



ISSUE №16

Part №1



International periodic scientific journal

—*ONLINE*

www.moderntechno.de

Indexed in
INDEXCOPERNICUS
(ICV: 98.95)



MODERN ENGINEERING AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Heutiges Ingenieurwesen und
innovative Technologien

Issue №16

Part 1

April 2021

Published by:
Sergeieva&Co
Karlsruhe, Germany

ISSN 2567-5273
DOI 10.30890/2567-5273

Editor: Shibaev Alexander Grigoryevich, *Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician*
Scientific Secretary: Kuprienko Sergey, *PhD in technical sciences*

Editorial board: More than 210 doctors of science. Full list on pages 4

UDC 08
LBC 94
DOI: 10.30890/2567-5273.2021-16-01

Published by:
Sergeieva&Co
Lußstr. 13
76227 Karlsruhe, Germany
e-mail: editor@moderntechno.de
site: www.moderntechno.de

Copyright
© Authors, 2021



About the journal

The International Scientific Periodical Journal "Modern Technology and Innovative Technologies" has been published since 2017 and has gained considerable recognition among domestic and foreign researchers and scholars.

Periodicity of publication: Quarterly

The journal activity is driven by the following objectives:

- Broadcasting young researchers and scholars outcomes to wide scientific audience
- Fostering knowledge exchange in scientific community
- Promotion of the unification in scientific approach
- Creation of basis for innovation and new scientific approaches as well as discoveries in unknown domains

The journal purposefully acquaints the reader with the original research of authors in various fields of science, the best examples of scientific journalism.

Publications of the journal are intended for a wide readership - all those who love science. The materials published in the journal reflect current problems and affect the interests of the entire public.

Each article in the journal includes general information in English. The journal is registered in INDEXCOPERNICUS.

Sections of the Journal:

Library of Congress Classification Outline	Sections
Subclass TJ / TJ1-1570	Mechanical engineering and machinery
Subclass TK / TK1-9971	Electrical engineering.
Subclass TA / TA165	Engineering instruments, meters, etc. Industrial instrumentation
Subclass TK / TK5101-6720	Telecommunication
Subclass TK / TK1-9971	Electrical engineering. Electronics. Nuclear engineering
Subclass TN / TN1-997	Mining engineering. Metallurgy
Subclass TS / TS1950-1982, TS2120-2159	Animal products., Cereals and grain. Milling industry
Subclass TS / TS1300-1865	Textile industries
Subclass TK / TK7800-8360	Electronics
Subclass T / T55.4-60.8	Industrial engineering. Management engineering
Subclass T / T351-385	Mechanical drawing. Engineering graphics
Subclass TA / TA1001-1280, Subclass TL / TL1-484, Subclass TE / TE1-450, Subclass TF / TF1-1620	Transportation engineering, Motor vehicles. Cycles, Highway engineering. Roads and pavements, Railroad engineering and operation
Subclass TH / TH1-9745	Building construction
Subclass T / T55-55.3	Industrial safety. Industrial accident prevention
Additional sections	Innovative economics and management, Innovations in pedagogy, Innovative approaches in jurisprudence, Innovative philosophical views

Requirements for articles

Articles should correspond to the thematic profile of the journal, meet international standards of scientific publications and be formalized in accordance with established rules. They should also be a presentation of the results of the original author's scientific research, be inscribed in the context of domestic and foreign research on this topic, reflect the author's ability to freely navigate in the existing bibliographic context on the problems involved and adequately apply the generally accepted methodology of setting and solving scientific problems.

All texts should be written in literary language, edited and conform to the scientific style of speech. Incorrect selection and unreliability of the facts, quotations, statistical and sociological data, names of own, geographical names and other information cited by the authors can cause the rejection of the submitted material (including at the registration stage).

All tables and figures in the article should be numbered, have headings and links in the text. If the data is borrowed from another source, a bibliographic reference should be given to it in the form of a note.

The title of the article, the full names of authors, educational institutions (except the main text language) should be presented in English.

Articles should be accompanied by an annotation and key words in the language of the main text and must be in English. The abstract should be made in the form of a short text that reveals the purpose and objectives of the work, its structure and main findings. The abstract is an independent analytical text and should give an adequate idea of the research conducted without the need to refer to the article. Abstract in English (Abstract) should be written in a competent academic language.

The presence of UDC, BBK

Acceptance of the material for consideration is not a guarantee of its publication. Registered articles are reviewed by the editorial staff and, when formally and in substance, the requirements of the journal are sent to peer review, including through an open discussion using the web resource www.sworld.education

Only previously unpublished materials can be posted in the journal.

Regulations on the ethics of publication of scientific data and its violations

The editors of the journal are aware of the fact that in the academic community there are quite widespread cases of violation of the ethics of the publication of scientific research. As the most notable and egregious, one can single out plagiarism, the posting of previously published materials, the misappropriation of the results of foreign scientific research, and falsification of data. We oppose such practices.

The editors are convinced that violations of copyrights and moral norms are not only ethically unacceptable, but also serve as a barrier to the development of scientific knowledge. Therefore, we believe that the fight against these phenomena should become the goal and the result of joint efforts of our authors, editors, reviewers, readers and the entire academic community. We encourage all stakeholders to cooperate and participate in the exchange of information in order to combat the violation of the ethics of publication of scientific research.

For its part, the editors are ready to make every effort to identify and suppress such unacceptable practices. We promise to take appropriate measures, as well as pay close attention to any information provided to us, which will indicate unethical behavior of one or another author.

Detection of ethical violations entails refusal to publish. If it is revealed that the article contains outright slander, violates the law or copyright rules, the editorial board considers itself obliged to remove it from the web resource and from the citation bases. Such extreme measures can be applied only with maximum openness and publicity.



