Sleepers Having L-Shaped Cross-Section. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 79–86 (in Russian).
14. Sukhodoev V. N., Trushkina A. V. (2000) *Rail Track: Patent of the Republic of Belarus No 3262* (in Russian).
15. Sukhodoev V. N. (2013) Tram Track Design with Rake Effect. *Geotekhnika Belarusi: Nauka i Praktika: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Ch. 2* [Geotechnics of Belarus: Science and Practice: Proceedings of International Scientific and Technical Conference. Part 2]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 276–290 (in Russian).

Поступила 13.01.2020

Подписана в печать 18.08.2020

Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Sukhodoev V. N. (2001) Rumble Disposal Belt. *Akhova Pratsy* [Labour Protection], (6), 28–29 (in Russian).
2. Sukhodoev V. N. (2005) About Reliability and Durability of a Tape Tram Track. *Perspektiva Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov v Respublike Belarus': Mezhdunar. Sb. Nauch. Tr.* [Prospects for the Development of New Technologies in Construction and Training of Engineering Personnel in the Republic of Belarus: International Collection of Scientific Works]. Gomel, Belarusian State University of Transport Publ. 120–122 (in Russian).
3. Sukhodoev V. N. (2008) On Strength of Fastening a Rail to a Sleeper with the Help of a Mechanism in a Belt Tram Track. *Innovatsionnye Tekhnologii v Stroitel'stve Avtomobil'nykh Dorog, Mostov i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov v Respublike Belarus': Materialy 6-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Innovative Technologies in the Construction of Roads, Bridges and Training of Engineer-

Received: 13.01.2020

Accepted: 18.08.2020

Published online: 31.05.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-243-247>

UDC 656.1

Innovative Urban Transport System – Autonomous and Locally Low-Emission

W. Choromański¹⁾, I. Grabarek¹⁾, M. Kozłowski¹⁾, A. Czerepicki¹⁾

¹⁾Warsaw University of Technology (Warsaw, Republic of Poland)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. In recent years, intensive research on urban transport has been observed. The search is about finding such solutions that will enable, among others: increasing the importance of public transport, matching transport for the needs of people with reduced mobility, increasing capacity, reducing emissions, energy efficiency (technical and organizational dimension through the organization of transport on demand), increasing the vulnerability to recycling and remanufacturing. The paper presents the main concept and technical solutions of the innovative transport system – HMASSUT Prometheus (Hybrid Modular Autonomous System for Sustainable Urban Transport), which combines the concepts of personal rapid transport and an electric vehicle at the L4 autonomy level (according to the Society of Automotive Engineers classification). An assessment of the effectiveness of an innovative transport system using indicators used in road engineering is given in the paper. The concept of simulation and optimization of the transport network is presented together with the theory of cellular automata.

Keywords: urban transport, autonomous vehicle, electromobility, simulation, theory of cellular automata

For citation: Choromański W., Grabarek I., Kozłowski M., Czerepicki A. (2021) Innovative Urban Transport System – Autonomous and Locally Low-Emission. *Science and Technique*. 20 (3), 243–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-243-247>

Инновационная автономная система городского транспорта с низким уровнем локального загрязнения окружающей среды

Доктора техн. наук, профессора В. Хороманьский¹⁾, И. Грабарек¹⁾,
доктора техн. наук М. Козловский¹⁾, А. Черепицкий¹⁾

¹⁾Варшавский технический университет (Варшава, Республика Польша)

Реферат. В настоящее время появилось множество исследований в области совершенствования городского общественного транспорта. Осуществляется поиск таких решений, которые позволят сделать данный транспорт более значимым и доступным для людей с ограниченными физическими возможностями, увеличить его пропускную способность, сократить выбросы загрязняющих веществ, повысить энергоэффективность путем внедрения перевозок по требованию, усовершенствовать рециклинг материалов и вторичное производство. В статье представлены основная концепция и технические решения новаторской транспортной системы HMASSUT Prometheus (гибридная модульная автономная система устойчивого городского транспорта «Прометей»), сочетающей концепции персонального скоростного транспорта и электромобиля на уровне автономии L4 (в соответствии с классификацией SAE (Общества автомобильных инженеров)). Дана оценка эффективности инновационной транспортной системы с использованием применяемых в дорожной инженерии показателей. Приведена концепция моделирования и оптимизации транспортной сети совместно с теорией клеточных автоматов.

Ключевые слова: городской транспорт, автономные транспортные средства, электромобильность, компьютерное моделирование, теория клеточных автоматов

Для цитирования: Инновационная автономная система городского транспорта с низким уровнем локального загрязнения окружающей среды / В. Хороманьский [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 243–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-243-247>

Адрес для переписки

Хороманьский Влодзимеж
Варшавский технический университет
ул. Кошыкова, 75,
00-662, г. Варшава, Республика Польша
Тел.: +48 695 226-075
wlozdzimierz.choromanski@pw.edu.pl

Address for correspondence

Choromanski Wlodzimierz
Warsaw University of Technology
75, Koszykowa str.,
00-662, Warsaw, Republic of Poland
Tel.: +48 695 226-075
wlozdzimierz.choromanski@pw.edu.pl

Introduction

The basic tasks for modern transport are:

- limiting the number of accidents, in other words increasing road safety;
- reduction of pollution generated by motor vehicles;
- adaptation of transport to people with reduced mobility (especially older people);
- striving to use, especially in urban traffic, public transport and limiting personal transport;
- increasing transport capacity, especially in cities.

It seems that the above-mentioned objectives can be achieved through the technologies of autonomous electric vehicles. Typical solutions based on existing ITS (Intelligent Transport System) technologies seem to have already reached the peak of their capabilities. Currently, one can observe a very dynamic development of vehicles and autonomous transport systems in the world. New solutions are based on various IT and measurement technologies, vehicle positioning module and decision modules (decisions on maneuvers). The levels of vehicle autonomy are also different (a five-level classification defined by Society of Automotive Engineers, SAE) can be used as a reference. To date, standards, certification methods, safety measures, etc., for autonomous vehicles have not yet been developed. The IT side of the vehicle is based on artificial intelligence (the so-called deep neural networks).

This article aims to present a certain concept developed and constantly developed in Poland. This concept dates back to the beginning of the current century. At that time, the first Polish PRT (Personal Rapid Transit [1]) system and a powered car were developed.

The basic system was developed in Poland at the Faculty of Transport. The system was developed as part of the ECO Mobility project financed by the European Union (project manager – Prof. W. Choromański). As part of the project, a prototype of an electric car was also made, with special utility functionality – it can be managed by non-disabled people and those with mobility disorders. The designs have been described in detail in [1, 2].

Currently, works are being carried out to add an electric module enabling autonomous driving and modification of the PRT system to move not

only on the track infrastructure (located above the ground) but also to move on the road in autonomous mode and share this road with other vehicles.

Elements of the future system – car and Personal Rapid Transit

Fig. 1 shows the car preprototype made as part of the ECO Mobility project, and Fig. 2 – a model for presenting the functionality of a PRT vehicle. Here we will discuss the most important features of these vehicles.



Fig. 1. ECO car (Warsaw University of Technology – ECO Mobility)



Fig. 2. Model cabin of a Personal Rapid Transit (Warsaw University of Technology – ECO Mobility)

The designed vehicles are equipped with innovative control systems. The car uses a new type of Human Machine Interface (HMI) steering wheel using the steer by wire system (Fig. 3) [3]. This HMI is adapted for sharing by fit and disabled people.

PRT vehicles moving in a track system are guided by a roller system and a turnout referred to in the Anglo-Saxon literature by the term “passive switch”. The model of this system is shown in Fig. 4, 5 and a detailed description is contained in [4]. A non-contact dynamic power supply system was used in the vehicle track motion.

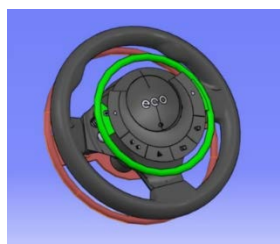


Fig. 3. The model of universal steering wheel [3]

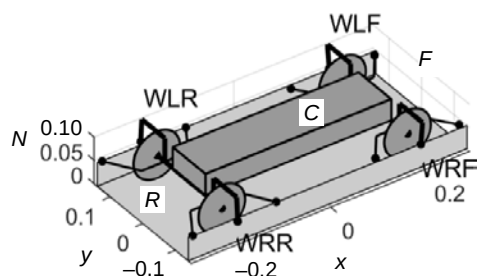


Fig. 4. Overview of model's arrangement of solid bodies: WLF, WRF, WLR, WRR – left front, right front, left rear, right rear; F, R – front and rear wheel set [4]

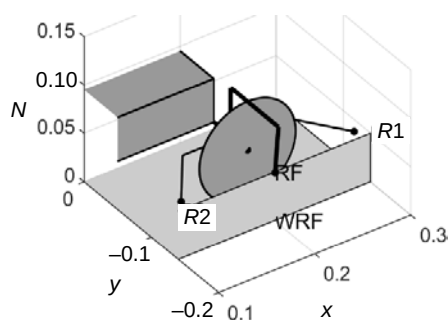


Fig. 5. Right wheel's set of passive switch rollers: R1, R2 – inner rollers; RF – outer roller [4]

The view of the completed PRT system on the laboratory scale is presented (Fig. 6) [5].



Fig. 6. Scaled physical model of a Personal Rapid Transit vehicle at a laboratory testing station [5]

The applied construction solutions required a special design approach – the virtual pre prototyping

procedure was used here. The tests performed primarily concerned parametric sensitivity analyzes.

They provided many valuable data on the driving properties of the vehicles being built. The results of theoretical studies on vehicle traffic stability with the Steer by Wire system are contained in [6]. The following works [7, 8] show the results of experimental research on the HMI system made using a dynamic simulator. Particularly interesting turned out to be works in the field of contactless power supply design for PRT vehicles, the results of which are presented in [5], as well as the results of torsional vibration analyzes of wheel axles in track motion. The reason for these vibrations is the lack of a centering mechanism for track motion with the use of car tires. The results of the analysis are presented in [4].

In the scope of simulation tests regarding PRT transport, simulators operating on the basis of incident analysis [9] and operating on the principle of cellular automata using parallel calculations and the CUDA platform [10] were made.

Polish future proposal of autonomous vehicles and transport systems

The autonomous transport system developed at Warsaw University of Technology combines three technologies (Fig. 7). PRT technologies (a prototype solution developed at the Faculty of Transport of the Warsaw University of Technology), technologies of an electric car suited to driving a vehicle by disabled people [1] and Report NTC [11], technologies of autonomous cars (L2 autonomy levels or L4/B). The system can be configured in various ways depending on your needs.

In the case of extension of the classical PRT system, the Polish system consists of small, four-person electric vehicles moving autonomously on a light aboveground infrastructure (in autonomous and track mode). Vehicles perform “point to point” transport, i. e. from the initial stop to the final stop, there are no intermediate stops, in addition they choose the optimal travel route. Vehicles in the same mode can travel on roads that they share with other vehicles. In this case, the autonomous mode (at L4/B/level) is also preserved – it is a driving mode without a driver.

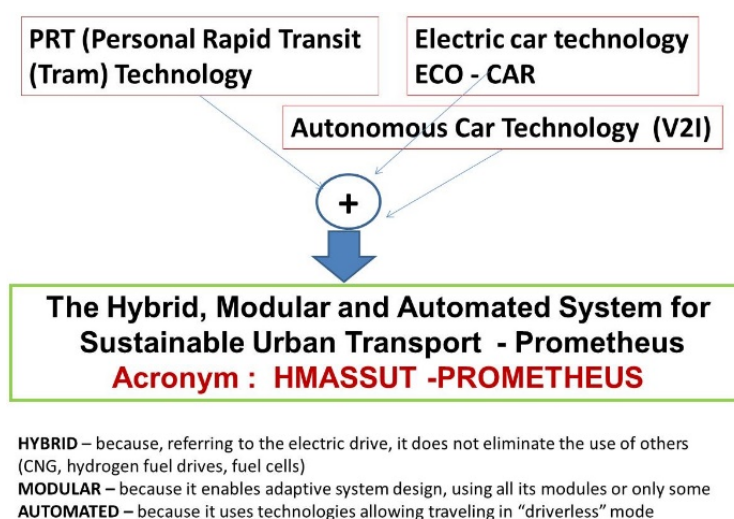


Fig. 7. Polish autonomous transport system [12]

The vehicle uses an electronic track (electromagnetic signals generated from the road installation) or (at a later stage of the system development) a track designated by a measuring car using radar, lidar and camera measurements. In the case of a (electric) vehicle, this vehicle can only move on the road in two modes:

- as an electric vehicle at the level of L2 autonomy. This vehicle is adapted to the disabled with the possibility of positioning wheelchairs of the disabled and adjusting the interface (multifunction steering wheel);
- as a vehicle at the level of L4/B autonomy, then they share the road with PRT vehicles.

In the case of moving in autonomous mode, vehicles are additionally equipped with 4 laser radars (lidars), two video cameras, DGPS and IMU sensors together with the appropriate software.

Optimization problems and software

The development of simulation systems and working in real mode was based on various techniques and methods. The areas which were studied are shown in Fig. 8 [12].

The analysis required (for autonomous vehicles) acceptance of route topology (Fig. 9) [12]. Having identified flows of passenger flows, the location of stops was determined using genetic algorithms. Determining the route was carried out using the equations of the modified Dijkstra's algorithm. During the passage through individual nodes, the modification of the optimal routes takes into account the current traffic conditions. Optimization coefficients (multi-criteria) include: minimization of travel time and waiting time for stops, minimization of energy consumption, maintaining the smoothness of driving and the number of vehicles (unfavorable is both too many and too few vehicles).

Control algorithms are deterministic and relatively simple. Vehicles in autonomous mode move on a mechanical or virtual track. So the control problem is significantly simplified. Vehicles in the Polish system do not perform overtaking and bypass maneuvers. The vehicle's location system is implemented through infrastructure, i. e. for example, a magnetic marker system. In autonomous mode, vehicles on the road must be supported by an additional system (laser radars, cameras and additional, redundant positioning systems based on DGPS).

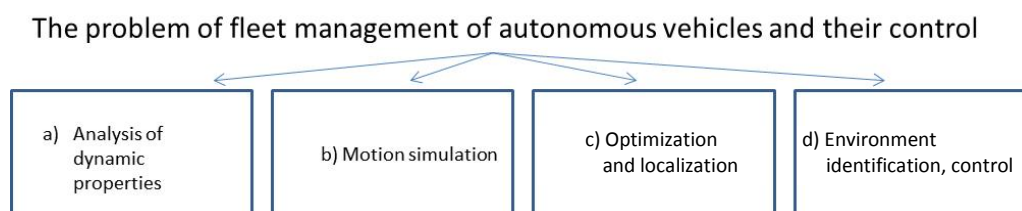


Fig. 8. Areas of numerical analysis [12]

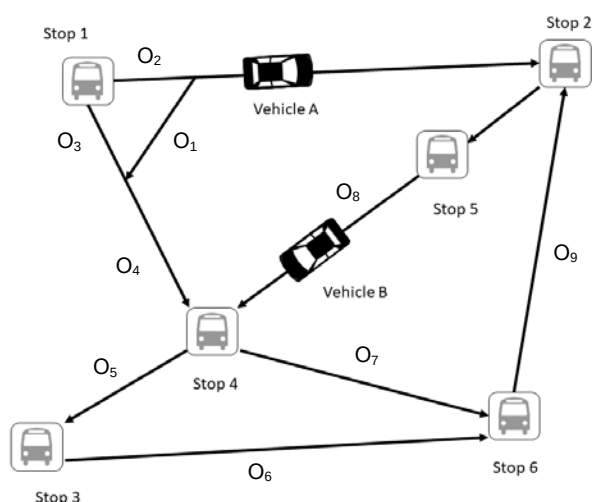


Fig. 9. Scaled physical model of a Personal Rapid Transit vehicle at a laboratory testing station [12]

CONCLUSION

ECO Mobility Poland [2] is planned for implementation in three Polish cities: Rzeszów, Kraków and Łódź. Certain certification procedures and standards will be borrowed from standards and procedures of Automated People Movers. These are track vehicles moving in autonomous mode. It can be noticed that the vehicles in the proposed system are essentially also track vehicles. At the same time we are dealing with a non-mechanical track. In addition to the separated track above the ground surface (where ROW – Rights of Way has level A) [5], when moving on the ROW roadway it is equal to Vuchan R 2007. It is therefore assumed that vehicles share roadways with other vehicles. The proposed system is very flexible and can be configured depending on the needs of cities. It will work partly in the on-demand transport system, partly (especially with regard to the electric car, the possibility of using it in the “car sharing” mode is considered). The described solution was awarded the 2016 prize of the Prime Minister of Poland.

REFERENCES

1. Choromanski W. (2015) *Transport Systems PRT.*, Warszawa, WKiL (in Polish).
2. ECO Mobility. Available at: <http://www.eco-mobilnosc.pw.edu.pl/?sLang=en> (Accessed 6 September 2019).
3. Choromanski W., Grabarek I., Kozłowski M. (2015) Simulation and Experimental Study of Selected Parameters of the Multifunction Steering Wheel in the View of Users' Abilities and Accuracy of Vehicle Maneuvers. *Procedia Manufacturing*, (3), 3085–3091. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.855>.
4. Kozłowski M. (2019) Analysis of Dynamics of a Scaled PRT (Personal Rapid Transit) Vehicle. *Journal of Vibro-engineering*, 21 (5), 1426–1440. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20577>.
5. Nikoniuk M., Kozłowski M. (2018) Energy Properties of a Contactless Power Supply in PRT (Personal Rapid Transit) Laboratory Model. *Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability*, 20 (1), 107–114. <https://doi.org/10.17531/ein.2018.1.14>.
6. Kozłowski M., Choromanski W. (2013) Dynamics Simulation Studies on the Electric City Car with an Electromechanical Differential and the Rear Wheels Drive. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 3 (61), 661–673. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0070>.
7. Kozłowski M. (2016) Assessment of Safety and Ride Quality Based on Comparative Studies of a New Type of Universal Steering Wheel in 3D-Simulators. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 18 (4), 481–487. <https://doi.org/10.17531/ein.2016.4.1>.
8. Choromanski W., Grabarek I., Kozłowski M. (2019) Research on an Innovative Multifunction Steering Wheel for Individuals with Reduced Mobility. *Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 61, 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.01.013>.
9. Daszczyk W. B., Choromanski W., Miesicki J., Grabarek I. (2015) Empty Vehicles Management as a Method for Reducing Passenger Waiting Time in PRT Networks. *IET Intelligent Transport Systems*, 9 (3), 231–239. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2013.0084>.
10. Czerepicky A., Nikoniuk M., Kozłowski M. (2017) Application Performance Test CUDA Platforms in a Computer Modeling Movement of Vehicles PRT. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej-WUT Journal of Transportation Engineering*, 119, 41–51 (in Polish).
11. National Transport Commission Australia (2018) *Changing Driving Laws to Support Automated Vehicles. Policy Paper*. Available at: <https://www.ntc.gov.au/sites/default/files/assets/files/NTC%20Policy%20Paper%20-%20Changing%20driving%20laws%20to%20support%20automated%20vehicles.pdf>.
12. Choromanski W., Grabarek I. (2019) Autonomous Vehicles in Urban Agglomerations. *Transportation Research Procedia*, 40, 655–662. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.093>.

Received: 08.10.2019

Accepted: 10.12.2019

Published online: 31.05.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-248-258>

УДК 697.343

Исследование теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс

Часть 2

Докт. техн. наук, проф. В. А. Седнин¹⁾, магистр техн. наук Т. В. Бубыр¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Для повышения эффективности эксплуатации тепловых сетей, размещенных в непроходных каналах, ранее предложено схемно-структурное решение регенеративно-утилизационного теплоиспользования в системах централизованного теплоснабжения. Невозможность создания натурной экспериментальной установки, охватывающей нужный диапазон факторов и область их изменения, сложность проведения пассивного эксперимента на существующих теплотрассах привели к необходимости разработки виртуальной модели на базе программного комплекса ANSYS. На этой виртуальной модели проведен шестифакторный эксперимент. Получены уравнения регрессии для определения напора, требуемого для обеспечения продувки канала воздухом, а также теплообмена с трубопроводами прямой и обратной сетевой воды, расположенными в канале, и теплообмена с грунтом вокруг канала. Кроме того, выведена регрессионная зависимость для нахождения интегрального потока теплоты от перечисленных омываемых поверхностей к потоку воздуха. Осуществлен переход от безразмерных факторов к натуральным. С помощью карт Парето определены наиболее значимые факторы. В части 1 статьи проведена верификация полученных зависимостей. С использованием стандартных статистических методов оценок на базе рассчитанных значений критериев Фишера, Стьюдента и других определена адекватность уравнений регрессии. Приведены и проанализированы поверхности отклика с помощью двумерных сечений для ряда факторов при фиксированных значениях одних и изменении двух наиболее характерных, физически весомых для данной функции отклика. На базе анализа регрессионных зависимостей выполнена их валидация. Полученные регрессионные уравнения охватывают практически весь спектр возможных диаметров теплотрасс, что позволяет использовать их при разработке энергосберегающих проектов.

Ключевые слова: теплоснабжение, непроходные каналы, теплотрасса, теплообмен, аэродинамическое сопротивление канала, использование теплоты грунта, уравнение регрессии, шестифакторный эксперимент

Для цитирования: Седнин, В. А. Исследование сложного теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс. Часть 2 / В. А. Седнин, Т. В. Бубыр // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 248–258. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-248-258>

Heat Transfer Research in Blown-Through Non-Passable Heating Mains Channels

Part 2

V. A. Sednin¹⁾, T. V. Buby¹⁾

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

Abstract. A schematic and structural solution of regenerative-utilization heat use in centralized heat supply systems was previously proposed in order to increase the efficiency of operation of heating networks located in non-passable channels. The impossibility of creating a full-scale experimental setup covering the required range of factors and the area of their change, the complexity of a passive experiment on existing heating mains led to the need to develop a virtual model based

Адрес для переписки

Седнин Владимир Александрович
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

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

on the ANSYS software package. A six-factor experiment has been carried out on this virtual model. Regression equations have been obtained to determine the pressure required to provide air purging of the channel, as well as heat exchange with pipelines of direct and return network water located in the channel, and heat exchange with soil around the channel. In addition, a regression relationship has been derived to find the integral heat flux from the listed washed surfaces to the air flow. The transition from dimensionless to natural factors has been made in the paper. The most significant factors are identified with the help of Pareto cards. The obtained dependencies have been verified in Part 1 of the paper. The adequacy of the obtained regression equations has been determined using standard statistical estimation methods based on the calculated values of the Fisher's, Student's and other criteria. The response surfaces are presented and analyzed using two dimensional sections for a number of factor values at fixed values of one and a change in two most characteristic, physically significant for a given response function. They have been validated on the basis of the analysis of regression dependencies. The obtained regression equations cover almost the entire range of possible diameters of heating mains, which makes it possible to use them in the development of energy-saving projects.

Keywords: heat supply, non-passable channels, heating main, heat exchange, duct aerodynamic drag, use of soil heat, regression equation, six factor experiment

For citation: Sednin V. A., Buby T. V. (2021) Heat Transfer Research in Blown-Through Non-Passable Heating Mains Channels. Part 2. *Science and Technique*. 20 (3), 248–258. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-248-258> (in Russian)

Введение

Ранее авторами показана целесообразность схемно-структурного решения утилизации теплоты, рассеиваемой трубопроводами тепло-трасс, размещенными в непроходных каналах, с одновременным использованием теплоты грунта вокруг каналов [1, 2]. В части 1 данной статьи описана реализация шестифакторного эксперимента, получены уравнения регрессии для определения напора, требуемого для обеспечения продувки канала воздухом, а также теплообмена с трубопроводами прямой сетевой воды (ПСВ) и обратной сетевой воды (ОСВ), расположен-

ными в канале, и теплообмена с грунтом вокруг канала. Кроме того, выведена регрессионная зависимость для нахождения интегрального потока теплоты от перечисленных омываемых поверхностей к потоку воздуха. Проведены проверка на адекватность регрессионных соотношений и их верификация.

В общем виде уравнение для поверхности отклика второго порядка представлено в части 1 статьи, там же проведена верификация соответствующих регрессионных уравнений. Значения размерных коэффициентов этих уравнений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов в уравнениях регрессии
Coefficient values in regression equations

Коэффициент уравнения регрессии	Функция отклика для расчета				
	Мощность удельного теплового потока, Вт/м ²				Удельные потери напора на участке Y_5 , Па/м
	Суммарный поток $q_{взд}$	от ПСВ $q_{ПСВ}$	от ОСВ $q_{ОСВ}$	от грунта $q_{гр}$	
1	2	3	4	5	6
δ_0	64	2,090000	0,83	7,2	-0,164000
δ_1	-0,239000	0,115000	0,0546	-0,178000	0,000296
δ_2	0,002160	-0,000268	-0,0002	0,000682	1,96E-06
δ_3	-103	12,700000	10,6	-14,800000	0,307000
δ_4	154	-0,319000	-5,58	81	2,480000
δ_5	-0,565000	0,500000	0,508	5,320000	0,126000
δ_6	-0,141000	-0,044100	-0,0425	-0,394000	0,004760
δ_7	-0,710000	0,088000	0,095	-0,313000	-0,001920
δ_8	0,004870	0,001250	-3,73E-06	0,001500	1,05E-05
δ_9	-1,490000	-0,159000	-0,217	-2,970000	-0,000290
δ_{10}	0,0134000	0,002130	0,00084	0,006100	3,69E-05
δ_{11}	0,065000	-0,479000	-0,237	2,060000	-0,004590
δ_{12}	0,168000	0,027100	0,0109	0,045000	0,000291
δ_{13}	-0,295000	-0,246000	-0,129	0,234000	-0,001130
δ_{14}	0,019300	0,000586	0,00062	0,005300	-7,5E-05
δ_{15}	-0,000450	-0,000402	-9,3E-05	-6,4E-05	-7,5E-08
δ_{16}	0,005380	0,000288	0,000355	0,002530	1,7E-07
δ_{17}	-0,005710	-0,000160	-0,00026	-0,002690	-5,3E-07

1	2	3	4	5	6
δ_{18}	3,220000	0,000550	-0,084	-4,060000	-0,457000
δ_{19}	0,125000	0,138000	0,061	0,036800	-7,9E-05
δ_{20}	0,164000	-0,270000	-0,226	3,550000	0,005080
δ_{21}	-0,595000	0,070000	0,072	-3,570000	-0,000400
δ_{22}	0,002800	0,001270	0,000465	0,000384	1,6E-06
δ_{23}	-0,087000	-0,001970	-0,002250	-0,087000	-0,00022
δ_{24}	0,086000	0,000940	0,001660	0,090000	1,52E-05
δ_{25}	0,000810	-0,000310	-1,8E-05	-0,000240	1,9E-07
δ_{26}	-0,011100	0,000505	0,000572	0,003570	3,96E-06
δ_{27}	-0,001790	-0,000240	-6,5E-05	-0,00212	1,85E-06

Анализ регрессионных зависимостей

Полученные регрессионные зависимости охватывают практически весь диапазон геометрий непроходных каналов и наружных диаметров теплотрасс, что позволяет непосредственно применять их в практических расчетах. В этом случае отпадает необходимость разработки критериальных зависимостей для обобщения результатов экспериментального исследования с целью распространения их на теплотрассы иных характерных размеров поперечных сечений. Это определяет дальнейший анализ регрессионных соотношений с целью их валидации. Для решения данной задачи удобно прибегнуть к построению двумерных сечений гиперповерхностей, соответствующих полученным уравнениям регрессии, фиксируя сечения на заданных значениях тех или иных факторов [3–11].

Прежде всего, следует понять, о каких значениях потерь напора воздушного потока и

длинах участков теплотрасс для организации утилизации различных тепловых потоков может идти речь, какие тягодутьевые устройства потребуются для организации протока воздуха через тот или иной участок непроходного канала теплотрасс. На рис. 1 показано изменение потерь напора при изменении сечения канала и скорости продуваемого воздуха.

Сечение каналов теплотрасс практически не влияет на потери напора при скоростях потока воздуха до 6 м/с и лишь при превышении этой скорости отмечается влияние поперечных размеров канала на потери напора. Во всех случаях не следует осуществлять продувку со скоростями воздуха более 8 м/с. При использовании вентиляторов и дымососов, характеризующихся создаваемым напором до 3–4 кПа, длина продуваемого участка канала может достигать нескольких километров. И это уже отвечает реальной ситуации расположения приточного и вытяжного сечений потока воздуха в канале.

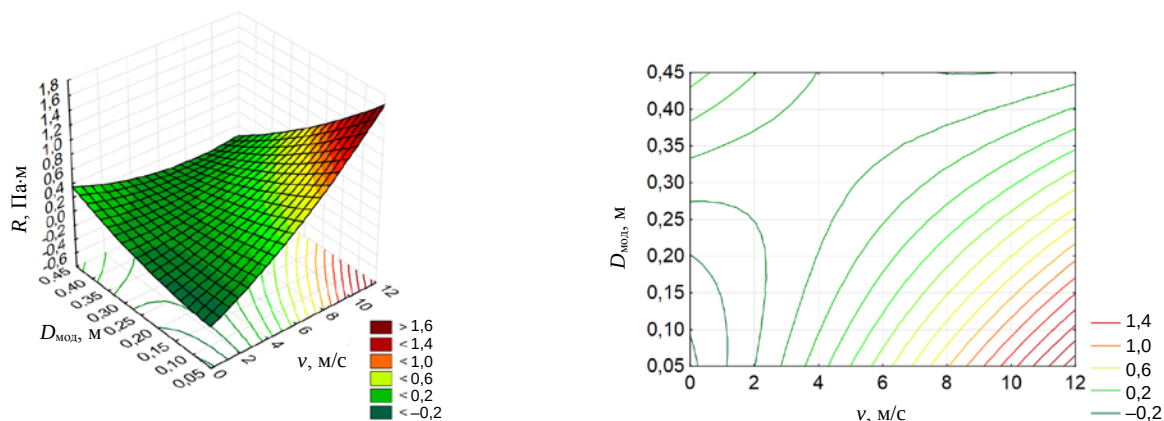


Рис. 1. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей потери удельного напора R при продувке с разной скоростью потока воздуха для каналов различных поперечных размеров при постоянных оставшихся четырех факторах на нулевых значениях плана

Fig. 1. Two-dimensional sections of hypersurface describing specific head loss R when blowing with different air flow rates for ducts of different transverse dimensions with constant remaining four factors at zero values of plan

Интегральный поток теплоты, который в ходе продувки канала может быть подведен к воздуху для дальнейшей утилизации, определяется с помощью уравнения регрессии, описывающего мощность удельного теплового потока, сечения гиперповерхности которого приведены на рис. 2–4. Согласно анализу карты Парето, наиболее влияющими факторами на интегральный тепловой поток к воздуху от всех омываемых поверхностей канала являются температура воздуха в начале участка, скорость потока воздуха в канале и температура грунта вокруг канала. Рассмотрим сечения соответ-

ствующих гиперповерхностей в зависимости от указанных факторов.

Отсекая части сечения, где скорость воздуха превышает установленную границу 8 м/с (рис. 1), можно отметить, что в осенний период, когда температура грунта максимальна, мощность теплового потока к воздуху может достигать порядка 0,05 кВт/м², опускаясь до 0,03 кВт/м² в зимние месяцы отопительного периода. Понижение температуры воздуха в начале участка отвечает физическим представлениям на увеличение теплового потока к воздуху (рис. 3, 4).