Editorial board

- Averchenkov Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Bryansk State Technical University, Russia
- Angelova Polya Georgieva, Doctor of Economic Sciences, Professor, Economic Academy D. A. Tsenova, Svishitov, Bulgaria, Bulgaria
- Animica Evgenij Georgievich, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Ural State University of Economics, Russia
- Antonov Valerij Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Ukraine
- Antrapceva Nadezhda Mihajlovna, Doctor of Chemical Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine
- Ahmadiev Gabdulhat Malikovich, Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Kazan (Volga) Federal University, Russia
- Bazheva Rima Chamalovna, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Russia
- Batyrgeeveva Vladislava Stanislavovna, Doctor of Law, Research Institute for the Study of Crime Problems named after academician V. V. Stashisa NAPRN of Ukraine, Ukraine
- Bezdenzhenykh Tatyana Ivanovna, Doctor of Economic Sciences, Professor, St. Petersburg State University of Economics, Russia
- Blatov Igor Anatolevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Volga State University of Telecommunications and Informatics, Russia
- Burda Aleksey Grigorevich, Doctor of Economic Sciences, Professor, Kuban State Agrarian University, Russia
- Buharina Irina Leonidovna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Udmurt State University, Russia
- Bushueva Inna Vladimirovna, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, Zaporizhzhya State Medical University, Ukraine
- Bykov Yuriy Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Russia
- Velichko Stepan Petrovich, Doctor of Education, Professor, Kirovograd State Pedagogical University named after Vladimir Vinnichenko, Ukraine
- Vizir Vadim Anatolevich, Doctor of Medical Sciences, Professor, Zaporizhzhya State Medical University, Ukraine
- Vozhegova Raisa Anatolevna, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Irrigated Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Ukraine
- Volgrieva Galina Pavlovna, Candidate of Historical Sciences, assistant professor, Perm State University, Russia
- Voloh Dmitriy Stepanovich, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, A. A. National Medical University Pilgrim, Ukraine
- Vorozhitova Aleksandra Anatolevna, Doctor of Philology, Professor, Sochi State University, Russia
- Gavrilenko Nataliya Nikolaevna, Doctor of Education, assistant professor, Peoples' Friendship University of Russia, Russia
- Georgievskij Gennadiy Viktorovich, Doctor of Pharmaceutical Sciences, senior scientific employee, SE "Ukrainian Scientific Pharmacopoeia Center for the Quality of Medicines", Ukraine
- Getman Anatolij Pavlovich, Doctor of Law, Professor, National Law University named after Yaroslav the Wise, Ukraine
- Gilev Gennadiy Andreevich, Doctor of Education, Professor, Moscow State Industrial University, Russia
- Goncharuk Sergej Mironovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Russia
- Granovskaya Lyudmila Nikolaevna, Doctor of Economic Sciences, Professor, Kherson State Agrarian University, Ukraine
- Grzebneva Nadezhda Nikolaevna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Russia
- Grizdub Aleksandr Ivanovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, SE "Ukrainian Scientific Center for the Quality of Medicines", Ukraine
- Gricenko Svetlana Anatolevna, Doctor of Biological Sciences, assistant professor, Ural State Academy of Veterinary Medicine, Russia
- Gudzenko Aleksandr Pavlovich, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, Lugansk State Medical University, Ukraine
- Demidova V. G., candidate of pedagogical sciences, assistant professor, Ukraine
- Denisov Sergej Aleksandrovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Russia
- Dorofeev Andrej Viktorovich, Doctor of Education, assistant professor, Bashkir State University, Russia
- Dorohina Elena Yurevna, Doctor of Economic Sciences, assistant professor, G. V. Russian University of Economics Plekhanova, Russia
- Ermagambet Bolat Toleuhanovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Director of the Institute of Coal Chemistry and Technology LLP, Kazakhstan
- Zhovtonog Olga Igorevna, Doctor of Agricultural Sciences, Institute of Water Problems and Land Reclamation NAAS, Ukraine
- Zaharov Oleg Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Saratov State Technical University, Russia
- Zubkov Ruslan Sergeevich, Doctor of Economic Sciences, assistant professor, Nikolaev Interregional Institute for Human Development of the Higher Educational Institution "University of Ukraine", Ukraine
- Irzhi Hlahula, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, FLKR - T. Bati University, Zlin, Czech
- Kalajda Vladimir Timofeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tomsk State University, Russia
- Kalenik Tatyana Kuzminichna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Far Eastern Federal University, Russia
- Kantarovich Yu. L., Ph.D. in History of Arts, Odessa National Music Academy, Ukraine
- Kapitanov Vasilij Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Odessa National Maritime University, Ukraine
- Karpova Nataliya Konstantinovna, Doctor of Education, Professor, South Federal University, Russia
- Kafarskij Vladimir Ivanovich, Doctor of Law, Professor, Director of Science Center of Ukrainian Constitutionalism, Ukraine
- Kirilova Elena Viktorovna, Doctor of Technical Sciences, assistant professor, Odessa National Maritime University, Ukraine
- Kirichenko Aleksandr Anatolevich, Doctor of Law, Professor, Ukraine
- Klimova Natalya Vladimirovna, Doctor of Economic Sciences, Professor, Kuban State Agrarian University, Russia
- Knyazeva Olga Aleksandrovna, Doctor of Biological Sciences, assistant professor, Bashkir State Medical University, Russia
- Kovalenko Elena Mihajlovna, doctor of philosophical science, Professor, South Federal University, Russia
- Kovalenko Petr Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Water Problems and Land Reclamation of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Ukraine
- Kokebaeva Gulzhauhar Kakenovna, Doctor of Historical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan
- Kondratov Dmitriy Vyacheslavovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, assistant professor, Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, Russia
- Kopej Bogdan Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine
- Kosenko Nadezhda Fedorovna, Doctor of Technical Sciences, assistant professor, Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia
- Kostenko Vasilij Ivanovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Ukraine
- Kotlyarov Vladimir Vladislavovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Kuban State Agrarian University, Russia
- Kochinev Yuriy Yurevich, Doctor of Economic Sciences, assistant professor, St. Petersburg State Polytechnic University, Russia
- Kravchuk Anna Viktorovna, Doctor of Economic Sciences, Professor, Academy of the State Prison Service, Ukraine
- Kruglov Valerij Mihajlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Russia
- Kuderin Marat Krykbaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, PSU named after S. Toraygryova, Kazakhstan
- Kurmaev Petr Yurevich, Doctor of Economic Sciences, Professor, Uman State Pedagogical University named after Pavel Tychyna, Ukraine
- Kuhar Elena Vladimirovna, Doctor of Biological Sciences, assistant professor, Kazakh Agro Technical University S. Seifullina, Kazakhstan
- Lapkina Inna Aleksandrovna, Doctor of Economic Sciences, Professor, Odessa National Maritime University, Ukraine
- Latygina Natalya Anatolevna, Doctor of Political Science, Professor, Kiev National University of Trade and Economics, Ukraine
- Lebedev Anatolij Timofeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Stavropol State Agrarian University, Russia
- Lebedeva Larisa Aleksandrovna, candidate of psychological sciences, assistant professor, Mordovian State University, Russia
- Lipich Tamara Ivanovna, doctor of philosophical science, assistant professor, Belgorod State University, Russia
- Lomotko Denis Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Ukraine
- Lytkina Larisa Vladimirovna, Doctor of Philology, assistant professor, Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, Russia
- Lyalkina Galina Borisovna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnic University, Russia
- Majdanuyk Irina Zinovievna, doctor of philosophical science, assistant professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine
- Makarova Irina Viktorovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan (Volga) Federal University, Russia
- Maksim Viktor Ivanovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine
- Malahov A. V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Ukraine
- Malceva Anna Vasilievna, Doctor of Sociology, assistant professor, Altai State University, Russia
- Melnik Alyona Alekseevna, Doctor of Economic Sciences, assistant professor, Kiev National University of Technology and Design, Ukraine
- Milyaeva Larisa Grigorevna, Doctor of Economic Sciences, Professor, Biysk Technological Institute (branch) "Altai State Technical University named after I. I. Polzunova", head of the department of business economics, Russia
- Mishenina Tatyana Mihajlovna, Doctor of Education, Professor, Kryvyi Rih State Pedagogical University, Ukraine
- Mogilevskaya I. M., candidate of pedagogical sciences, Professor, Ukraine
- Moiseykina Lyudmila Guchaevna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Kalmyk State University, Russia
- Morozov Aleksey Vladimirovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Kherson State Agrarian University, Ukraine
- Morozova Tatyana Yurevna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, Russia
- Nefedeva Elena Eduardovna, Doctor of Biological Sciences, assistant professor, Volgograd State Technical University, Russia
- Nikolaeva Alla Dmitrievna, Doctor of Education, Professor, Northeast Federal University named after M. K. Ammosova, Russia
- Orlov Nikolaj Mihajlovich, Doctor of Science in Public Administration, assistant professor, Academy of Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Department of Operational Conquest of the BB, Ukraine
- Otepova Gulmira Elubayevna, Doctor of Historical Sciences, Professor, Pavlodar State Pedagogical Institute, Kazakhstan
- Pavlenko Anatolij Mihajlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Poltava National Technical University Yuri Kondratyuk, Ukraine
- Parunakyan Vaagn Emilevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Priazov State Technical University, Ukraine
- Patyka Nikolaj Vladimirovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, National Scientific Center "Institute of Agriculture of NAAS", Ukraine
- Pahomova Elena Anatolevna, Doctor of Economic Sciences, assistant professor, International University of Nature, Society, and Man "Dubna", Russia
- Pachurin German Vasilievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University R. E. Alekseeva, Russia
- Pershin Vladimir Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tambov State Technical University, Russia
- Piganov Mihail Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Queen, Russia
- Polyakov Andrej Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnitsa National Technical University, Ukraine
- Popov Viktor Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Saratov State Technical University, Russia
- Popova Taisiya Georgievna, Doctor of Philology, Professor, Peoples' Friendship University of Russia, Russia
- Rastrygina Alla Nikolaevna, Doctor of Education, Professor, Kirovograd State Pedagogical University named after Vladimir Vinnichenko, I. Shevchenko, Kropyvnytskyi, Ukraine
- Rebezov Maksim Borisovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Russia
- Reznikov Andrej Valentinovich, Doctor of Economic Sciences, assistant professor, Moscow State Technological University "Stankin", Russia
- Rokochinskij Anatolij Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Water Resources and Environmental Management, Ukraine
- Romashenko Mihail Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Water Problems and Land Reclamation of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Ukraine
- Rylov Sergej Ivanovich, PhD in Economics, Professor, Odessa National Maritime University, Ukraine
- Saveleva Nelli Aleksandrovna, Doctor of Economic Sciences, Professor, Sochi State University, Russia
- Safarov Artur Mahmudovich, Doctor of Philology, Senior Lecturer, Russia
- Svetlov Viktor Aleksandrovich, doctor of philosophical science, Professor, Petersburg State University of Railway Engineering, Russia
- Semencov Georgij Nikiforovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine
- Sentyabrev Nikolaj Nikolaevich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Volgograd State Academy of Physical Culture, Russia
- Sidorovich Marina Mihajlovna, Doctor of Education, Professor, Kherson State University, Ukraine
- Sirota Naum Mihajlovich, Doctor of Political Science, Professor, State University of Aerospace Instrumentation, Russia
- Smirnov Evgenij Ivanovich, Doctor of Education, Professor, Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, Russia
- Sokolova Nadezhda Gennadevna, Doctor of Economic Sciences, assistant professor, Sokolov State Technical University, Russia
- Starodubcev Vladimir Mihajlovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine
- Stegny Vasilij Nikolaevich, Doctor of Sociology, Professor, Perm National Research Polytechnic University, Russia
- Stepenko Valerij Efremovich, Doctor of Law, assistant professor, Pacific State University, Russia
- Stoycep Oleksandr Vasilovich, Doctor of Philosophy, assistant professor, Odessa National Maritime University, Ukraine
- Stoycep Vasil Grigorievich, Candidate of Philology, assistant professor, Odessa National Maritime University, Ukraine
- Strelcova Elena Dmitrievna, Doctor of Economic Sciences, assistant professor, South Russian State Technical University (NPI), Russia
- Suhenko Yuriy Grigorevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine



- Suhova Mariya Gennadevna, Doctor of Geographical Sciences, assistant professor, Gorno-Altai State University, Russia
- Tarariko Yuriy Aleksandrovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Ukraine
- Tarasenko Larisa Viktorovna, Doctor of Sociology, Professor, South Federal University, Russia
- Testov Boris Viktorovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Tobolsk Integrated Scientific Station, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Tobolsk, Russia
- Tokareva Natalya Gennadevna, Candidate of Medical Sciences, assistant professor, Medical Institute FSBEI HE "Moscow State University named after NP Ogarev, Russia
- Tolbatov Andrej Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Sumy National Agrarian University, Ukraine
- Tonkov Evgenij Evgenievich, Doctor of Law, Professor, Law Institute of the National Research University Belgorod State University, Russia
- Trigub Petr Nikitovich, Doctor of Historical Sciences, Professor, Ukraine
- Tungushbaeva Zina Bajbagusovna, Doctor of Biological Sciences, Kazakh National Pedagogical University named after Abay, Kazakhstan
- Ustenko Sergej Anatolevich, Doctor of Technical Sciences, assistant professor, Nikolaev State University named after V O Sukhomlinsky, Ukraine
- Fateeva Nadezhda Mihajlovna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Tyumen State University, Russia
- Fathova Alevtina Leontevna, Doctor of Education, assistant professor, Bashkir State University (Sterlitamak branch), Russia
- Fedorishin Dmitriy Dmitrovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine
- Fedotova Galina Aleksandrovna, Doctor of Education, Professor, Novgorod State University, Russia
- Fedyanina Lyudmila Nikolaevna, Doctor of Medical Sciences, Professor, Far Eastern Federal University, Russia
- Habibullin Rifat Gabdulhakovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan (Volga) Federal University, Russia
- Hodakova Nina Pavlovna, Doctor of Education, assistant professor, Moscow City Pedagogical University, Russia
- Hrebina Svetlana Vladimirovna, Doctor of Psychology, Professor, Pyatigorsk State Linguistic University, Russia
- Chervonyi Ivan Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Ukraine
- Chigrinskaya Natalya Vyacheslavovna, Doctor of Education, Professor, Volgograd State Technical University, Russia
- Churekova Tatyana Mihajlovna, Doctor of Education, Professor, Russia
- Shajko-Shajkovskij Aleksandr Gennadevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernivtsi National University Y Fedkovich, Ukraine
- Shapovalov Valentin Valerevich, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, Kharkov Medical Academy of Postgraduate Education, Ukraine
- Shapovalov Valerij Vladimirovich, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, Kharkiv Regional State Administration, Ukraine
- Shapovalova Viktoriya Alekseevna, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, Kharkov Medical Academy of Postgraduate Education, Ukraine
- Sharagov Vasilij Andreevich, Doctor of Chemical Sciences, assistant professor, Balti State University "Alecu Russo", Moldova
- Shevchenko Larisa Vasilievna, Doctor of Veterinary Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine
- Shepitko Valerij Yurevich, Doctor of Law, Professor, National Law University named after Yaroslav the Wise, Ukraine
- Shibaev Aleksandr Grigorevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Odessa National Maritime University, Ukraine
- Shishka Roman Bogdanovich, Doctor of Law, Professor, National Aviation University, Ukraine
- Sherban Igor Vasilevich, Doctor of Technical Sciences, assistant professor, Russia
- Elezovich M Dalibor, Doctor of Historical Sciences, assistant professor, Pristina University K Mitrovica, Serbia
- Yarovenko Vasilij Vasilevich, Doctor of Law, Professor, Admiral G I Maritime State University Nevelsky, Russia
- Yacenko Aleksandr Vladimirovich, Professor, Institute of Maritime Economics and Entrepreneurship, Scientific Research Design Institute of the Marine Fleet of Ukraine, Ukraine
- Evstropov Vladimir Mikhailovich, Doctor of Medical Sciences, Professor, Russian Customs Academy, Russia
- Kononova Alexandra Evgenievna, PhD in Economics, docent, Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Ukraine
- Svitlana Titova, PhD in Geography, docent, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
- Tatarchuk Tetiana, PhD in technical sciences, NU "Zaporizhzhya Polytechnic", Ukraine
- Chupakhina Svitlana Vasyliivna, PhD in pedagogical sciences, docent, Vasyly Stefanyk Precarpathian National University, Ukraine
- Boiko Ruslan Vasiliovich, PhD in Economics, docent, Khmelnytsky National University, Ukraine
- Voropayeva Tetiana Sergiivna, PhD in Psychology, docent, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
- Zakharenko Natalia, PhD in Economics, Priazov State Technical University, Ukraine
- Kirkin Oleksandr Pavlovich, PhD in technical sciences, docent, Priazov State Technical University, Ukraine
- Kyianovskiy Aleksandr Moiseevich, PhD in Chemistry, docent, Kherson State Agrarian University, Ukraine
- Tharkahova Irina Grigorevna, PhD in Economics, docent, Adyge State University, Russia
- Vitroviy Andriy Orestovych, PhD in technical sciences, docent, Ternopil National Economic University, Ukraine
- Khodakivska Olga, Doctor of Economic Sciences, senior research assistant, National Research Center "Institute of Agrarian Economics", Ukraine
- Shatkovskiy Andrii, Doctor of Agricultural Sciences, Institute of Water Problems and Melioration of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Ukraine
- Katerynychuk Ivan Stepanovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Academy of the State Border Service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytsky, Ukraine
- Goncharenko Igor Vladimirovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, Ukraine
- Gornostaj Oryslava Bogdanivna, PhD in technical sciences, docent, Lviv State University of Life Safety, Ukraine
- Stanislavchuk Oksana Volodymyrivna, PhD in technical sciences, docent, Lviv State University of Life Safety, Ukraine
- Mirus Oleksandr-Zenovij Lvovich, PhD in Chemistry, docent, Lviv State University of Life Safety, Ukraine
- Nashynets-Naumova Anfisa, Doctor of Law, docent, Boris Grinchenko Kyiv University, Ukraine
- Kyselov Iurii Olexandrovych, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Uman National University of Horticulture, Ukraine
- Smutchak Zinaida Vasyliivna, Doctor of Economic Sciences, docent, Flight Academy of the National Aviation University, Ukraine
- Polenova Galina Tikhonovna, Doctor of Philology, Professor, Rostov-on-Don State University of Economics, Russia
- Makeeva Vera Stepanovna, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Russian State University of Physical Culture, Sports, Youth and Tourism, Russia