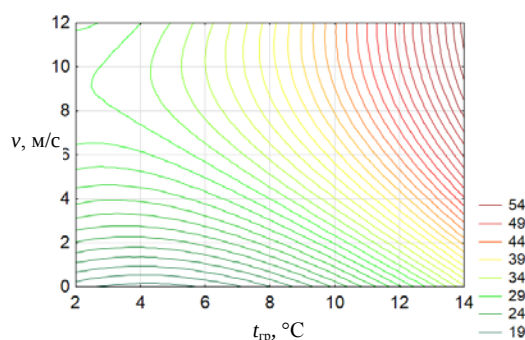
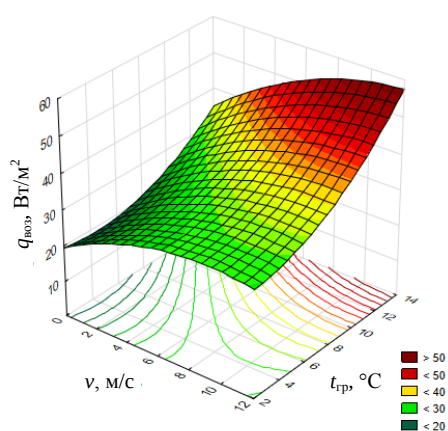


Рис. 2. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² омываемых потоком воздуха поверхностей канала) теплового потока q_{w03} в зависимости от скорости потока воздуха в канале и температуры грунта вокруг канала, при постоянных длине участка ($L = 60$ м), температурах воздуха в начале участка ($t_{w03} = -1,6$ °C) и прямой и обратной сетевой воды ($t_{ПСВ} = 90$ °C, $t_{ОСВ} = 49,5$ °C)

Fig. 2. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² washed by air flow channel surfaces) heat flow q_{air} depending on air flow rate in channel and soil temperature around channel, with constant section length ($L = 60$ m), air temperatures at the beginning of section ($t_{air} = -1.6$ °C) and direct (DNW) and return (RNW) network water ($t_{DNW} = 90$ °C, $t_{RNW} = 49.5$ °C)

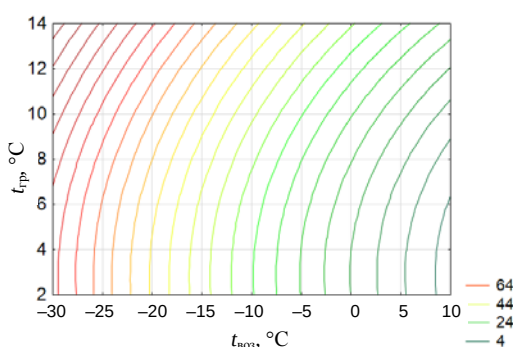
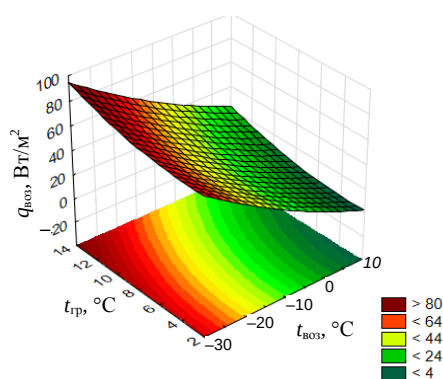


Рис. 3. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² омываемых потоком воздуха поверхностей канала) теплового потока q_{w03} в зависимости от температуры воздуха в начале участка и температуры грунта вокруг канала (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 3. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² washed by air flow channel surfaces) heat flow q_{air} depending on air temperature at the beginning of section and soil temperature around channel (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

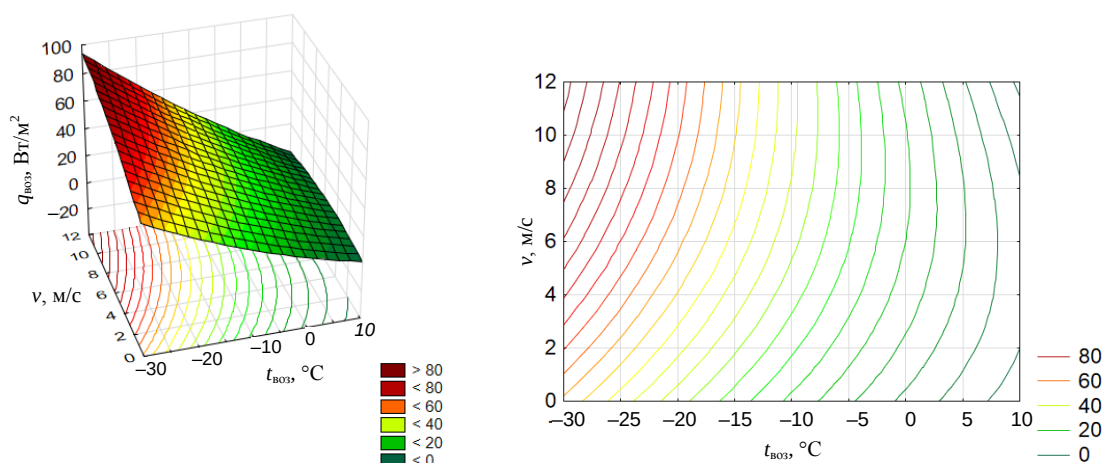


Рис. 4. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² омываемых потоком воздуха поверхностей канала) теплового потока $q_{\text{воз}}$ в зависимости от температуры воздуха в начале участка и скорости воздуха (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 4. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² washed by air flow channel surfaces) heat flow q_{air} depending on air temperature at the beginning of section and air speed (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

Следует отметить определяющее влияние температуры воздуха в начале участка в сечениях рис. 3, 4. При этом влияния изменений температуры грунта практически не заметно, притом что изменение скорости потока воздуха влияет сильнее на мощность удельного (на 1 м² омываемых потоком воздуха поверхностей канала) теплового потока $q_{\text{воз}}$.

Характер рассеяния теплоты сетевой воды, как прямой, так и обратной, идентичен, что можно связать с нивелирующим воздействием изоляции на температуру омываемых воздухом поверхностей обоих трубопроводов. Вместе

с тем при идентичном влиянии факторов на рассеяние теплоты трубопроводами теплотрассы при очевидном отличии температур указанных теплоносителей имеет место ожидаемое отличие абсолютных значений потоков рассеяния теплоты (рис. 5, 6).

Идентичность изменения потоков рассеяния теплоты трубопроводами сетевой воды, как прямой, так и обратной, позволяет ограничиться рассмотрением изменения потерь одного из двух указанных трубопроводов сетевой воды (рис. 7–11).

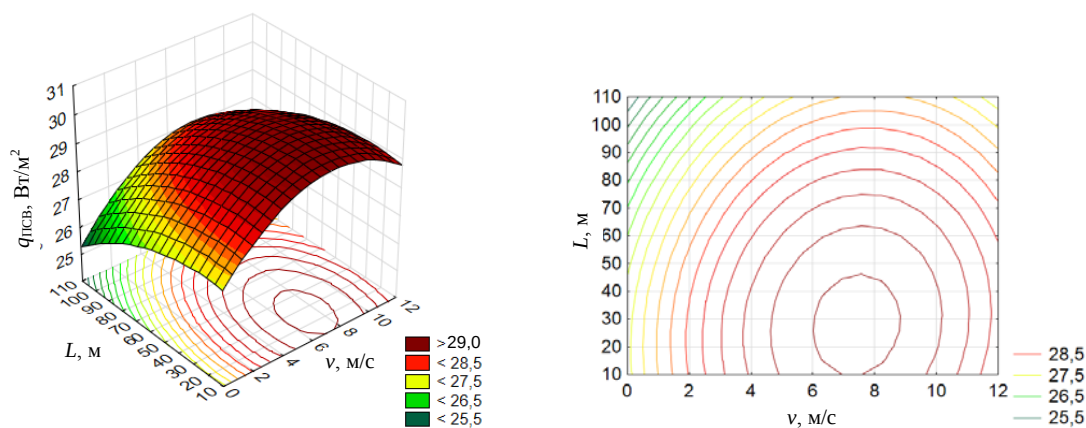


Рис. 5. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода прямой сетевой воды) теплового потока $q_{\text{псв}}$ в зависимости от длины участка и скорости потока воздуха (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 5. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of direct network water pipeline surfaces) heat flow q_{DNW} depending on section length and air flow rate (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

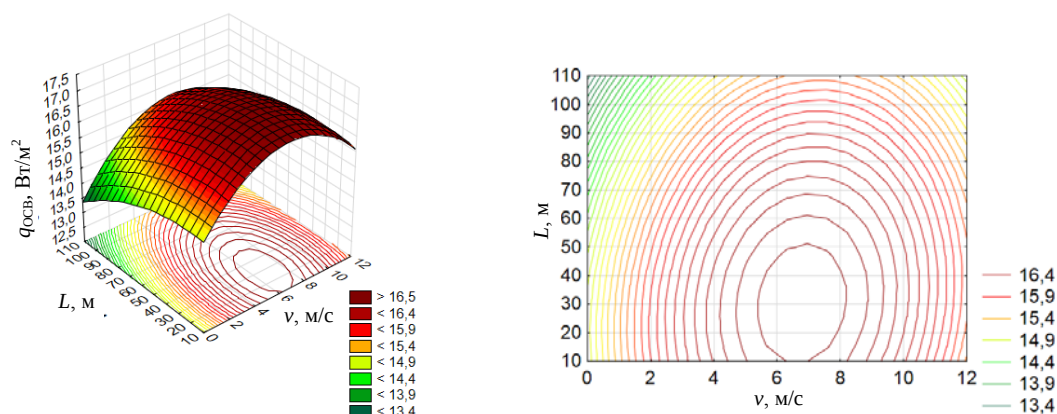


Рис. 6. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока q_{OCB} в зависимости от длины участка и скорости потока воздуха (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 6. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on section length and air flow rate (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

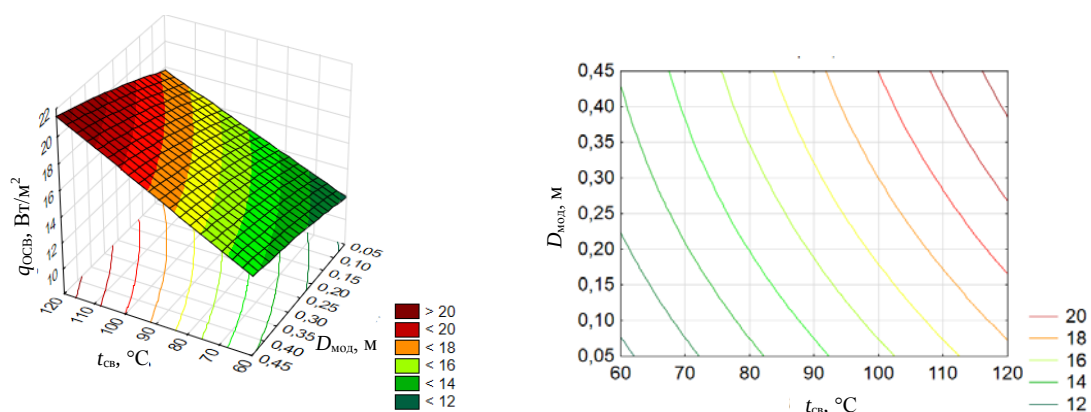


Рис. 7. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока q_{OCB} в зависимости от характеристик поперечного сечения канала и температуры сетевой воды (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 7. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on characteristics of channel cross-section and water network temperature (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

И температура теплоносителя, и характеристики канала теплотрассы имеют примерно равное влияние на рассеяние теплоты трубопроводами сетевой воды. Оба фактора определяются сетевыми районами в контексте требуемых расходов теплоты и теплогенерирующих источников, подготавливающих теплоноситель. Однако можно сделать вывод, что рассматриваемую утилизацию наиболее целесообразно реализовывать для теплотрасс с большими расходами теплоты и в отопительный период. Для всех значений температуры сетевой воды

скорость потока воздуха в канале не следует увеличивать более чем на 6 м/с (рис. 8). Длина продуваемого участка влияет незначительно в случае его небольшой протяженности, однако с увеличением длины отмечается тенденция к возрастанию ее влияния на удельные теплотопотери (рис. 9).

В рамках установленного ранее диапазона скоростей (6–8 м/с) потока воздуха в канале рассеяние теплоты трубопроводами теплотрасс растет с увеличением размеров поперечного сечения канала (рис. 10). При этом верхний диапазон скорости соответствует 6 м/с.

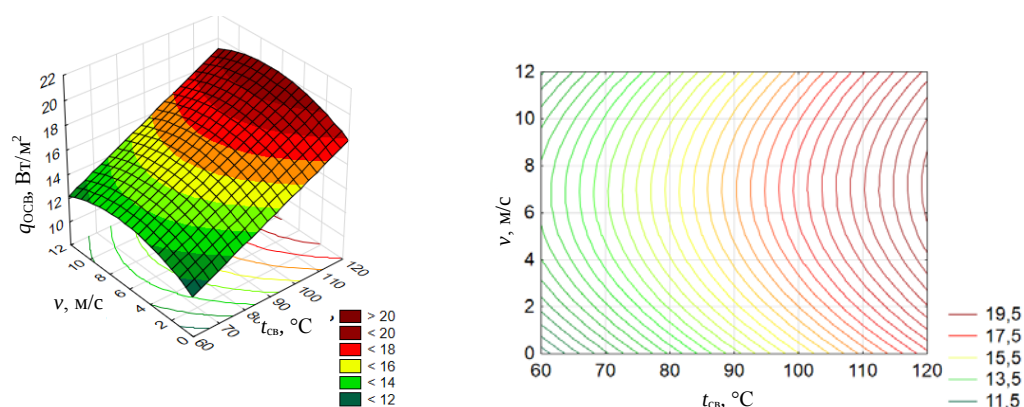


Рис. 8. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока q_{OCB} в зависимости от скорости воздуха в канале и температуры сетевой воды (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 8. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on air speed in channel and temperature of network water (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

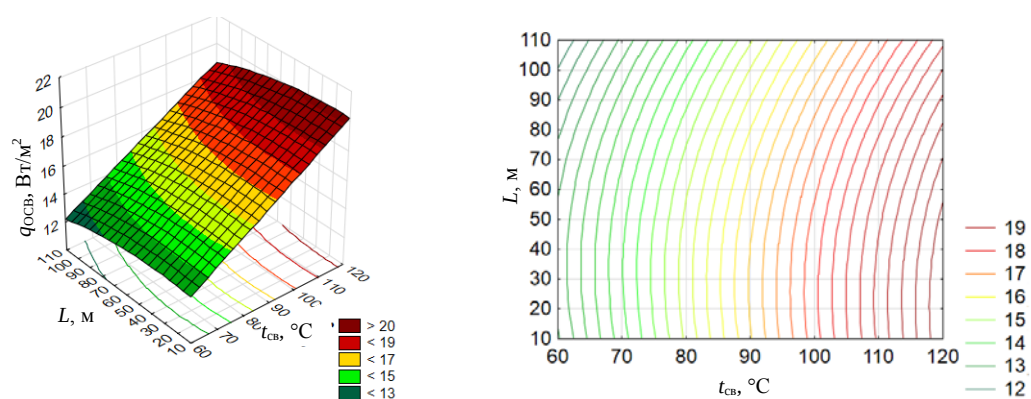


Рис. 9. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока q_{OCB} в зависимости от длины участка канала и температуры сетевой воды (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 9. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on channel section length and temperature of network water (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

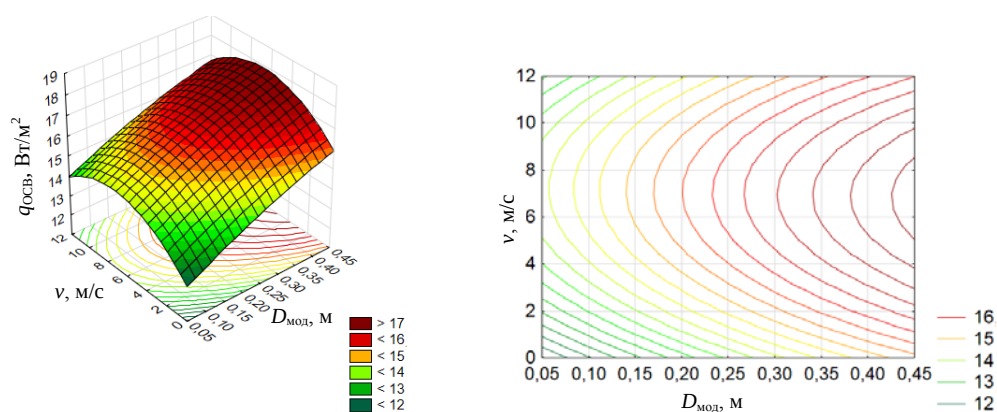


Рис. 10. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока q_{OCB} в зависимости от скорости воздуха в канале и характеристик его поперечного сечения (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 10. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on air speed in channel and characteristics of its cross-section (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

При малых длинах продуваемого участка определяющее влияние на теплотери имеют размеры сечения канала (рис. 11). Однако при длине каналов более 60 м влияние размеров их поперечного сечения нивелируется и удельные теплотери зависят прежде всего от длины канала.

Обобщая полученные результаты зависимости интегрального удельного теплового (на 1 м² омываемых воздухом поверхностей канала) потока $q_{\text{взд}}$ к воздуху, продуваемому через канал, и потока удельных (на 1 м² поверхностей трубопроводов сетевой воды) тепловых потерь теплотрасс $q_{\text{св}}$, с учетом соотношения площадей наружных поверхностей теплотрасс и омыва-

емых воздухом всех поверхностей внутри канала (для минимального размера трубопроводов и длины в нулевой точке плана: площадь канала – 175,2 м², площадь поверхности трубопроводов – 50,1 м²; для максимального диаметра трубопроводов соответственно 660,0 и 258,5 м²), можно отметить, что значительный вклад тепловых потоков к воздуху осуществляется за счет отвода теплоты от грунта, что продемонстрировано на графиках рис. 12–16.

Наибольший эффект замечен в холодные месяцы отопительного периода, когда температура воздуха в начале участка низка, и скорость продувки канала воздухом должна быть большей (рис. 12).

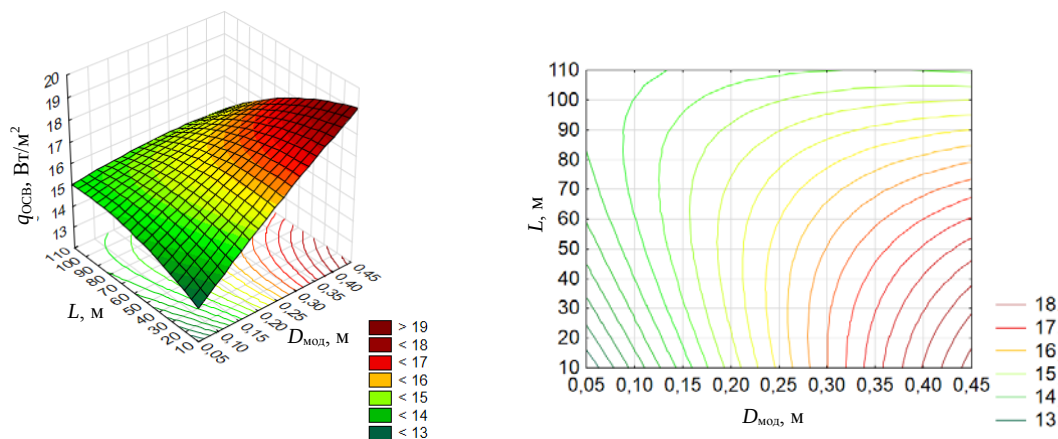


Рис. 11. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей трубопровода обратной сетевой воды) теплового потока $q_{\text{осв}}$ в зависимости от длины участка канала и характеристик его поперечного сечения (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 11. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of return network water pipeline surfaces) heat flow q_{RNW} depending on channel section length and characteristics of its cross-section (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

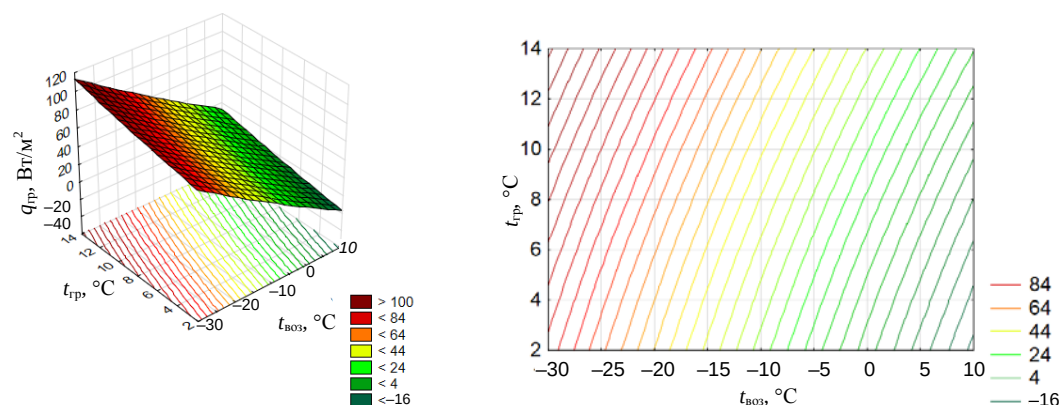


Рис. 12. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей ограждения канала) теплового потока грунта $q_{\text{гр}}$ в зависимости от температуры грунта и температуры воздуха в начале участка (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 12. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of channel barrier surfaces) heat flow of soil q_{soil} depending on soil and air temperature at the beginning of section (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

Влияние температуры сетевой воды на охлаждение грунта практически отсутствует, что ожидаемо. Главное влияние оказывает температура грунта вокруг канала (рис. 13).

Определяющий вклад в нагрев воздуха вносит тепловой поток процесса охлаждения грунта, при этом скорость воздуха следует ограничивать максимальной величиной на уровне 6 м/с (рис. 14–16).

Анализируя полученные функции отклика, можно отметить следующее:

– прокачка воздуха через каналы теплотрасс возможна с применением типовых тягодутьевых устройств для всей гаммы размеров тепло-

трасс. Протяженность участков теплотрасс, где возможна организация использования потоков теплоты охлаждения грунта и утилизации теплотерь теплотрасс, исходя из возможностей типовых тягодутьевых устройств оценивается несколькими километрами;

– величина низкотемпературного удельного (на 1 м² канала) теплового потока утилизации, отводимого с воздухом от грунта, оценивается мощностью потока теплоты от 2,0 кВт/м для теплотрасс с минимальным диаметром трубопровода до 3,6 кВт/м – с максимальным диаметром, что соответствует соотношению площадей наружных поверхностей скважин и каналов.

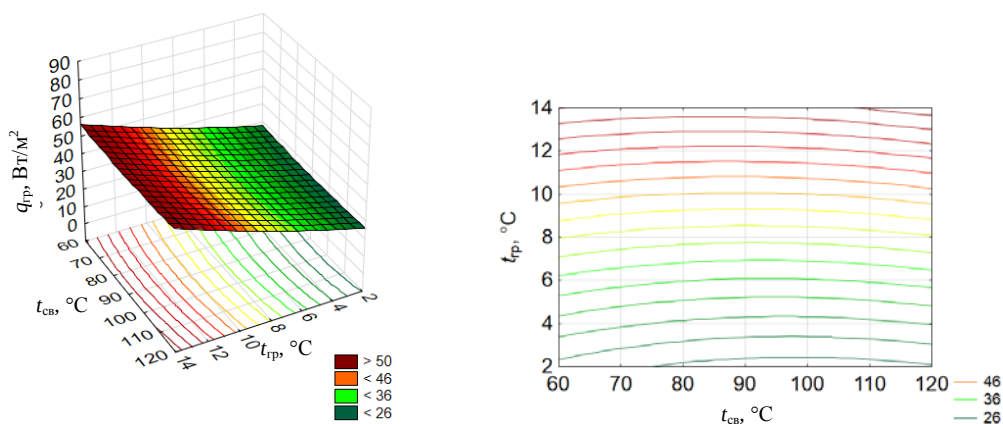


Рис. 13. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей ограждения канала) теплового потока грунта $q_{гр}$ в зависимости от температур грунта и сетевой воды (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 13. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of channel barrier surfaces) heat flow of soil q_{soil} depending on soil and network temperature (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

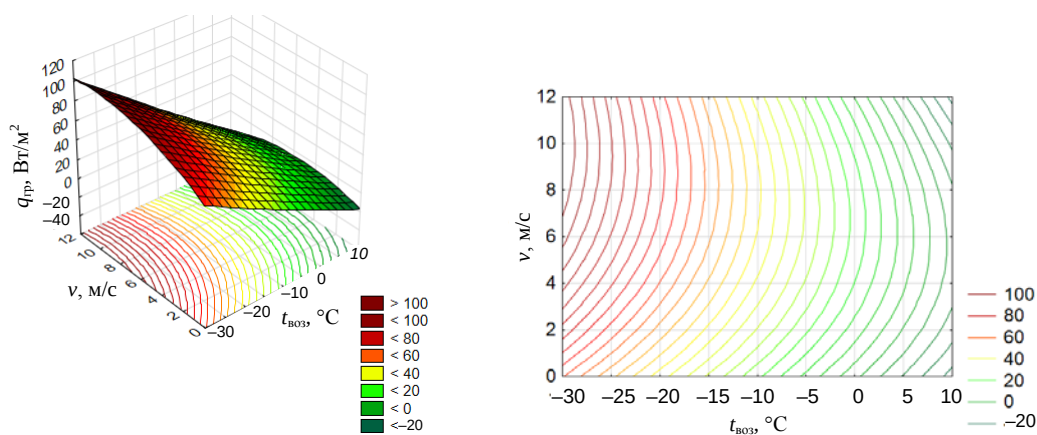


Рис. 14. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей ограждения канала) теплового потока грунта $q_{гр}$ в зависимости от скорости потока воздуха и температуры воздуха в начале участка (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 14. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of channel barrier surfaces) heat flow of soil q_{soil} depending on air flow rate and air temperature at the beginning of action (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

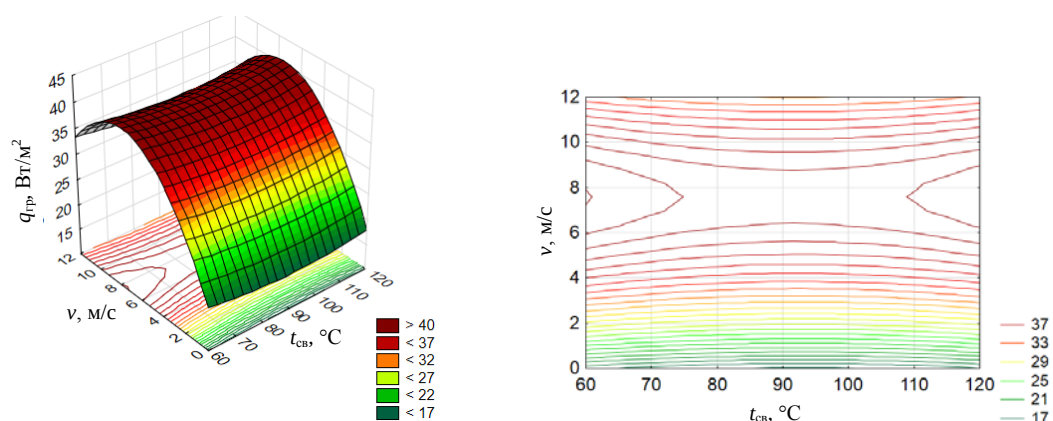


Рис. 15. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей ограждения канала) теплового потока грунта q_{gr} , в зависимости от скорости потока воздуха и температуры сетевой воды (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 15. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of channel barrier surfaces) heat flow of soil q_{soil} depending on air flow rate and network water temperature (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

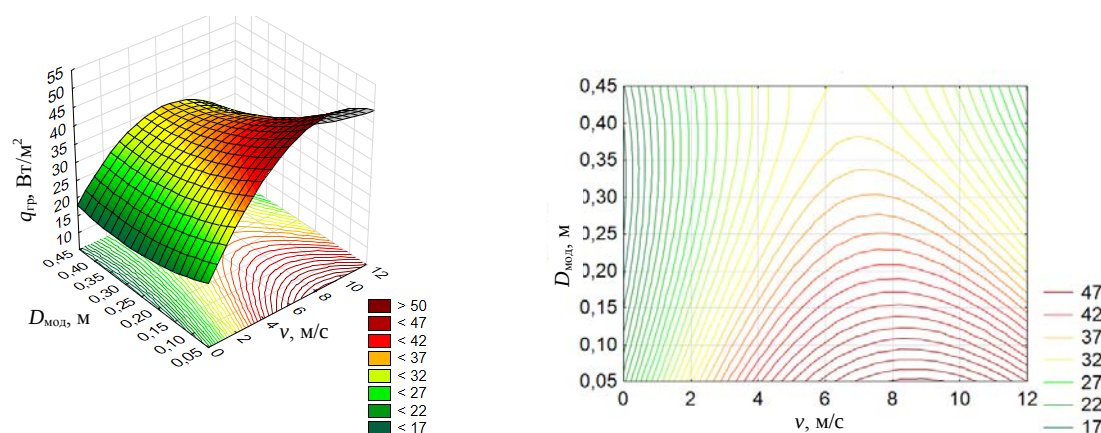


Рис. 16. Двумерные сечения гиперповерхности, описывающей мощность удельного (на 1 м² поверхностей ограждения канала) теплового потока грунта q_{gr} в зависимости от скорости потока воздуха и характеристик поперечного сечения канала (при постоянных факторах, согласно рис. 2, на нулевых значениях плана)

Fig. 16. Two-dimensional sections of hypersurface describing power of specific (per 1 m² of channel barrier surfaces) heat flow of soil q_{soil} depending on air flow rate and characteristics of channel cross-section (at constant factors, according to Fig. 2, at zero values of plan)

ВЫВОДЫ

1. Получены регрессионные зависимости для определения тепловых потоков от поверхностей, омываемых воздухом, к потоку воздуха.

2. Проведены верификация и валидация результатов, что определило пригодность регрессионных соотношений для практического применения.

3. Полученные зависимости могут быть использованы для различных целей, например для разработки энергосберегающих мероприятий в тепловых сетях с непроходными канала-

ми путем регенерации потоков теплоты, рассеиваемых трубопроводами сетевой воды, утилизации теплоты охлаждения грунта и наружного воздуха.

4. Уменьшение расхода топлива в системах теплоснабжения за счет регенерации тепловых потоков рассеяния от теплотрасс в непроходных каналах в сумме с теплотой охлаждения грунта вокруг теплотрасс может достигать 10 % теплоты, доставляемой потребителям, что делает актуальным решение задачи использования указанного потока теплоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, В. А. Системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах / В. А. Седнин, Т. В. Бубыр // Энергия и менеджмент. 2017. № 4. С. 2–6.
2. Седнин, В. А. Численное исследование сложного теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс / В. А. Седнин, Т. В. Бубыр // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 61–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76>.
3. Халафян, А. А. Промышленная статистика. Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA / А. А. Халафян. М.: Librokom, 2013. 384 с.
4. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров. М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.
5. Шестаков, В. Н. Планирование эксперимента в оптимизационных задачах технической мелиорации грунтов / В. Н. Шестаков. Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. 95 с.
6. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. Минск: Новое знание, 2013. 584 с.
7. Обзор STATISTICA [Электронный ресурс] // StatSoft Russia. Режим доступа: <http://statsoft.ru/products/overview/>. Дата доступа: 21.01.2018.
8. Боровиков, В. П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA / В. П. Боровиков. М.: Горячая линия-Телеком, 2013. 288 с.
9. Марченко, А. В. Разработка технологий использования котлоагрегатов ТЭЦ и их дутьевых вентиляторов для транспорта и утилизации вентиляционных выбросов промышленных предприятий и автомагистралей / А. В. Марченко. Ульяновск, 2008. 175 с.
10. Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей / В. И. Манюк [и др.]; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1988. 432 с.
11. Сапрыкина, Н. Ю. Исследование влияния на температуру грунта геотермальной системы теплоснабжения и кондиционирования в комплексе с тепловым насосом, при долговременном нестационарном циклическом режиме работы / Н. Ю. Сапрыкина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2018. Т. 25, № 3. С. 19–27.

Поступила 25.02.2021

Подписана в печать 22.04.2021

Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Sednin V. A., Buby T. V. (2017) Systems of Regenerative Recovery Heat use for Heating Mains in No-Pass Channels. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (4), 2–6 (in Russian).
2. Sednin V. A., Buby T. V. (2019) Numerical Study of Complex Heat Transfer in Blown Impassable Channels of Heating Mains. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 61–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76> (in Russian).
3. Khalafyan A. A. (2013) *Industrial Statistics. Quality Control, Process Analysis, Experimental Planning in the STATISTICA Package*. Moscow, Librokom Publ. 384 (in Russian).
4. Tikhomirov V. B. (1974) *Planning and Analysis of Experiment (when Conducting Research in Light and Textile Industries)*. Moscow, Liogkaya Industriya Publ. 262 (in Russian).
5. Shestakov V. N. (2007) *Planning an Experiment in Optimization Problems of Technical Land Reclamation*. Omsk, Publishing House of Siberian State Automobile and Highway University. 95 (in Russian).
6. Tarasik V. P. (2013) *Mathematical Modeling of Technical Systems*. Minsk, Novoe Znanie Publ. 584 (in Russian).
7. STATISTICA. StatSoft Russia. Available at: <http://statsoft.ru/products/overview/>. (Accessed 21 January 2018) (in Russian).
8. Borovikov V. P. (2013) *Popular Introduction to Modern Data Analysis with STATISTICA System*. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom Publ. 288 (in Russian).
9. Marchenko A. V. (2008) *Development of Technologies for the Use of CHP Boiler Units and their Blowing Fans for Transport and Utilization of Ventilation Emissions from Industrial Enterprises and Highways*. Ulyanovsk, 175 (in Russian).
10. Manyuk V. I., Kaplinskii Ya. I., Khizh E. B., Manyuk A. I., Il'in V. K. (1988) *Handbook for the Adjustment and Operation of Water Heating Networks*. 3rd ed. Moscow, Stroiizdat Publ. 432 (in Russian).
11. Saprykina N. Yu. (2018) Study of the Effect of Geothermal Heat Supply System on Soil Temperature and Air Conditioning in a Complex with a Heat Pump, with Long-term Non-Stationary Cyclic Operation. *Inzhenerno-Stroitelny Vestnik Prikaspiya = Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*, 25 (3), 19–27 (in Russian).

Received: 25.02.2021

Accepted: 22.04.2021

Published online: 31.05.2021

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО
ТВЕРДОГО ТЕЛА
DEFORMATION
IN SOLID MECHANICS

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-259-267>

УДК 621.787 (04)

**Численное исследование
напряженно-деформированного состояния заготовки
в контактной задаче поверхностного дорнования отверстий**

Доктора техн. наук, профессора Н. С. Сивцев¹⁾, В. В. Тарасов²⁾

¹⁾Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
(Ижевск, Российская Федерация),

²⁾Институт механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения
Российской академии наук (Ижевск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В последние годы экономический фактор играет все более важную роль при выборе технологий изготовления деталей машин с заданными значениями нормируемых параметров геометрической точности и качества рабочих поверхностей. Применительно к процессам поверхностного пластического деформирования это проявляется в поиске эффективных приемов управления трением в паре «инструмент – заготовка», которое, в конечном итоге, определяет картину распределения и величину напряжений и деформаций в заготовке и инструменте. Получить строгое аналитическое решение задачи по установлению связи между условиями на поверхности, трением и напряженно-деформированным состоянием контактируемых тел не представляется возможным. В этой связи на передний план выходит построение математических моделей, решение которых возможно численными методами. В статье приводятся результаты численного исследования (вычислительного эксперимента) конечно-элементной модели деформирования заготовки в различных условиях контактного взаимодействия и трения одним из методов поверхностного пластического деформирования – поверхностным дорнованием отверстий. Критерием оценки условий контактного взаимодействия и трения выбран коэффициент трения. Показано, что изменение коэффициента трения в процессе поверхностного дорнования не оказывает заметного влияния на формирование поля напряжений в деформируемой заготовке как в осевом, так и в радиальном и окружном направлениях. Вместе с тем при повышении коэффициента трения в паре «инструмент – заготовка» и соответственно силы механического сопротивления деформации заготовки наблюдается их рост. Вычислительным экспериментом подтверждено наличие внеконтактных деформаций заготовки и инструмента при поверхностном дорновании, а также снижение величины остаточных деформаций в заготовке с уменьшением коэффициента трения. Оценка баланса перемещений контактных поверхностей заготовки (внутренняя поверхность обрабатываемого отверстия) и инструмента показала, что деформации инструмента в упругой области могут привести к существенному снижению реального натяга поверхностного дорнования отверстий.