- Bunchuk Oksana, Doctor of Law, docent, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Ukraine
- Gladukh Ievgenii, Doctor of Pharmacy, Professor, National University of Pharmacy, Ukraine
- Benera Valentuna, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Taras Shevchenko Regional Humanitarian-Pedagogical Academy of Kremenes, Ukraine
- Demyanenko Natalia, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Taras Shevchenko Regional Humanitarian-Pedagogical Academy of Kremenes, Ukraine
- Makarenko Andriy Viktorovich, PhD in pedagogical sciences, docent, Donbass State Pedagogical University, Ukraine
- Kharkovliuk-Balakina Natalia, PhD in biological sciences, docent, State Institution "Institute of Gerontology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Ukraine
- Chushenko Valentina Mykolayivna, PhD in pharmaceutical sciences, docent, National Pharmaceutical University, Ukraine
- Malinina Nina Lvovna, doctor of philosophical science, docent, Far Eastern Federal University, Russia
- Brukhansky Ruslan Feoktistovich, Doctor of Economic Sciences, Professor, Western Ukrainian National University, Ukraine
- Zastavetska Lesya Bogdanovna, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Ternopil National Pedagogical University named after V Gnatyuk, Ukraine
- Kalabaska Vira Stepanivna, PhD in pedagogical sciences, docent, Uman State Pedagogical University named after Pavel Tychina, Ukraine
- Kutishchev Stanislav Nikolaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, VSTU, Russia
- Pikas Olha Bohdanivna, Doctor of Medical Sciences, Professor, National Medical University named after A A Bogomolets, Ukraine
- Shepel Yuri Alexandrovich, Doctor of Philology, Professor, Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine
- Kuris Yuri Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Zaporizhzhya National University, Ukraine
- Kalinichenko Irina Alexandrovna, Doctor of Medical Sciences, Professor, Sumy State Pedagogical University named after A S Makarenko, Ukraine
- Kagermazova Laura Tsraevna, Doctor of Psychology, Professor, Chechen State Pedagogical Institute, Russia
- Kravchenko Olena Ivanivna, Doctor of Pedagogical Sciences, assistant professor, Luhansk National Taras Shevchenko University, Ukraine
- Redkous Vladimir Mikhailovich, Doctor of Law, Professor, Institute of State and Law of the Russian Academy of Sciences, Russia
- Evstropov Vladimir Mikhailovich, Doctor of Medical Sciences, Professor, Russian Customs Academy, Russia
- Kononova Alexandra Evgenievna, PhD in Economics Sciences, assistant professor, Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Ukraine
- Svitlana Titova, PhD in Geography, assistant professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
- Tatarchuk Tetiana, PhD in Technical Sciences, Zaporizhzhya Polytechnic, Ukraine
- Chupakhina Svitlana Vasyliivna, PhD in Pedagogical Sciences, assistant professor, Vasyly Stefanyk Precarpathian National University, Ukraine
- Boiko Ruslan Vasiliovich, PhD in Economic Sciences, assistant professor, Khmelnytsky National University, Ukraine
- Voropayeva Tetiana Sergiivna, PhD in Psychology, assistant professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
- Kirkin Oleksandr Pavlovich, PhD in Technical Sciences, assistant professor, Priazovskiy State Technical University, Ukraine
- Kyianovskiy Aleksandr Moiseevich, PhD in Chemistry, assistant professor, Kherson State Agrarian University, Ukraine
- Tharkahova Irina Grigorevna, PhD in Economic Sciences, assistant professor, Adyge State University, Russia
- Vitroviy Andriy Orestovych, PhD in Technical Sciences, assistant professor, Ternopil National Economic University, Ukraine
- Khodakivska Olga, Doctor of Economic Sciences, senior researcher, National Research Center "Institute of Agrarian Economics", Ukraine
- Shatkovskiy Andrii, Doctor of Agricultural Sciences, Institute of Water Problems and Land Reclamation of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Ukraine
- Katerynychuk Ivan Stepanovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Academy of the State Border Service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytsky, Ukraine
- Goncharenko Igor Vladimirovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, Ukraine
- Gornostaj Oryslava Bogdanivna, PhD in Technical Sciences, assistant professor, Lviv State University of Life Safety, Ukraine
- Stanislavchuk Oksana Volodymyrivna, PhD in Technical Sciences, assistant professor, Lviv State University of Life Safety, Ukraine
- Mirus Oleksandr-Zenovij Lvovich, PhD in Chemistry, assistant professor, Lviv State University of Life Safety, Ukraine
- Belotserkovets Vladimir Viktorovich, Doctor of Economic Sciences, Professor, National Metallurgical Academy of Ukraine, Ukraine
- Lopuch Piotr Stepanovych, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Belarusian State University, Belarus
- Shvets Iryna Borysovna, Doctor of Arts, Professor, Vinnytsia State Pedagogical University named after M Kotsyubinsky, Ukraine
- Morozov Oleg Viktorovich, Doctor of Historical Sciences, assistant professor, University of Customs and Finance, Ukraine
- Vykhreshch Vira Olexandrivna, Doctor of Pedagogy, professor, National University "Lviv Polytechnic", Ukraine
- Okhrimenko Viacheslav Mykolaiovich, PhD in Technical Sciences, assistant professor, Kharkiv National University of Municipal Economy named after A M Beketova, Ukraine
- Podchashynskiy Yurii Oleksandrovych, Doctor of Technical Sciences, professor, Zhytomyr Polytechnic, Ukraine
- Bilavych Halyna Vasyliivna, Doctor of Pedagogy, professor, Vasyly Stefanyk Precarpathian National University, Ukraine
- Hurin Ruslan Serghiyovych, PhD in Pedagogical Sciences, assistant professor, South Ukrainian National Pedagogical University named after K D Ushinsky, Ukraine
- Sukhomlinov Anatolii Ivanovich, PhD in Technical Sciences, assistant professor, Far Eastern Federal University, Russia
- Popova Julia Mikhailivna, Doctor of Economic Sciences, assistant professor, Poltava State Agrarian University, Ukraine
- Kononenko Mykhailo Mykhaylovych, PhD in Public Administration, assistant professor, Poltava raionna glad, Ukraine
- Muliar Volodymyr Ilyich, Doctor of Philosophical Science, Professor, Zhytomyr Polytechnic, Ukraine
- Yefimova Olha Mykolajivna, PhD in Pedagogical Sciences, Senior Lecturer, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
- Khymai Natalia Ihorivna, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
- Zarivna Oksana Tymofiyivna, PhD in Pedagogical Sciences, assistant professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
- Shalova Natalia Stanislavivna, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
- Mitina Lubov Sergiivna, PhD in Philology, assistant professor, Kharkiv State Academy of Culture, Ukraine
- Suima Irina Pavlivna, PhD in Philology, Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine



УДК [662.749.2+662.749.3]:004.942-026.56

THE NUMERICAL SIMULATION OF THERMO-ELASTO-PLASTIC
STATE OF COMPOSITESЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОПРУЖНОПЛАСТИЧНОГО
СТАНУ КОМПОЗИТИВ

Karvatskii A. Ya. / Карвацький А. Я.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0003-2421-4700

Mikulionok I. O. / Мікульонюк І. О.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0001-8268-7229

Leleka S. V. / Лелека С. В.

c.t.s., assist. / к.т.н., асист.

ORCID: 0000-0002-4372-9454

Vytvytskyi V. M. / Витвицький В. М.

PhD, assist. / д-р філософ., асист.

ORCID: 0000-0003-0184-3838

Solovei V. V. / Соловей В. В.

graduate student/ аспірант

ORCID: 0000-0002-5638-2701

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Kyiv, Peremohy ave, 37, 03056

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», Київ, просп. Перемоги, 37, 03056

Abstract. Tools in the form of methodology and software for the numerical study of the thermo-elasto-plastic state of coke-pitch composites using the example of isostatic graphite production technology have been developed. A closed mathematical formulation and a method for numerically solving an elasto-plastic problem with isotropic hardening based on an implicit inverse mapping algorithm are considered. Using the finite element method, the corresponding program code was developed and verified. A comparison of the results with the data of numerical analysis obtained using the ANSYS Mechanical APDL software product shows that, with isotropic hardening, the maximum discrepancy does not exceed 1.13 %, and for ideal plasticity it is no more than 3.58 %. The calculations of the thermo-elasto-plastic behavior of the coke-pitch composite in the technological stage of the production of isostatic graphite blanks are performed. It is shown that in the case of non-compliance with the temperature regimes at the initial stages of roasting, plastic deformations occur in the isostatic graphite blanks, which lead to cracking and deterioration of the uniformity of the physical properties of the finished products.

Key words: composite material, elastoplasticity, numerical analysis, implicit algorithm, isostatic graphite.