Ключевые слова: инструмент, заготовка, поверхностное деформирование, математическая модель, трение, напряжения, деформации, поверхностное дорнование

Для цитирования: Сивцев, Н. С. Численное исследование напряженно-деформированного состояния заготовки в контактной задаче поверхностного дорнования отверстий / Н. С. Сивцев, В. В. Тарасов // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 259–267. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-259-267>

Адрес для переписки

Сивцев Николай Сергеевич
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
ул. Студенческая, 7,
426011, г. Ижевск, Российская Федерация
Тел.: +8 3412 77-20-74
sivcevns@mail.ru

Address for correspondence

Sivtsev Nikolai S.
Kalashnikov Izhevsk
State Technical University
7, Studencheskaya str.,
426011, Izhevsk, Russian Federation
Tel.: +8 3412 77-20-74
sivcevns@mail.ru

Numerical Study of Stress-Strain State of Workpiece in Contact Problem of Surface Mandrel Drilling

N. S. Sivtsev¹⁾, V. V. Tarasov²⁾

¹⁾Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation),

²⁾Institute of Mechanics of the Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Izhevsk, Russian Federation)

Abstract. In recent years, the economic factor has played an increasingly important role in the selection of technologies for manufacturing machine parts with specified values of normalized parameters of geometric accuracy and quality of working surfaces. As applied to surface plastic deformation processes, this is noticeably manifested in the search for effective friction control methods in the “tool – workpiece” pair, which ultimately determines the distribution pattern and the magnitude of stresses and strains in the workpiece and the tool. It is not possible to obtain a rigorous analytical solution to the problem of establishing a connection between surface conditions, friction, and the stress-strain state of the contacted bodies. In this regard, the construction of mathematical models comes to the fore, the solution of which is possible by numerical methods. The paper presents the results of a numerical study (computational experiment) of a finite-element model of workpiece deformation under various conditions of contact interaction and friction by one of the methods of surface plastic deformation – surface mandrel drilling. The friction coefficient has been chosen as the criterion for assessing the conditions of contact interaction and friction. It is shown that a change in the friction coefficient in the process of surface mandrel has no noticeable effect on the formation of a stress field in the deformable workpiece both in the axial, and in the radial and circumferential directions. At the same time, with an increase in the value of the friction coefficient in the “tool – workpiece” pair and with the associated increase in the force of mechanical resistance to deformation of the workpiece, their growth is observed. A computational experiment has confirmed the presence of non-contact deformations of the workpiece and tool during surface mandrel drilling, as well as as a decrease in the value of residual deformations in the workpiece with a decrease in the coefficient of friction. Balance assessment of contact surface displacements in the workpiece (the inner surface of the hole to be machined) and the tool (mandrel) has shown that the deformations of the tool in the elastic region can lead to a significant decrease in the real tightness of surface mandrel drilling.

Keywords: tool, workpiece, surface deformation, mathematical model, friction, stresses, strains, surface mandrel

For citation: Sivtsev N. S., Tarasov V. V. (2021) Numerical Study of Stress-Strain State of Workpiece in Contact Problem of Surface Mandrel Drilling. *Science and Technique*. 20 (3), 259–267. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-259-267> (in Russian)

Введение

К методам обработки поверхностным пластическим деформированием, широко применяемым для повышения точности, износостойкости и усталостной прочности деталей машин, относится поверхностное дорнование цилиндрических отверстий [1–7].

Известно, что одним из важнейших факторов, обеспечивающих повышение эффективности процесса дорнования в целом, является вид напряженного состояния заготовки, непосредственно зависящий от контактного трения в очаге деформации. Управление контактным трением может достигаться различными приемами: подбором свойств смазочного материала, изменением схемы подачи смазки в очаг деформации, а также кинематики относительного движения в паре «инструмент – заготовка» (дополнительное вращение, вибрация и т. п.), а в некоторых случаях – изменением схемы

фиксации заготовки (в частности, схемы ее осевого растяжения или сжатия) [8–10].

Многочисленность явлений на контакте инструмента и заготовки не позволяет дать строгое аналитическое описание напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки при поверхностном дорновании. По этой причине разработанные математические модели деформирования заготовок основываются на упрощенных моделях взаимодействия неровностей контактирующих поверхностей и усредненных схемах их фрикционного нагружения.

В последние десятилетия благодаря высокому уровню развития вычислительной техники при оценке характера НДС в механике деформируемого твердого тела применительно к пространственным задачам находят широкое применение численные методы, в частности метод конечных элементов (МКЭ) [11–14]. На сегодняшний день МКЭ – эффективный инструмент для решения широкого класса задач,

оснащенный развитым пакетом программного обеспечения для расчета НДС деформируемого тела практически любой конфигурации в условиях сложного нагружения. Это позволяет использовать его для построения и изучения математических моделей контактных задач, в том числе применительно к процессу поверхностного дорнования [15–18].

В [19] предложена модель анизотропного трения инструмента с заготовкой взамен упрощенных, идеализирующих контактирующие поверхности, на основе которой разработаны конечно-элементная модель деформирования заготовки при поверхностном дорновании и вычислительный алгоритм [20]. Ниже приводятся результаты численного исследования НДС заготовки с использованием этой модели в пакете специально разработанных программ.

Изучался характер напряженного состояния цилиндрических заготовок следующих размеров: центральное сквозное отверстие диаметром 45 мм (номинальный размер), длина $L = 40$ мм, наружный диаметр варьировался в диапазоне 54–112 мм. Заготовка деформировалась в условиях осевого сжатия. Параметры поверхности заготовок: наибольшая высота профиля неровностей $R_{z_{\text{заг}}} = 3,2$ мкм, шаг и высота волнистости соответственно $S_w = 7$ мм и $W_z = 6,5$ мкм, отклонение профиля продольного сечения $\Delta = 0,02$ мм. Материал заготовок – сталь 45 (ГОСТ 1050–74) после нормализации, ее физико-механические характеристики: $\sigma_s = 360$ МПа, $E = 206250$ МПа, $\mu = 0,3$. Отдельные вычислительные эксперименты проведены для заготовок, изготовленных из сталей 20 (ГОСТ 1050–74) ($\sigma_s = 250$ МПа), 20Х и 40Х (ГОСТ 4543–71) ($\sigma_s = 600$ МПа и $\sigma_s = 800$ МПа соответственно). Для определения интенсивности напряжений с учетом упрочнения материала использованы действительные диаграммы деформирования сталей [21].

Наибольшая высота профиля неровностей рабочей поверхности инструмента (дорна) $R_z = 0,8$ мкм, внутренний диаметр 22 мм. Материал инструмента – сталь Р18 (ГОСТ 19265–73) в термообработанном состоянии ($\sigma_s = 2480$ МПа, $E = 228000$ МПа, $\mu = 0,3$).

Изменяли: натяг поверхностного дорнования N_d в диапазоне 0,08–0,28 мм, углы переднего α и обратного α_1 конусов инструмента от $0,5^\circ$ до 20° , ширину цилиндрической (калибрующей) ленточки b от 1 до 5 мм (рис. 1).

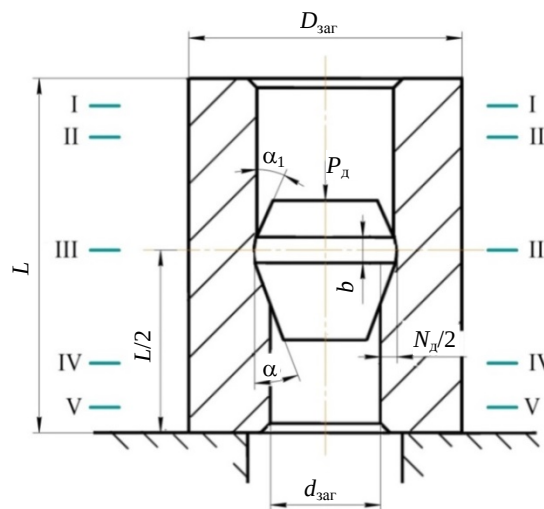


Рис. 1. Радиальные сечения заготовки, исследуемые в численном эксперименте:

P_d – сила поверхностного дорнования

Fig. 1. Radial sections of workpiece investigated in numerical experiment:

P_d – force of surface mandrel

Максимальный натяг дорнования во всех случаях ограничивался упругопластическими деформациями заготовки (степень деформации менее 1 %). Коэффициент трения f варьировали от 0 до 0,26. Достоверность результатов моделирования сравнивали с экспериментальными данными, полученными разными авторами [1–10].

Напряжения в заготовке в процессе и после поверхностного дорнования

Анализируя результаты численного исследования напряженного состояния заготовки в процессе и после поверхностного дорнования, можно сделать следующие предварительные выводы.

1. В процессе поверхностного дорнования при перемещении инструмента по обрабатываемому отверстию от свободного торца к опорному напряжения в заготовке растут, достигая предельного уровня в сечении III–III (рис. 2), наиболее удаленном от торцов, где влияние внешних зон минимально.

2. Концентрация напряжений (с максимальными радиальными) сосредоточена главным образом в зонах перехода переднего и обратного конусов с калибрующей ленточкой инстру-

мента (рис. 3). Изменить уровень напряжений можно путем варьирования ширины ленточки (рис. 2) либо увеличения радиуса скругления инструмента в переходном сечении.

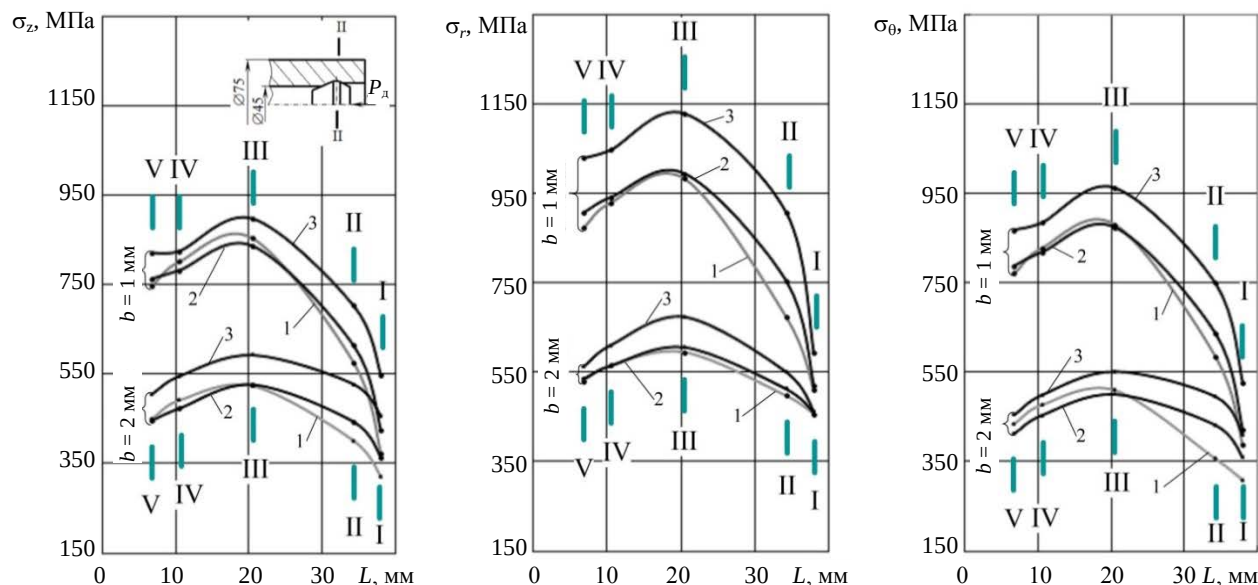


Рис. 2. Характер изменения максимальных осевых σ_z , радиальных σ_r и окружных σ_θ напряжений в заготовке в процессе поверхностного дорнования: 1 – $f = 0$; 2 – $f = 0,12$; 3 – $f = 0,26$ ($N_d = 0,08$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$)

Fig. 2. Nature of change in maximum axial σ_z , radial σ_r and circumferential σ_θ stresses in workpiece during surface mandrel: 1 – $f = 0$; 2 – $f = 0,12$; 3 – $f = 0,26$ ($N_d = 0,08$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$)

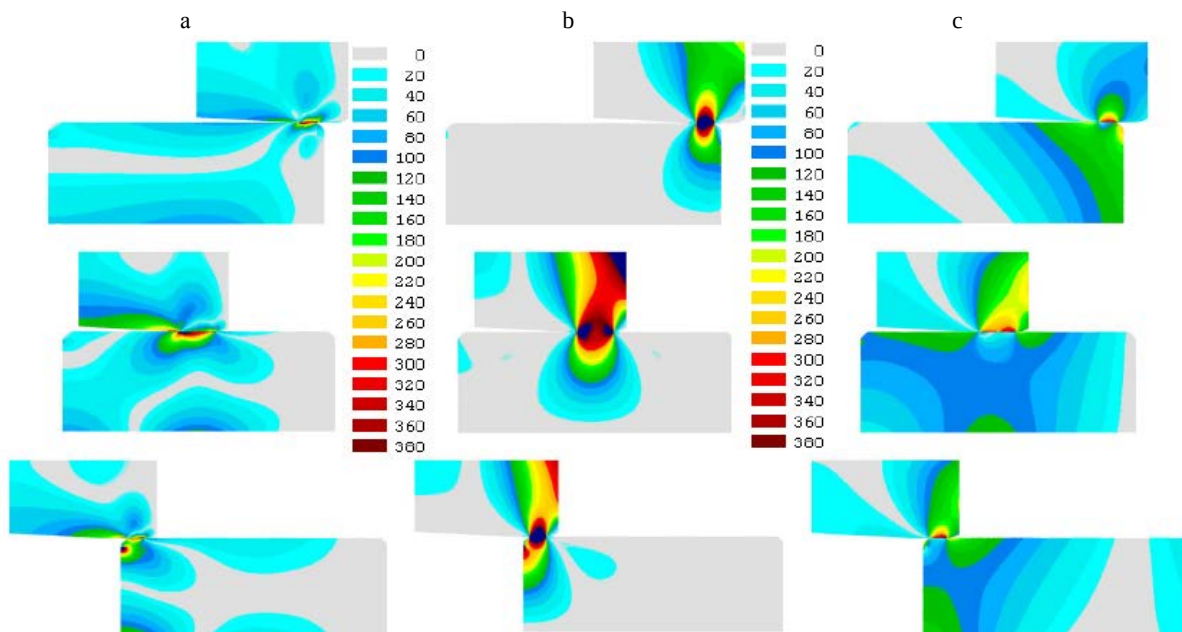


Рис. 3. Поля осевых (а), радиальных (б) и окружных (с) напряжений в заготовке в процессе поверхностного дорнования ($N_d = 0,08$ мм, $b = 5$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0,12$)

Fig. 3. Fields of axial (a), radial (b) and circumferential (c) stresses in workpiece during surface mandrel ($N_d = 0,08$ мм, $b = 5$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0,12$)

3. После обработки поверхностным дорнованием остаточные напряжения (осевые, радиальные и окружные) локализуются в поверхностном слое обработанного отверстия, причем их изменение по толщине этого слоя немонотонно (рис. 4). Последнее хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины [4, с. 212].

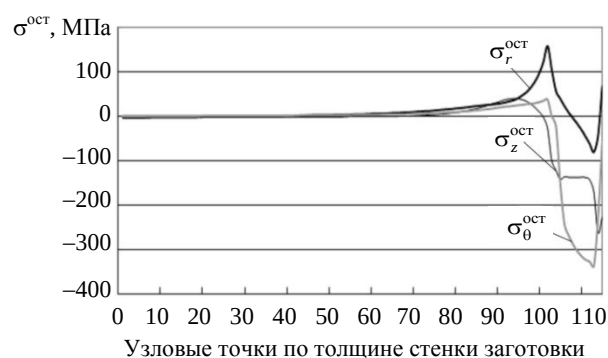


Рис. 4. Характер изменения остаточных напряжений по толщине стенки заготовки после поверхностного дорнования ($N_d = 0,12$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0,12$)

Fig. 4. Nature of change in residual stresses along wall thickness of workpiece after surface mandrel

($N_d = 0.12$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0.12$)

4. На обработанной поверхности остаточные напряжения в окружном направлении превосходят осевые (рис. 4), однако закономерности их изменения имеют общий схожий (повторяют) характер при изменении факторов процесса поверхностного дорнования. Правильность этого утверждения подтверждена опытным путем [4, с. 214].

5. Увеличение коэффициента трения при поверхностном дорновании не оказывает влияния на характер распределения напряжений в осевом, радиальном и окружном направлениях, однако изменяет их уровень (рис. 5). Такая картина наблюдается при различных сочетаниях конструкторско-технологических параметров процесса деформирования: степени деформации (натяг поверхностного дорнования), материала заготовки и ее размеров, геометрии ин-

струмента (рис. 6). В рамках выбранных для моделирования значений изменения данных факторов этот рост достигал 14 %.

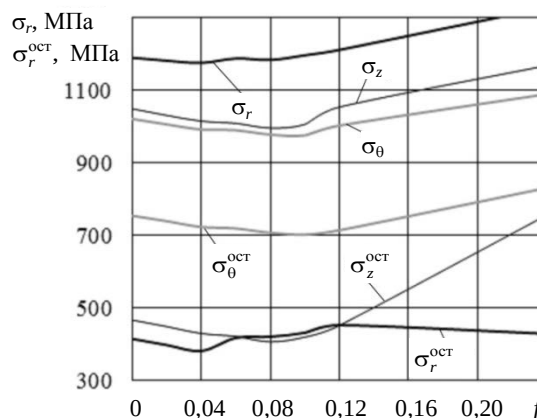


Рис. 5. Уровень максимальных напряжений в заготовке в процессе (σ_r) и после поверхностного дорнования ($\sigma_r^{\text{ост}}$) при варьировании коэффициента трения ($N_d = 0,08$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, сечение III–III)

Fig. 5. Maximum stress level in workpiece in process (σ_r) and after surface mandrel (σ_r^{after}) with varying coefficient of friction ($N_d = 0.08$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, section III–III)

Деформации в заготовке и инструменте

Учитывая, что в процессе поверхностного дорнования максимальные значения напряжений сосредоточены в переходных зонах (рис. 3), максимальные деформации заготовки и инструмента также будут происходить в этих зонах, причем вполне очевидно, что общий баланс деформаций пары «инструмент – заготовка» в точках контакта функционально всегда равен натягу дорнования. Как показали численные исследования, соотношение величин этих деформаций в процессе поверхностного дорнования меняется. С ростом напряжений при удалении инструмента от свободного торца (рис. 2) деформации в заготовке уменьшаются, а в инструменте увеличиваются. При приближении инструмента к опорному торцу и снижении напряжений наблюдается обратная картина – деформации в заготовке увеличиваются, а в инструменте уменьшаются.

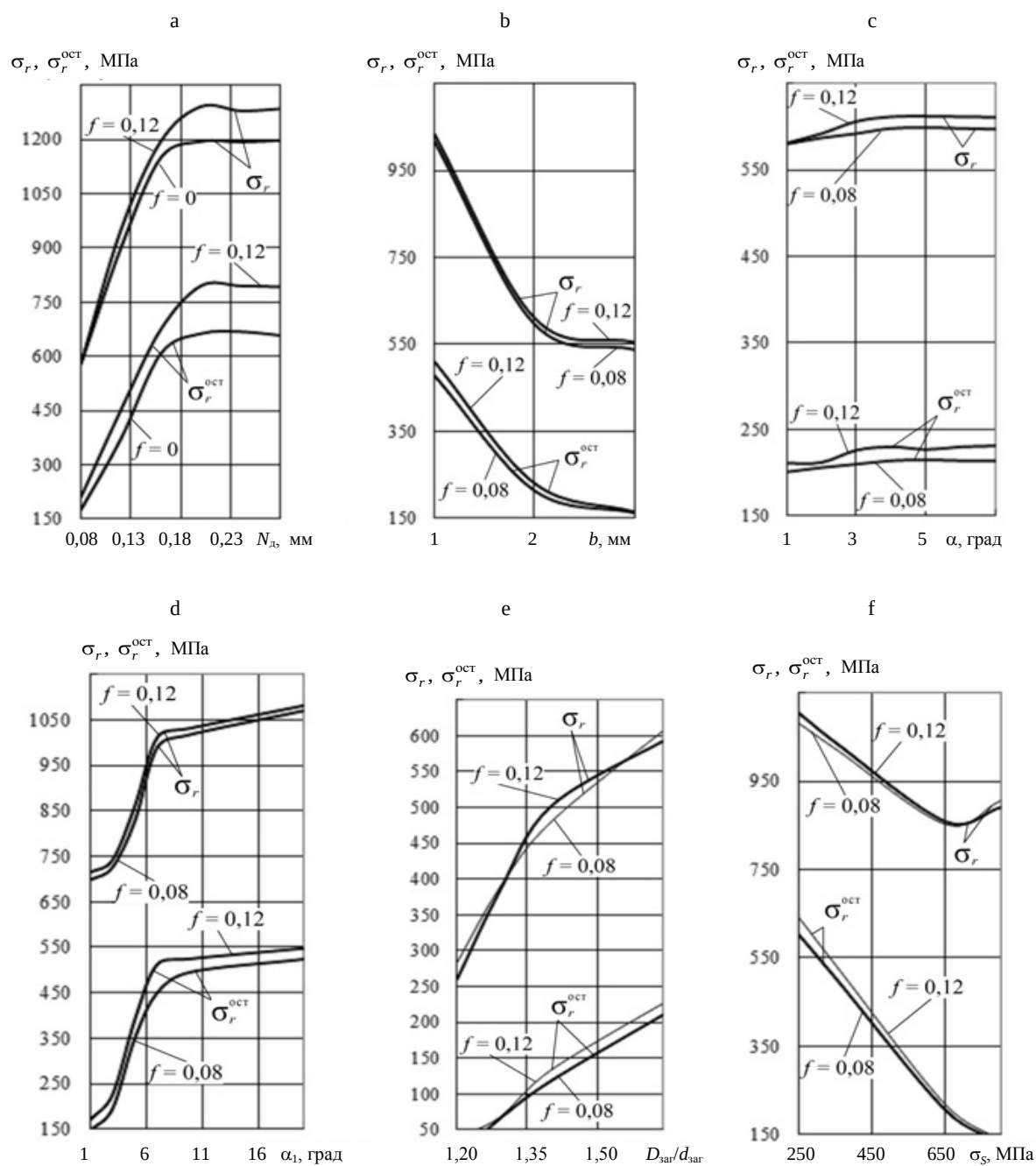


Рис. 6. Абсолютные значения максимальных радиальных напряжений в заготовке в процессе (σ_r) и после обработки (σ_r^{oct}) при вариации величины коэффициента трения в зависимости от: а – натяга ($b = 2$ мм, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); б – ширины цилиндрической ленточки инструмента ($N_d = 0,08$ мм, $\alpha = 7^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); в – угла переднего конуса инструмента ($N_d = 0,08$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha_1 = 10^\circ$); д – угла обратного конуса инструмента ($N_d = 0,12$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 3^\circ$); е – толщины стенки заготовки ($N_d = 0,08$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); ф – механических свойств обрабатываемого материала ($N_d = 0,12$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$)

Fig. 6. Absolute values of maximum radial stresses in workpiece during the process (σ_r) and after processing (σ_r^{after}) with variation in value of friction coefficient depending on: а – tension ($b = 2$ mm, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); б – width of cylindrical ribbon tool ($N_d = 0.08$ mm, $\alpha = 7^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); в – angle of front tool cone ($N_d = 0.08$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha_1 = 10^\circ$); д – angle of inverse tool cone ($N_d = 0.12$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 3^\circ$); е – wall thickness of workpiece ($N_d = 0.08$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); ф – mechanical properties of processed material ($N_d = 0.12$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$)

Выявленную закономерность изменения деформаций затруднительно объяснить только изменением уровня напряжений в заготовке и инструменте. Для ее точного понимания необходимо рассмотрение более сложной модели, учитывающей эффект (явление) внеконтактной деформации заготовки при поверхностном дорновании, обнаруженный авторами [4]. Эффект внеконтактной деформации приводит к уменьшению теоретической (расчетной) длины контакта переднего конуса инструмента с заготовкой $l_{к.т}$ до ее фактического значения $l_{к.ф}$ (рис. 7).

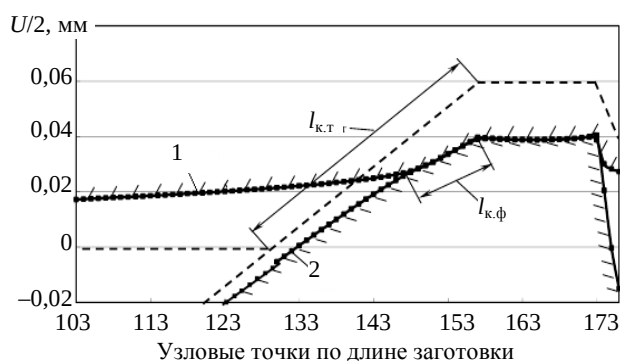


Рис. 7. Волна внеконтактной деформации U заготовки 1 в зоне переднего конуса инструмента 2 при поверхностном дорновании ($N_d = 0,12$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0,12$)

Fig. 7. Wave of non-contact deformation U of workpiece 1 in the area of front cone of tool 2 during surface mandrel ($N_d = 0.12$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0.12$)

В настоящем исследовании установлено, что в процессе поверхностного дорнования (рис. 8) при постоянном натяге длина $l_{к.ф}$ увеличивается и достигает максимума при выходе инструмента в сечение III–III заготовки (рис. 1) при экстремальном уровне напряжений (рис. 2).

В сечении III–III деформации внутренней поверхности заготовки имеют минимальное значение. Приближение инструмента к опорному торцу приводит к падению уровня напряжений в заготовке и уменьшению $l_{к.ф}$, но деформации при этом растут. Это указывает на то, что максимальные значения деформаций в заготовке и инструменте зависят не только от уровня напряжений, но и от величины $l_{к.ф}$.

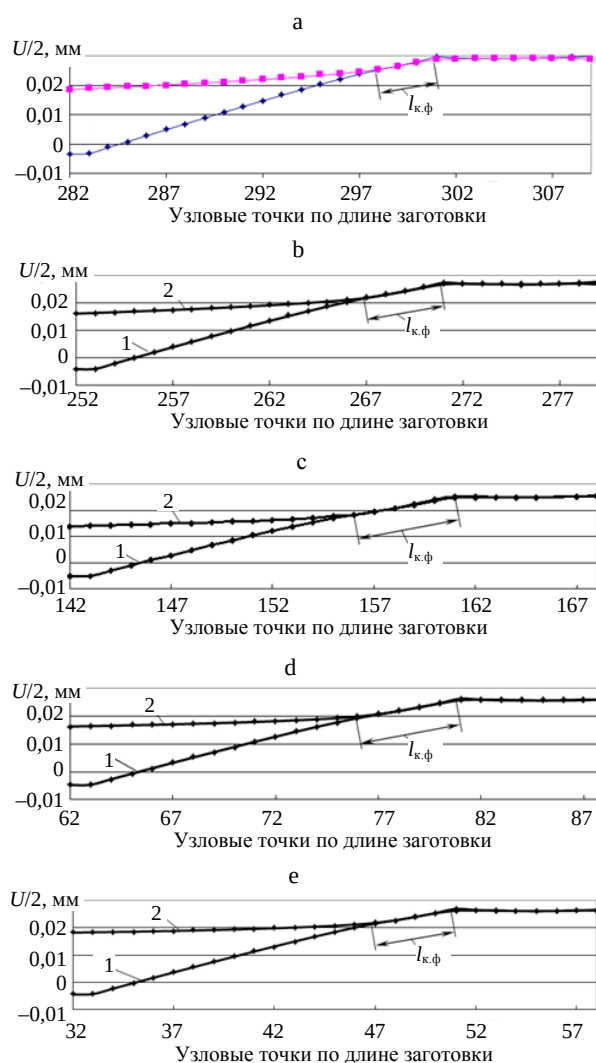


Рис. 8. Фактическая длина контакта пары «инструмент 1 – заготовка 2» по переднему конусу в процессе поверхностного дорнования в сечениях (рис. 1): а – I–I; б – II–II; в – III–III; д – IV–IV; е – V–V ($N_d = 0,08$ мм, $b = 1$ мм, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0,12$)

Fig. 8. Actual contact length of “tool 1 – workpiece 2” pair along front cone during surface mandrel in sections (Fig. 1): а – I–I; б – II–II; в – III–III; д – IV–IV; е – V–V ($N_d = 0.08$ mm, $b = 1$ mm, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0.12$)

Характер нагружения заготовки в процессе поверхностного дорнования непосредственно влияет и на уровень радиальной остаточной деформации по обработанному отверстию. С улучшением условий трения (уменьшением величины коэффициента трения) величина этой деформации снижается.

ВЫВОДЫ

1. Поверхностное дорнование отверстий сопровождается повышенным уровнем напряже-

ний в зоне цилиндрической ленточки инструмента. Уровень напряжений может быть снижен за счет увеличения ширины ленточки, а также радиуса переходного участка в зоне сопряжения с передним конусом. Это позволяет влиять на напряженное состояние заготовки путем изменения геометрии деформирующего инструмента.

2. Анализ показал, что после поверхностного дорнования экстремальные значения остаточных напряжений фиксируются в поверхностных слоях заготовки, при этом окружающие остаточные напряжения имеют наибольшие по модулю значения. Отмечено, что по мере удаления от обрабатываемой поверхности окружающие остаточные напряжения меняют знак на противоположный.

3. Возможность расчета численным методом интенсивности напряжений в заготовке в процессе поверхностного дорнования позволяет производить оценку параметров качества поверхностного слоя обработанных цилиндрических отверстий (степень наклепа и глубину упрочнения).

4. В диапазоне значений исследуемых параметров процесса поверхностного дорнования повышение уровня напряжений в теле заготовки при увеличении коэффициента трения достигало 14 %. Это подтверждает возможность управления напряженно-деформированным состоянием заготовки и параметрами процесса за счет направленного управления условиями контактного взаимодействия и трения инструмента с заготовкой.

5. Основываясь на оценке баланса деформаций контактных поверхностей в паре «инструмент – заготовка», показано, что деформации могут привести к существенному снижению натяга поверхностного дорнования, реальная величина которого изменяется по ходу процесса и зависит от напряжений и фактической длины контакта переднего конуса инструмента с заготовкой.

6. В ходе численного исследования подтвержден эффект внеконтактной деформации заготовки, обнаруженный ранее экспериментально [4], что подтверждает адекватность разработанной модели. Также установлен факт внеконтактной деформации инструмента. Учет этих деформаций необходим для правильного

назначения режима обработки и прогнозирования выходных параметров процесса.

7. Вычислительным экспериментом подтверждено, что уменьшение силы трения в процессе поверхностного дорнования приводит к снижению остаточных деформаций в заготовке после ее обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проскуряков, Ю. Г. Дорнование отверстий / Ю. Г. Проскуряков. М.: Свердловск: Машгиз, 1961. 192 с.
2. Проскуряков, Ю. Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов / Ю. Г. Проскуряков. М.: Машиностроение, 1971. 208 с.
3. Монченко, В. П. Эффективная технология производства полых цилиндров / В. П. Монченко. М.: Машиностроение, 1980. 248 с.
4. Розенберг, А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг. Киев: Наукова думка, 1990. 320 с.
5. Проскуряков, Ю. Г. Дорнование цилиндрических отверстий с большими натягами / Ю. Г. Проскуряков, Г. И. Шельвинский. Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1982. 168 с.
6. Исаев, А. Н. Совершенствование процессов дорнования отверстий трубчатых заготовок / А. Н. Исаев. Ростов н/Д., 2005. 399 с.
7. Охотин, И. С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами / И. С. Охотин. Томск, 2010. 16 с.
8. Янченко, И. И. Технологические основы обработки точных отверстий дорнованием: в 2 ч. / И. И. Янченко, В. В. Тарасов, Н. С. Сивцев. Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 2002. Ч. 1. Теория управления контактно-кинематическими условиями при дорновании. 138 с.
9. Янченко, И. И. Технологические основы обработки точных отверстий дорнованием: в 2 ч. / И. И. Янченко, В. В. Тарасов, Н. С. Сивцев. Ижевск: Изд-во УдНЦ УрО РАН, 2002. Ч. 2. Влияние контактно-кинематических условий на качество деталей и соединений. 163 с.
10. Сорокин, В. М. Особенности обработки цилиндрических отверстий в деталях дорнованием (протягиванием) с противодействием технологических жидкостей / В. М. Сорокин, Н. М. Тудакова, В. В. Крайнов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 4. С. 13–17.
11. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич; пер. с англ. под ред. Б. Е. Победри. М.: Мир, 1975. 541 с.
12. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган; пер. с англ. под ред. Н. С. Бахвалова. М.: Мир, 1986. 318 с.
13. Maga, D. Numerické Riesení / D. Maga, R. Hartyansky. Brno, Czech Rep.: Univerzita Obrany, 2006. 174 p.
14. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Примеры / Р. Галлагер; пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с.
15. Лузгин, А. А. Теоретические основы математического моделирования процесса калибровки отверстий в режиме жидкостного трения / А. А. Лузгин. Ижевск, 2006. 138 с.