1 Introduction.

One of the composite materials with properties close to isotropic can include coke-pitch mixtures, which are the basis for the production of isostatic graphite (IG) [1, 2]. The composition of these mixtures includes pitch (matrix) and fine (30– μm) or fine-grained (10–30 μm) filler – coke [3, 4]. Owing to the uniqueness of the physicochemical properties, isostatic graphite has been extremely widely used in various fields of science and technology: from metallurgy and mechanical engineering to atomic and renewable energy [5, 6]. The technological cycle of



industrial production of isostatic graphite is divided into the following stages: the first stage is the selection, preparation of raw materials, the preparation of a coke-pitch mixture (composite), as well as the isostatic pressing of “green” blanks, the second stage is the burning of blanks and the third is graphitization [4, 6]. The plastic properties of the composite material for the production of isostatic graphite are shown at the stages of pressing and burning [4, 7].

2 Literature Review.

Available literature does not contain information on the results of modeling the elastic-plastic behavior of coke-pitch composites at the stages of the production of isostatic graphite blanks, and the mechanical properties are mainly given in the certificates of manufacturers and only for the finished product, which may be associated with the high commercial potential of this technology [8].

In [7, 9], on the basis of well-known analytical solutions for the normal components of the thermal stress tensor in a cylindrical body, the limiting radial temperature differences in composite graphite billets were estimated at the burning stage.

One of the first significant works devoted to implicit algorithms for solving elastoplastic problems is an article by Simo J. C. and Taylor R. L. [10], which introduced such important concepts as sequential tangential operators and the inverse mapping algorithm. It is shown that for the case independent of the speed of the elastoplastic behavior of the material, the so-called inverse mapping algorithms ensure that the quadratic velocity of the asymptotic convergence of the schemes of iterative solutions based on the Newton method is preserved. In this work, examples of numerical solution of problems with isotropic and kinematic hardening for the associative flow law are given, as well as a problem with the non-associative Drucker-Prager flow law.

The theoretical foundations for solving a wide class of elastoplastic problems using various modifications of the inverse mapping algorithm are most fully described in [11, 12].

The paper [13] presents a mathematical formulation of the problem of the elastic-plastic state of bulk material based on the classical Drucker-Prager model. Using the inverse mapping algorithm, numerical experiments were carried out using an example of a material characterized by an associative flow law for various values of the angle of repose.

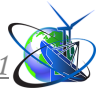
In the considered works [10–13], there are no closed formulations of the problems of thermo-elastic plasticity of composite materials and examples of their numerical implementation that could be directly applied to improve the technology for producing isostatic graphite.

In connection with the foregoing, this work is aimed at developing tools for the numerical study of the elastoplastic state of coke-pitch composites using isostatic graphite technology.

3 Research Methodology.

3.1 Mathematical statement of the problem.

In connection with the foregoing, this work is aimed at developing tools for the numerical study of the elastoplastic state of coke-pitch composites using isostatic



graphite technology According to the incremental theory of plasticity, the mathematical model of the isotropic material independent of the speed of the elastoplastic behavior of the isotropic material includes the equilibrium equation, the generalized Hooke's law, and the geometric equation written through increments of physical quantities [11–13]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \dot{\hat{\sigma}} + \rho \dot{\mathbf{b}} = 0; \\ \dot{\hat{\sigma}} = \frac{E}{1+\nu} \left(\dot{\hat{\varepsilon}} + \frac{\nu}{1-2\nu} \text{tr}(\dot{\hat{\varepsilon}}) \hat{\mathbf{I}} \right) - \dot{\hat{\sigma}}^0; \\ \dot{\hat{\varepsilon}} = \frac{1}{2} (\nabla \dot{\mathbf{u}} + \dot{\mathbf{u}} \nabla) = \dot{\hat{\varepsilon}}^{el} + \dot{\hat{\varepsilon}}^{pl}, \end{cases} \quad (1)$$

where ∇ is the Hamilton's operator, m^{-1} ; $\dot{\hat{\sigma}}$ is symmetric stress increment tensor of the second rank, Pa; ρ is density, kg/m^3 ; $\dot{\mathbf{b}}$ is vector increment of mass forces, N/kg ; E is modulus of elasticity under uniaxial tension (compression), Pa; ν is Poisson's ratio; $\dot{\hat{\varepsilon}}$ is symmetric increment tensor of the total deformations of the second rank; $\hat{\mathbf{I}}$ is unit tensor of the second rank; $\text{tr}(\)$ is tensor trace operator; $\dot{\hat{\sigma}}^0$ is increment tensor of initial stresses, Pa; $\dot{\hat{\varepsilon}}^{el}, \dot{\hat{\varepsilon}}^{pl}$ are the elastic and plastic components of the tensor of the increment of total deformations $\dot{\hat{\varepsilon}}$, respectively; $\dot{\mathbf{u}}$ is the displacement increment vector, m (the $\wedge$ sign above the tensor without a digit means it belongs to the second rank).

In the case of isotropic hardening, the material yield condition takes the following form [11, 12]

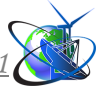
$$F(\dot{\hat{\sigma}}, \varepsilon_{eq}^{pl}) = \sigma_{eq} - \sigma_y(\varepsilon_{eq}^{pl}), \quad (2)$$

where F is the function of the surface fluidity of the material; $\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \hat{\mathbf{s}} : \hat{\mathbf{s}}}$ is Mises equivalent voltage, Pa; $\hat{\mathbf{s}} = \dot{\hat{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr}(\dot{\hat{\sigma}}) \hat{\mathbf{I}}$ is tensor of deviatoric stresses of the second rank, Pa; $\sigma_y(\varepsilon_{eq}^{pl}) = \sigma_{y0} + h \varepsilon_{eq}^{pl}$ is yield point of the material, taking into account isotropic hardening according to the linear law, Pa; $\varepsilon_{eq}^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3} \hat{\mathbf{e}}^{pl} : \hat{\mathbf{e}}^{pl}}$ is Mises equivalent plastic deformation; $\hat{\mathbf{e}}^{pl} = \dot{\hat{\varepsilon}}^{pl} - \frac{1}{3} \text{tr}(\dot{\hat{\varepsilon}}^{pl}) \hat{\mathbf{I}}$ is tensor of deviator plastic deformations of the second rank; σ_{y0} is the initial value of the yield strength of the material, Pa; h is hardening module, Pa; $(:)$ is the operator of double scalar multiplication.

The initial conditions for (1) and (2)

$$\dot{\hat{\sigma}}^0 = 0. \quad (3)$$

The boundary conditions for (1) and (2):



– displacement vector

$$\mathbf{u}|_{S_u} = 0, \quad (4)$$

where S_u is the surface (or surface point) on which the components of displacement are specified, m^2 ;

– symmetry

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}|_{S_{su}} = 0, \quad (5)$$

where $\mathbf{n}$ is the vector of the external normal to the surface of the body; S_{su} is surface symmetry of the body, m^2 ;

– external pressure

$$(\hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}|_{S_p} = p, \quad (6)$$

where p is the external pressure set on the surface of the body S_p , Pa.