16. Тудакова, Н. М. Моделирование процессов комплексной обработки отверстий / Н. М. Тудакова, О. И. Кутилова, В. В. Крайнов // Труды НГТУ имени Р. Е. Алексеева. 2012. Т. 94, № 1. С. 87–93.
17. Лебедев, А. Р. Моделирование геометрических параметров очага деформирования при дорновании отверстий / А. Р. Лебедев, А. Н. Исаев, С. В. Власкин // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб. статей 11 Междунар. науч.-практ. конф. в рамках Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2018». С. 186–189.
18. Математическая модель для прогнозирования сил дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях давления металлоплакирующих смазок / А. В. Щедрин [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 2. С. 71–76.
19. Тарасов, В. В. Моделирование трения в технологических процессах обработки металлов / В. В. Тарасов, Н. С. Сивцев. Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2006. 166 с.
20. Václav, S. Investigation of Stress-Strain State of the Workpiece when the Gauge Processing in her Holes Burnishing / S. Václav, N. S. Sivtsev, K. Senderská // Advances in Science and Technology Research Journal. 2017. Vol. 11, No 3. P. 211–222. <https://doi.org/10.12913/22998624/76093>.
21. Полухин, И. П. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / И. П. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. М.: Металлургия, 1976. 488 с.
9. Yanchenko I. I., Tarasov V. V., Sivtsev N. S. (2002) *Technological Basis for Machining Precise Holes by Mandrel. Part 2. The influence of Contact-Kinematic Conditions for the Quality of Parts and Connections*. Izhevsk, Publishing House of Udmurt Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 163 (in Russian).
10. Sorokin V. M., Tudakova N. M., Krainov V. V. (2015) Features of Processing Cylindrical Holes in Parts by Mandrel (Pulling) with Backpressure of Process Fluids. *Uprochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (4), 13–17 (in Russian).
11. Zenkevich O. (1975) *Finite Element Method in Engineering*. Moscow, Mir Publ. 541 (in Russian).
12. Zenkevich O., Morgan K. (1986) *Finite Elements and Approximation*. Moscow, Mir Publ. 318 (in Russian).
13. Maga D., Hartyansky R. (2006) *Numerické Řešení*. Brno, Czech Rep., Univerzita Obrany. 174.
14. Gallagher R. (1984) *Finite Element Method. Examples*. Moscow, Mir Publ. 428 (in Russian).
15. Luzgin A. A. (2006) *Theoretical Foundations of Mathematical Modeling of Hole Calibration Process in Liquid Friction Mode*. Izhevsk. 138 (in Russian).
16. Tudakova N. M., Kutilova O. I., Krainov V. V. (2012) Simulation of Integrated Hole Machining Processes. *Trudy NGTU imeni R. E. Alekseeva = Transactions of NNSTU name after R.E. Alekseev*, 94 (1), 87–93 (in Russian).
17. Lebedev A. R., Isaev A. N., Vlasikin S. V. (2018) Modeling the Geometric Parameters of the Deformation Zone During Mandrel Drilling. *Sostoyanie i Perspektivy Razvitiya Sel'skokhozyaistvennogo Mashinostroyeniya: Sb. Statei 11 Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. v Ramkakh Mezhdunar. Agroprom. Vystavki "Interagromash-2018"* [State and Prospects for the Development of Agricultural Engineering: Collection of Papers of the 11th Scientific-Practical Conference in the Framework of International Agroindustrial Exhibition "Interagromash-2018"], 186–189 (in Russian).
18. Shchedrin A. V., Klimochkin K. O., Bekaev A. A., Pomytkin V. A. (2019) Mathematical Model for Predicting the Forces of Mandrel Holes with a Tool Having Regular Microgeometry of the Surface under Pressure of Metal-Plating Lubricants. *Sborka v Mashinostroyenii, Priborostroyenii = Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making*, (2), 71–76 (in Russian).
19. Tarasov V. V., Sivtsev N. S. (2006) *Modeling of Friction in Technological Processes of Metal Processing*. Izhevsk: Publishing House of Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 166 (in Russian).
20. Václav S., Sivtsev N. S., Senderská K. (2017) Investigation of Stress-Strain State of the Workpiece when the Gauge Processing in her Holes Burnishing. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11 (3), 211–222. <https://doi.org/10.12913/22998624/76093>.
21. Polukhin I. P., Gun G. Ya., Galkin A. M. (1976) *Resistance of Metals and Alloys to Plastic Deformation*. Moscow, Metallurgiya Publ. 488 (in Russian).

Поступила 10.02.2020

Подписана в печать 19.05.2020

Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Proskuryakov Yu. G. (1961) *Burnishing of Holes*. Moscow-Sverdlovsk, Mashgiz Publ. 192 (in Russian).
2. Proskuryakov Yu. G. (1971) *Technology of Work Hardening, Calibration and Forming of Metals*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 208 (in Russian).
3. Monchenko V. P. (1980) *Effective Technology for the Production of Hollow Cylinders*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 248 (in Russian).
4. Rosenberg A. M., Rosenberg O. A. (1990) *The Mechanics of Plastic Deformation in the Process of Cutting and Deforming Broaching*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 320 (in Russian).
5. Proskuryakov Yu. G., Shelvinsky G. I. (1982) *Burnishing of Cylindrical Holes with High Interference*. Rostov, Publishing House of Rostov University. 168 (in Russian).
6. Isaev A. N. (2005) *Improving the Processes of Mandrel Drilling of Tubular Blanks*. Rostov-on-Don. 399 (in Russian).
7. Okhotin I. S. (2010) *Rugging of Deep Holes of Small Diameter in Hollow Thick-Walled Cylinders with Large Interference*. Tomsk. 16 (in Russian).
8. Yanchenko I. I., Tarasov V. V., Sivtsev N. S. (2002) *Technological Basis for Machining Precise Holes by Mandrel. Part 1. Control Theory of Contact-Kinematic Conditions During Mandrel*. Izhevsk. Publishing House of Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 138 (in Russian).

Received: 10.02.2020

Accepted: 19.05.2020

Published online: 31.05.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-268-274>

УДК 629.113.5

Методика инженерного расчета скобовидных пластинчатых рессор

Докт. техн. наук, проф. М. К. Сукач¹⁾

¹⁾Киевский национальный университет строительства и архитектуры (Киев, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В Киевском национальном университете строительства и архитектуры разработаны новые виды упругих устройств – скобовидная пластинчатая и скобовидная пластинчато-листовая рессоры. Скобовидная пластинчатая рессора представляет собой упругую пластину, концы которой отклонены от ее средней части в одну и ту же сторону и выполнены в виде консолей, снабженных приспособлениями для шарнирного крепления. Средняя часть пластины, расположенной параллельно линии действия нагрузки, выполнена с переменным по длине сечением. В каждом сечении ось, относительно которой момент инерции сечения максимален, перпендикулярна плоскости изгиба рессоры, спроектированной как балка равного сопротивления. Обоснована целесообразность применения скобовидной пластинчатой рессоры для усовершенствования эластичной подвески кабин грузовых автомобилей. Разработаны рекомендации по выбору наиболее перспективного устройства с целью внедрения их в серийное производство, а также методики инженерного расчета таких рессор. Объектами исследований являлись устройства, предназначенные для амортизации динамических нагрузок в машинах и приборах, отличающиеся тем, что они имеют скобовидную форму и подвергаются изгибу в плоскости наибольшей жесткости своих поперечных сечений, а также амортизационные подвески с использованием этих рессор, в частности подвески кабин автомобилей КамАЗ. Внедрение исследования может существенно уменьшить металлоемкость и трудоемкость изготовления упругих устройств, а также окажется полезным при проектировании и эксплуатации эластичных подвесок автомобилей.

Ключевые слова: упругое устройство, скобовидная пластинчатая рессора, пластинчато-листовая рессора, эластичная подвеска

Для цитирования: Сукач, М. К. Методика инженерного расчета скобовидных пластинчатых рессор / М. К. Сукач // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 268–274. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-268-274>

The Staple-Shape Plate Springs Engineering Calculation Method

М. К. Sukach¹⁾

¹⁾Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

Abstract. The new types of elastic devices – staple-shape plate spring and leaf spring - have been developed at the Kyiv National University of Construction and Architecture. The staple-shape plate spring is an elastic plate where the ends are deflected from its middle part in the same direction and are made in the form of consoles equipped with hinge attachments. The middle part of the plate as a parallel to the line of the load action is designed with variable length section. In each section, the axis, relative to which the moment of the section inertia is a maximum, is perpendicular to the spring bending plane, designed as the equal resistance beam. This article substantiates the feasibility of using a staple-shape plate spring to improve the elastic suspension of truck cabs. The recommendations for choosing the most promising mass production directions, as well as the engineering calculation methods of such springs, have been developed. Objects of the study are devices intended for machines and their components dynamic loads shock absorption, differing in having a bracket shape and being a subject to

Адрес для переписки
Сукач Михаил Кузьмич
Киевский национальный университет
строительства и архитектуры
просп. Воздухофлотский, 31,
03037, г. Киев, Украина
Тел.: +38 095 629-74-17
msukach@ua.fm

Address for correspondence
Sukach Mykhailo K.
Kyiv National University
of Construction and Architecture
31, Povitroflotsky Ave.,
03037, Kyiv, Ukraine
Tel.: +38 095 629-74-17
msukach@ua.fm

bending in the plane of the highest rigidity of their cross sections, as well as shock absorbers using these springs, in particular KamAZ cabs suspension. This research implementation allows significantly reducing the metal consumption and elastic devices manufacture complexity, as well as can be useful in the design and operation of elastic car suspensions.

Keywords: elastic device, staple-shaped plate spring, leaf spring, elastic suspension

For citation: Sukach M. K. (2021) The Staple-Shape Plate Springs Engineering Calculation Method. *Science and Technique*. 20 (3), 268–274. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-268-274> (in Russian)

Введение

Многочисленные расчеты, подтвержденные экспериментальными исследованиями [1–3], показывают, что у скобовидных пластинчатых рессор (СПР), представляющих интерес для практической реализации в амортизационных устройствах транспортных средств, углы поворота крайних сечений полотна под статической и динамической нагрузками φ_1 обычно невелики и, как правило, не превышают 2° – 3° [4–7]. Величина косинусов таких малых углов – не менее 0,998. Лабораторные исследования рессоры [8, 9] также показывают, что с достаточной точностью инженерного расчета можно принимать $\cos\varphi_1$ и $\cos\varphi$ равными единице. Исключение составляют формулы (13), (16), (17), (19), (20), (30), (33), (38), приведенные в [3], в которые следует подставлять расчетные значения $\cos\varphi$ и $\cos\varphi_1$.

Поскольку степень изменения высоты сечения полотна скобовидных пластинчатых рессор «равного сопротивления», предназначенных для работы преимущественно на сжатие, относительно невелика, при проектировочном расчете высота сечений полотна h таких СПР, так же, как и их толщина b , может быть принята постоянной (рис. 1). При этом моменты сопротивления W_{zm} и инерций I_{zm} этих сечений тоже будут постоянными [10–13].

Согласно формуле (1) из [3], изгибающий момент в сечениях полотна переменный, поэтому напряжения в данных сечениях будут изменяться, возрастая от краев полотна к его середине, а упругая линия полотна уже не будет дугой окружности. При предварительном проектировочном расчете СПР с полотном постоянного сечения можно полагать, что истинная форма упругой линии полотна мало отличается от дуги окружности, поэтому принимаем радиус кривизны упругой ли-

нии $\rho_m = \rho = \text{const}$. Также в соответствии с (1) из [3] можно пренебречь значением y по сравнению с величиной $l \cos\varphi_1$.

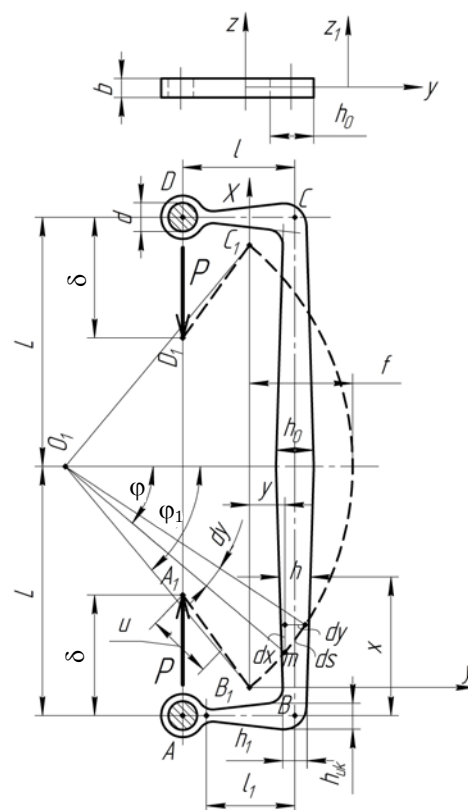


Рис. 1. Расчетная схема скобовидной пластинчатой рессоры

Fig. 1. Calculation scheme of staple-shaped plate spring

С целью упрощения технологии изготовления предпочтительнее выполнять профиль полки СПР таким, чтобы высота ее сечений изменялась по линейному закону, возрастая от некоторой величины h_{u0} вблизи устройства для шарнирного соединения СПР со смежной деталью (рис. 2) до величины h_{uk} в корневом сечении полки, в месте перехода в криволинейный участок, соединяющий ее с полотном рессоры. При этом полка уже не будет являться балкой (брусом), собственное перемещение (прогиб) которой δ_2 может быть вычислено по формуле (34) из [3].

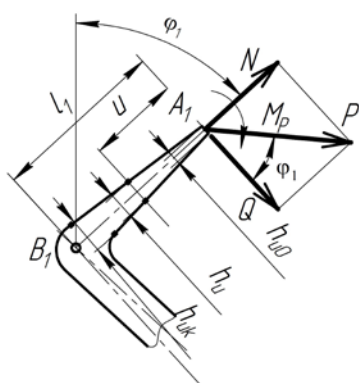


Рис. 2. Расчетная схема полки рессоры

Fig. 2. Calculation scheme of spring shelf

Однако при проектировочном расчете целесообразно вначале определять величину δ_2 именно по формуле (34) из [3], уточняя ее при последующем проверочном расчете. Исходя из изложенных основных предпосылок, некоторые теоретические формулы, выведенные ранее, преобразовываются и при инженерном расчете используются в соответствии с представленной ниже методикой.

Основные величины для расчета полотна рессоры

Силовые факторы в сечении полотна:

– изгибающий момент

$$M_z = Pl = \text{const};$$

– нормальная сила

$$N = P = \text{const};$$

– поперечная (перерезывающая) сила

$$Q = P \sin \varphi;$$

– момент инерции сечения полотна

$$I_z = \frac{bh^3}{12} = \text{const};$$

– момент сопротивления сечения полотна

$$W_z = \frac{bh^2}{6} = \text{const}.$$

Величины, необходимые для расчета полотна рессоры:

– радиус кривизны упругой линии полотна

$$\rho = \frac{EI_z}{M_z} = \text{const};$$

– угол поворота крайнего сечения полотна

$$\varphi_1 = \frac{L}{\rho};$$

– наибольшее напряжение изгиба в крайнем сечении полотна

$$\sigma_1 = \frac{M_z}{W_z};$$

– нормальное напряжение сжатия в сечении полотна

$$\sigma_N = \frac{P}{bh};$$

– наибольший поперечный прогиб полотна

$$y_{\max} = \rho(1 - \cos \varphi_1);$$

– перемещение центра шарнира от прогиба полки по (34) из [3]

$$\delta_2 \approx \frac{2Pl^3}{3EI_z}.$$

Исходные данные проектировочного расчета

При проектировочном расчете СПР обычно задаются [14–17]:

– материал рессоры, его механические характеристики и модуль упругости (σ_b , σ_{τ} , E);

– максимальное $A_{\max}$ и минимальное $A_{\min}$ межшарнирные расстояния;

– максимальная испытательная нагрузка $P_{\max}$;

– статическая нагрузка $P_{\text{ст}}$;

– жесткость рессоры C или статический прогиб $f_{\text{ст}}$;

– максимальный динамический прогиб при циклической нагрузке f_d ;

– размах колебаний (от статического положения) при циклическом нагружении $2a$.

Поскольку задача проектировочного расчета является многофакторной, последний выполняется как эвристически-вариантный, цель которого – создание рессоры, удовлетворяющей поставленным требованиям и, кроме того,

обладающей возможно меньшей металлоемкостью, простотой технологического изготовления и минимальной стоимостью [18, 19].

При заданных величинах $P_{\max}$ и C необходимую жесткость при минимизации массы СПР с прямолинейными ножами обычно удается обеспечить путем выбора возможно большей расчетной длины полки l и большего отношения момента сопротивления сечения полотна к площади поперечного сечения

$$K_w = \frac{W_z}{F}. \quad (1)$$

Например, в случае прямоугольной формы сечения СПР

$$K_w = \frac{bh^2}{6bh} = \frac{h}{6}.$$

Следовательно, при проектировании такой рессоры целесообразно выбирать сечения с наибольшей возможной высотой. Однако в целях уменьшения массы следует стремиться к уменьшению F , что при чрезмерном увеличении h приводит к значительному уменьшению b . При этом резко снижается минимальный момент инерции сечения $I_y = hb^3/12$, что для рессор, работающих на сжатие, чревато опасностью потери устойчивости на продольный изгиб. Поэтому первым этапом проекторочного расчета СПР, работающих на сжатие, является определение сжимающей критической силы, допустимой по условиям обеспечения устойчивости при продольном изгибе

$$P_{\text{кр}} \geq n_{\text{пр}} P_{\text{max}}. \quad (2)$$

Коэффициент запаса устойчивости $n_{\text{пр}}$ должен выбираться с учетом условий крепления СПР в ее шарнирных узлах. Если конструкция шарнира надежно исключает поворот конечных сечений СПР в плоскости ее наименьшей жесткости, можно принимать $n'_{\text{пр}} = 2,0-2,5$ и вычислять $P_{\text{кр}}$ как для стержня с защемленными концами; если поворот конечных сечений СПР в плоскости ее наименьшей жесткости не исключен, то $n'_{\text{пр}} = 1,5-2,0$, и определять $P_{\text{кр}}$ следует по формуле для стержня со сферическими шарнирами на концах.