3.2 Methodology of numerical solution.

Consider the theoretical foundations of the implicit Return-Mapping Algorithms [11, 12] using the example of solving the problem of the elastic-plastic behavior of an isotropic material. Elastic stresses in the case of the occurrence of elastoplastic deformations in the material taking into account the temperature load are determined by the equation

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \hat{\mathbf{C}} : (\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{tr} - \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} - \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_T), \quad (7)$$

where $\hat{\mathbf{C}}$ is the fourth-rank tensor of the elastic constants of the material, Pa; $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{tr}$ is tensor of test (full) deformations of the second rank, which is determined in the approximation of an elastic medium; $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} = \sum_{i=1}^N (\Delta \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl})_i$ is tensor of plastic deformations of the second rank; $\Delta \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}$ is increment of plastic deformation at the i -th step of loading; N is the number of loading steps; $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_T = \beta(T - T_{ref})\mathbf{I}$ is temperature strain tensor; β is coefficient of linear thermal expansion (CLThE), K^{-1} ; T, T_{ref} are the current absolute temperature and the absolute reference temperature, respectively, K.

Under the associative law of plastic flow, the increment of plastic deformations is determined by the relation

$$\Delta \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} = \Delta \lambda \hat{\mathbf{m}}, \quad (8)$$

where $\Delta \lambda$ is the scalar associative factor (plasticity coefficient), which is determined by the formula

$$\Delta \lambda = \frac{\hat{\mathbf{m}} : \hat{\mathbf{C}} : \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{tr}}{\hat{\mathbf{m}} : \hat{\mathbf{C}} : \hat{\mathbf{m}}^T + h}, \quad (9)$$



where $\hat{\mathbf{m}} = \frac{\partial F}{\partial \hat{\boldsymbol{\sigma}}} = \frac{3}{2} \frac{\hat{\mathbf{s}}}{\sqrt{\frac{3}{2} \hat{\mathbf{s}} : \hat{\mathbf{s}}}}$ is the derivative of the plasticity function (2) with respect

to the stress tensor.

Using the inverse Euler method, equation (7), taking into account (8) and (9) for $k+1$ the loading step, can be easily transformed to

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1} = \hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr} - \Delta\lambda^{k+1} \hat{\mathbf{C}} : \hat{\mathbf{m}}(\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1}), \quad (10)$$

where $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1}$ is the elastic stress tensor at the loading step, Pa; $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr} = \hat{\mathbf{C}} : \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{tr}$ is test stress tensor determined in the approximation of an elastic body, Pa; $\hat{\mathbf{C}} : \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} = \Delta\lambda^{k+1} \hat{\mathbf{C}} : \hat{\mathbf{m}}(\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1})$ is initial stresses caused by the plastic flow of material, Pa.

Formula (10) describes the mapping of the test stress tensor in the direction of the yield surface F . Therefore, this method of solving the elastic-plasticity problem is called the inverse mapping algorithm [11].

System of equations (10), taking into account the symmetry of the stress tensor, has seven unknowns, i.e. six independent components $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr}$ and plasticity coefficient $\Delta\lambda$. In this regard, to close the system of equations (10), it is necessary to supplement it with a scalar equation (2) of the form

$$F(\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1}, \Delta\lambda) = 0. \quad (11)$$

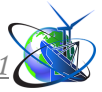
Equation (11) ensures the fulfillment of the yield condition at the end of each k -th stage of loading.

To apply the Newton method, the nonlinear system of equations (10), (11) must be rewritten in the residual format (12). Moreover, to represent the tensors $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1}$, $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr}$ and $\hat{\mathbf{m}}$ in the form of vectors, it is necessary to make the transition to six-dimensional space, taking into account their symmetry. This makes it possible to replace tensors of the second rank $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1}$, $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr}$ and $\hat{\mathbf{m}}$ with the corresponding vectors $\boldsymbol{\sigma}^{k+1}$, $\boldsymbol{\sigma}^{tr}$ and $\mathbf{m}$ with six components, and instead of using the tensor of the fourth rank $\hat{\mathbf{C}}$, use the tensor of the second rank of elastic constants $\hat{\mathbf{D}}^{el}$ of dimension six:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma}^{k+1} - \boldsymbol{\sigma}^{tr} + \Delta\lambda^{k+1} \hat{\mathbf{D}}^{el} \cdot \mathbf{m}(\boldsymbol{\sigma}^{k+1}); \\ r_F = F(\boldsymbol{\sigma}^{k+1}, \Delta\lambda^{k+1}). \end{cases} \quad (12)$$

To solve the system of nonlinear equations (12), Newton's method (13) or linearization by Newton's method (14) are used, the iterative procedures of which are respectively written as follows:

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{j+1}^{k+1} \\ \Delta\lambda_{j+1}^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_j^{k+1} \\ \Delta\lambda_j^{k+1} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{r}_{\boldsymbol{\sigma}}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} & \frac{\partial \mathbf{r}_{\boldsymbol{\sigma}}}{\partial \Delta\lambda} \\ \frac{\partial r_F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} & \frac{\partial r_F}{\partial \Delta\lambda} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{r}_{\boldsymbol{\sigma}}^j \\ \mathbf{r}_F^j \end{pmatrix}, \quad (13)$$



or

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{r}_\sigma}{\partial \boldsymbol{\sigma}} & \frac{\partial \mathbf{r}_\sigma}{\partial \Delta \lambda} \\ \frac{\partial r_F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} & \frac{\partial r_F}{\partial \Delta \lambda} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta \boldsymbol{\sigma}_j^{k+1} \\ \delta \Delta \lambda_j^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_\sigma^j \\ r_F^j \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{j+1}^{k+1} \\ \Delta \lambda_{j+1}^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_j^{k+1} \\ \Delta \lambda_j^{k+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta \boldsymbol{\sigma}_j^{k+1} \\ \delta \Delta \lambda_j^{k+1} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

where $\frac{\partial \mathbf{r}_\sigma}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{I} + \Delta \lambda_j^{k+1} \hat{\mathbf{D}}^{el} \cdot \frac{\partial \mathbf{m}(\boldsymbol{\sigma}_j^{k+1})}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$; $\mathbf{I}$ is unit tensor of the second rank;

$\frac{\partial \mathbf{r}_\sigma}{\partial \Delta \lambda} = \hat{\mathbf{D}}^{el} \cdot \mathbf{m}(\boldsymbol{\sigma}_j^{k+1})$; $\frac{\partial r_F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{m}^T(\boldsymbol{\sigma}_j^{k+1})$; $\frac{\partial r_F}{\partial \Delta \lambda} = -h$. Here, the index k refers to the loading step, and the index j refers to the number of iterations according to Newton's method.