В первом и во втором случаях используется формула Эйлера:

$$P_{\text{кр}} = \frac{4\pi^2 EI_y}{A_{\text{max}}^2} = \frac{\pi^2 hb^3 E}{3A_{\text{max}}^2}; \quad (3)$$

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 EI_y}{A_{\text{max}}^2} = \frac{\pi^2 hb^3 E}{12A_{\text{max}}^2}. \quad (4)$$

Расчет рессоры с прямолинейными полками

Рассмотрим методику проекторочного расчета СПР с поперечными сечениями прямоугольной формы, схема которой изображена на рис. 3, а полки выполнены так, что высота их сечений изменяется по линейному закону.

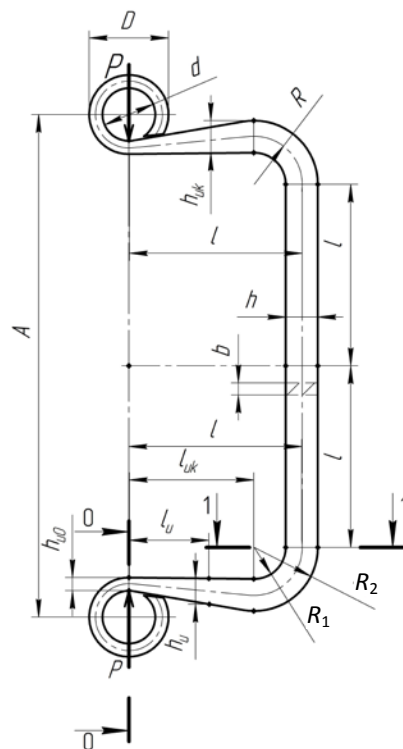


Рис. 3. Расчетная схема скобовидной пластинчатой рессоры с прямолинейными полками

Fig. 3. The scheme of calculation of the staple-shaped plate spring in the form of a bracket with straight shelves

Полагая, что поворот конечных сечений СПР в плоскости ее наименьшей жесткости возможен, определяем критическую сжимающую силу $P_{\text{кр}}$ по формуле

$$P_{\text{кр}} = n'_{\text{пр}} P_{\text{max}}.$$

Учитывая приведенные выше рекомендации, принимаем

$$h = K_h b, \quad (5)$$

где K_h – коэффициент высоты, $K_h = 1,5\text{--}2,5$.

Подставив в (4) величину h из (5), находим

$$b = \sqrt[4]{\frac{12A^2 n'_{\text{пр}} P_{\text{max}}}{\pi^2 E K_h}}. \quad (6)$$

По выбранному значению b из формулы (5) определяем численную величину h и для последующего расчета выбираем ближайшую к ней большую величину по сортаменту ГОСТ 103–2006, каковую и принимаем, как расчетную. Расчетная высота корневого сечения полки $h_{uk} = h$.

Расчетная длина полки l определяется из уравнения напряженного состояния рессоры (формула (27) из [3]), в котором в первом приближении принимаются $\cos\varphi_1 \approx 1$, $\sin\varphi \approx 0$

$$l = \frac{h}{6} \left(\frac{bh[\sigma]_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} - 1 \right), \quad (7)$$

где $[\sigma]_{\text{max}} = (0,90 + 0,93)\sigma_{\tau}$ согласно [3].

Принимаем величины радиусов кривизны переходного участка рессоры:

- внутреннего – $R_1 = h$;
- наружного – $R_2 = 2h$.

Находим средний радиус переходного участка

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2} = \frac{3}{2}h.$$

Определяем рабочую длину полки $l_{uk} = l - R$.

Вычисляем максимальные изгибающие моменты в корневом сечении полки и в крайнем сечении полотна рессоры соответственно:

$$M_{\text{max}_u} = P_{\text{max}} l_{uk};$$

$$M_{\text{max}_1} = P_{\text{max}} l.$$

По формуле (39) из [3] находим величину смещения нейтрального слоя e в переходном участке.

Определяем величину среднего изгибающего момента в переходном участке рессоры

$$M = \frac{M_{\text{max}_u} + M_{\text{max}_1}}{2}.$$

По формуле (2.40) из [3] вычисляем напряжение изгиба σ_1 на внутренней поверхности среднего сечения переходного участка.

Определяем максимальную нормальную и касательную силы в среднем сечении переходного участка $N_u = Q_u = 0,7071P_{\text{max}}$.

Вычисляем максимальное эквивалентное напряжение на внутренней поверхности среднего сечения переходного участка

$$\sigma_{\text{эк.у}} = \sqrt{\left(\sigma_1 + \frac{N_u}{bh} \right)^2 + 3 \left(\frac{Q_u}{bh} \right)^2}. \quad (8)$$

Проверяем условие $\sigma_{\text{эк.у}}/[\sigma]_{\text{max}} \leq 1$ и в случае его несоблюдения производим пересчет величины h и всех зависящих от нее показателей, соответственно снизив максимальное допускаемое напряжение $[\sigma]_{\text{max}}$.

Определяем наименьшую допустимую высоту сечения полки h_{u0} по расчету ее на действие поперечной силы $Q_{\text{max}} = P_{\text{max}}$

$$h_{u0} = \frac{Q_{\text{max}}}{b[\tau]},$$

$$\text{где } [\tau] = \frac{[\sigma]_{\text{max}}}{\sqrt{3}}.$$

Для обеспечения достаточной прочности ушка СПР и полки по всей длине в случае необходимости конструктивно увеличиваем величину h_{u0} так, чтобы $h_{u0} \geq h_{\text{уш}}$, где толщина ушка $h_{\text{уш}} \geq (D - d)/2 \geq 3$ мм, и тогда текущая высота сечения полки

$$h_u \geq 2,5 \sqrt{\frac{P_{\text{max}}}{b[\sigma]_{\text{max}}}}. \quad (9)$$

При этом внутренний диаметр ушка d определяется из конструктивных соображений по условиям шарнирного соединения с деталью, смежной с СПР.

Находим максимальный потребный прогиб рессоры Δ_{max} , полагая, что жесткость C во всем интервале нагружения рессоры сохраняется постоянной

$$\Delta_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{C}. \quad (10)$$

Определяем моменты инерции и сопротивления сечения полотна СПР

$$I = \frac{bh^3}{12};$$

$$W = \frac{bh^2}{6}.$$

Находим минимальный радиус кривизны упругой линии полотна СПР

$$\rho_{\min} = \frac{EI}{M_{\max_1}}.$$

Вычисляем максимальный угол поворота крайнего сечения полотна СПР

$$\varphi_{\max_1} = \frac{L}{\rho_{\min}}, \quad (11)$$

где $L = \frac{A}{2} - \left(\frac{d}{2} + h_{u_0} + R_1 \right).$

Определяем наибольшее поворотное перемещение центра шарнира полки СПР

$$\delta_{1\max} = L\varphi_{\max_1}.$$

Если $0,35 < \frac{\delta_{1\max}}{\Delta_{\max}} < 0,43$, то продолжаем расчет, определяя остальные компоненты суммарного прогиба.

По формулам (34) и (35) из [3] находим соответственно $\delta_{2\max}$ и $\delta_{3\max}$:

$$\delta_{2\max} \approx \frac{2P_{\max}L_{uk}^3}{3EI};$$

$$\delta_{3\max} \approx L - P_{\min} \sin \varphi_{\max_1}.$$

Отсюда максимальный прогиб

$$\Delta_{\max}^{\text{факт}} = 2(\delta_{1\max} + \delta_{2\max} + \delta_{3\max}).$$

Если различие между заданной величиной прогиба $\Delta_{\max}$ и фактически осуществимым прогибом $\Delta_{\max}^{\text{факт}}$ превышает $\pm 5\%$, то выполняют расчет во втором приближении по формулам, приведенным в [3] для напряженного состояния СПР прямоугольного сечения с учетом величины $\varphi_{\max_1}$, найденной по (11) из настоящей статьи, и с внесением необходимых корректи-

вов в исходные параметры расчета A , b , h , L . Расчет повторяют до тех пор, пока не будет обеспечена реализация заданных параметров СПР.

Исследования скобовидной пластинчатой рессоры проведены в лаборатории кафедры строительных машин КНУБА на моделях, изготовленных из полосовой стали 60С2А путем фрезерования и термической обработки при $t_{\text{зак}} = 870^\circ\text{C}$ и $t_{\text{отп}} = 460^\circ\text{C}$. Податливость обоих образцов СПР 5320-5001080, рассчитанных на максимальную статическую нагрузку 122 и 2000 кгс при жесткости порядка 833 Н/см, оказалась на 8 % больше расчетной [8]. В ходе испытаний подтверждена хорошая сходимость экспериментальных данных с теоретическим прогнозом как для проектировочного, так и для поверочного расчетов.

ВЫВОД

Применение нового вида упругой подвески позволяет наиболее полно использовать несущую способность материала, обеспечивает конструктивную простоту и меньшую массу по сравнению с традиционными подвесками. Этим условиям отвечает скобовидная пластинчатая рессора, сконструированная как балка равного сопротивления. Преимущества заключаются в том, что в каждом рабочем сечении изгиб происходит в плоскости ее наибольшей жесткости, деформация вдоль линии действия внешней силы достаточна для поглощения заданной энергии, а максимальное эквивалентное напряжение в каждом рабочем сечении равно или близко к допускаемому.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сукач, М. К. Пружна підвіска транспортних засобів / М. К. Сукач // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: всеукр. зб. наук. праць. Київ: КНУБА, 2017. Вип. 90. С. 73–78.
2. Сукач, М. К. Обоснование принципов усовершенствования упругих устройств / М. К. Сукач // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: всеукр. зб. наук. праць. Київ: КНУБА, 2018. Вип. 91. С. 28–35. <https://doi.org/10.26884/gbdmm1891.0301>.
3. Сукач, М. К. Теоретические основы расчета скобовидных пластинчатых рессор / М. К. Сукач // Transfer of Innovative Technologies. 2018. Vol. 1, No 2. P. 40–50. <https://doi.org/10.31493/tit1812.0201>.

4. Тур, Е. Я. Устройство автомобиля / Е. Я. Тур, К. Б. Серебряков, Л. А. Жолобов. М.: Машиностроение, 1991. 352 с.
5. Вихров, А. В. Несущие системы транспортных средств / А. В. Вихров. М.: МАДИ, 1989. 89 с.
6. Сирота, В. І. Основи конструкції автомобілів / В. І. Сирота; 2-ге вид., перероб. та доп. Київ: Арістей, 2005. 280 с.
7. Вахламов, В. К. Автомобили. Основы конструкции / В. В. Вахламов; 4-е изд., стер. М.: Академия, 2008. 528 с.
8. Сукач, М. К. Лабораторные исследования скобовидных пластинчатых рессор / М. К. Сукач // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2019. Вип. 94. С. 16–24. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.94.0102>.
9. Сукач, М. К. Оценка точности инженерных расчетов пластинчатых рессор / М. К. Сукач // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2020. Вип. 95. С. 5–13. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.95.0101>.
10. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / А. А. Лебедев [и др.]. Киев: ИД «Ин Юре», 2003. 535 с.
11. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев; 3-е изд., перераб. и доп. Киев: Дельта, 2008. 816 с.
12. Прочность материалов и конструкций / ред. кол.: В. Т. Трошенко (отв. ред.) [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Академперіодика, 2006. 1076 с.
13. Гигиняк, Ф. Ф. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану / Ф. Ф. Гигиняк, А. О. Лебедев, О. К. Шкодзінський. Київ: Наук. думка, 2003. 270 с.
14. Вахламов, В. К. Автомобили. Конструкция и элементы расчета / В. В. Вахламов. М.: Академия, 2006. 569 с.
15. Сукач, М. К. Автомобільна підвіска транспортного засобу із застосуванням пластинчастої ресори / М. К. Сукач, В. Г. Гичак // IV Всеукраїнська наукова конференція студентів і молодих вчених “Молодь, освіта, наука, духовність”. Київ: Ун-т Україна, 2007.
16. Епифанов, Л. И. Техническое обслуживание и ремонт / Л. И. Епифанов, Е. А. Епифанова; 2-е изд. перераб. и доп. М.: ИД «Форум», 2009. 352 с.
17. Трошенко, В. Т. Усталость металлов при неоднородном напряженном состоянии / В. Т. Трошенко; ред. Л. Е. Матюхнюк. Киев: Ин-т проблем прочности имени Г. С. Писаренко, 2011. 129 с.
18. Кузнецов, В. А. Конструирование и расчет автомобиля. Подвеска автомобиля / В. А. Кузнецов, И. Ф. Дьяков. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 60 с.
19. Кисликов, В. Ф. Будова й експлуатація автомобілів / В. Ф. Кисликов, В. В. Лушич; 6-е вид. Київ: Либідь, 2006. 400 с.
20. Dorozhni ta Meliorativni Mashini = Mining, Constructional, Road and Melioration Machines, (91), 28–35. <https://doi.org/10.26884/gbdmm1891.0301> (in Russian).
21. Sukach M. K. (2018) Theoretical Foundations for the Calculation of Staple-Shaped Leaf Springs. *Transfer of Innovative Technologies*, 1 (2), 40–50. <https://doi.org/10.31493/tit1812.0201> (in Russian).
22. Tur E. Ya., Serebryakov K. B., Zholobov L. A. (1991) *Automotive Design*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 352 (in Russian).
23. Vikhrov A. V. (1989) *Carrier Systems of Vehicles*. Moscow, Publishing House of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. 89 (in Russian).
24. Sirota V. I. (2005) *Basics of Car Design*. Kyiv, Aristey Publ. 280 (in Ukrainian).
25. Vakhlamov V. K. (2008) *Cars. Basics of Construction*. Moscow, Akademiya Publ. 528 (in Russian).
26. Sukach M. K. (2019) Laboratory Research of Staple Plate Springs. *Girnichy, Budivelni, Dorozhni ta Meliorativni Mashini = Mining, Constructional, Road and Melioration Machines*, (94), 16–24. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.94.0102> (in Russian).
27. Sukach M. K. (2020) Estimation of the Accuracy of Engineering Calculations of Plate Springs. *Girnichy, Budivelni, Dorozhni ta Meliorativni Mashini = Mining, Constructional, Road and Melioration Machines*, (95), 5–13. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.95.0101> (in Russian).
28. Lebedev A. A., Koval'chuk B. I., Giginyak F. F., Lamashevskii V. P. (2003) *Mechanical Properties of Structural Materials under Complex Stress State*. Kyiv, In Yure Publ. 535 (in Russian).
29. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V. (2008) *Handbook on Strength of Materials*. Kyiv, Delta Publ. 816 (in Russian).
30. Troshchenko V. T. (ed.). (2006) *Strength of Materials and Structures*. Kyiv, Akadempіodika Publ. 1076 (in Russian).
31. Giginyak F. F., Lebedev A. O., Shkodzinsky O. K. (2003) *Strength of Structural Materials under Low-Cycle Loading under Conditions of Complex Stressed State*. Kyiv, Naukova Dumka Publ. 270 (in Ukrainian).
32. Vakhlamov V. K. (2006) *Cars. Design and Calculation Elements*. Moscow, Akademiya Publ. 569 (in Russian).
33. Sukach M. K., Gichak V. G. (2007) *Automobile Suspension of a Vehicle with the Use a Lamellar Spring. IV Vseukrains'ka Naukova Konferentsiya Studentiv i Molodikh Vchenikh "Molod', Osvita, Nauka, Dukhovnist'"* [IV All-Ukrainian Research Practice Conference “Youth: Education, Science, Spirituality”]. Kyiv, Open International University of Human Development “Ukraine” (in Ukrainian).
34. Epifanov L. I., Epifanova E. A. (2009) *Technical Maintenance and Repair of Vehicles*. Moscow, Forum Publ. 352 (in Russian).
35. Troshchenko V. T. (2011) *Fatigue of Metals under Non-Uniform Stressed State*. Kyiv, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength. 129 (in Russian).
36. Kuznetsov V. A., Dyakov I. F. (2003) *Design and Calculation of the Car. Car Suspension*. Ulyanovsk, Publishing House of Ulyanovsk State Technical University. 60 (in Russian).
37. Kislikov V. F., Lushchik V. V. (2006) *Structure and Operation of Cars*. Kyiv, Lybid Publ. 400 (in Ukrainian).

Received: 21.02.2020

Accepted: 26.05.2020

Published online: 31.05.2021

REFERENCES

1. Sukach M. K. (2017) Elastic Suspension of Vehicles. *Girnichy, Budivelni, Dorozhni ta Meliorativni Mashini = Mining, Constructional, Road and Melioration Machines*, (90), 73–78 (in Ukrainian).
2. Sukach M. K. (2018) Justification of the Principles for the Improvement of Elastic Devices. *Girnichy, Budivelni,*