The use of linearization of a system of equations of the form (14) and its solution by the Gaussian elimination method instead of inverting the matrix in (13) using a unit matrix ($\mathbf{A}\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{E}$) allows significantly reducing the number of arithmetic operations at each iteration step by approximately $2n(n-1)^2$, where n is the dimension of the system of equations.

For $k=1$, the usual elastic problem with respect to complete displacements under the boundary conditions (4) – (6) is solved and the tensor of test stresses is determined. Further, in the part of the body in the elastoplastic state, tensors of the increment of plastic deformations and elastic stresses are determined from solution (14) and the initial stresses are found by the formula

$$\boldsymbol{\sigma}^{0(k)} = \Delta \lambda^{(k)} \hat{\mathbf{D}}^{el} \cdot \mathbf{m}^{(k)}. \quad (15)$$

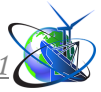
The following integration steps (1), (2) for $k > 1$ are performed only with a load with initial stresses (15), (16) under boundary conditions (4), i.e. without taking into account external and internal load. In this case, the elastic problem is also solved and the vector of increment of displacements $\Delta \mathbf{u}^k$ is determined and the components of the vector of full displacements are determined, according to which new values of the components of the test stress tensor are found. Then, from solution (14), new values of the components of the tensors of the increment of plastic strains and elastic stresses are determined for the part of the body in the elastoplastic state. Next, to perform the next loading step, we find the tensor of the increment of initial stresses according to the formula

$$\boldsymbol{\sigma}^{0(k)} = \Delta \lambda^k \hat{\mathbf{D}}^{el} \cdot \mathbf{m}^k - \boldsymbol{\sigma}^{0(k-1)}. \quad (16)$$

The plastic strain tensor is determined by the formula

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{pl(k)} = \boldsymbol{\varepsilon}^{pl(k-1)} + \Delta \lambda^k \mathbf{m}^k.$$

The criterion for the completion of calculations may be the fulfillment of one of the conditions



$$|\Delta \mathbf{u}^k| \leq \delta_u \text{ or } |\varepsilon_{eq}^{pl(k)}| \leq \delta_\varepsilon.$$

To apply the described methodology to the problems of the elastoplastic state of isotropic composite materials, it is necessary to determine their effective physical and mechanical properties. For this, one can either use the additive relations [14] using the known properties of the constituents (matrix and filler) of the composite, or experimentally determined effective values of these properties [7].

Additive relations Voight [14] have the general form

$$P_{\text{comp}} = P_f V_f + P_m V_m,$$

where V_f , V_m are the volume fractions of the filler and matrix, respectively; indices comp, f, m relate to the composite, filler and matrix, respectively; P is one of the physical properties of the composite, filler and matrix, respectively.

When solving the unbound thermo-elastic-plastic problem (7), which takes place in IG technology, to determine the temperature field, it is necessary either to solve the non-stationary (stationary) heat conduction problem with the corresponding initial and boundary conditions [15], or to set the known temperature field in advance.

3.3 Methodology of numerical solution.

For the numerical implementation of the above algorithm, the finite element method (FEM) was used [10–13] and the Mathcad programming environment [16]. To build the geometry and tetrahedron mesh of the model, a free open source code is used – a CAD system for grid generation Gmsh [17]. To visualize the results of calculations of physical fields, the freely open software code ParaView was used [18]. Testing of the developed program code for solving the problem of elastic-plasticity with isotropic hardening was performed using an example of a material with the mechanical properties of carbon steel.

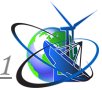
To fulfill the conditions on the yield surface (12) with an accuracy of 10^{-6} in each plastic finite element (FE), iterations must be performed 6 times, and to achieve an accuracy of 0.1% in determining the components of the displacement vector, 10–15 loading steps are required initial stresses when solving the global system of discrete FEM equations.

Test.

The problem of elasticity taking into account the isotropic hardening of a thick-walled cylinder with radii $r_1/r_2 = 0,05/0,08$ m. Material is steel ($E = 2 \cdot 10^{11}$ Pa, $\nu = 0,3$, $\sigma_{y0} = 320$ MPa, $h = 1.5$ GPa). The pressure on the inner wall of the cylinder is $p = 150$ MPa.

The grid convergence of the solution to the problem was determined by the double recount method. As a result, it was found that the computational grid of the test problem, consisting of 2041 linear tetrahedral FEs and 743 nodes, leads to an error in the determination σ_{eq} of not more than 0.5%.

The results of a numerical solution of the elasto-plastic problem for cases of isotropic hardening and ideal plasticity and their comparison with data obtained using the ANSYS Mechanical APDL software product [19] are given in Table 1 and 2.

**Table 1**

Results of a comparison of solutions to the plasticity problem taking into account isotropic hardening.

Type of Solution	u_s , m	σ_{eq} , MPa	ε_{eq}^{el}	ε_{eq}^{pl}
ANSYS, nodes 774, FEs – 2209	$8,61 \cdot 10^{-5}$ – 0,000112	213–322	0,001064– 0,001608	0–0,001217
Mathcad, nodes 743, FEs – 2041	$8,675 \cdot 10^{-5}$ – 0,00011204	215,3– 321,83	0,001076– 0,001607	0–0,001218
Error, %	0,75–0,038	1,08– 0,053	1,13–0,06	0–0,08

Author's development

Note: $u_s = |\mathbf{u}|$ is displacement vector module; σ_{eq} is Mises equivalent stresses; ε_{eq}^{el} and ε_{eq}^{pl} are equivalent Mises elastic and plastic deformations, respectively.

Table 2

The results of a comparison of the solutions of the plasticity problem for ideal plasticity.

Type of Solution	u_s , m	σ_{eq} , MPa	ε_{eq}^{el}	ε_{eq}^{pl}
ANSYS, nodes 774, FEs – 2209	$8,62 \cdot 10^{-5}$ – 0,000113	213–320	0,001066– 0,0016	0–0,001128
Mathcad, nodes 743, FEs – 2041	$8,615 \cdot 10^{-5}$ – 0,0001111	212,8–320	0,001068– 0,00162	0– 0,00115825
Error, %	0,058–1,68	0,094–0	0,84–1,25	0–3,58

Author's development

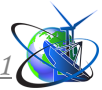
The results of numerical modeling of physical fields in solving the test problem of elasticity using the developed software code confirm the possibility of its practical application.

4 Results.

The following are the results of a numerical analysis of the elastic-plasticity of coke-pitch composite blanks in the production of isostatic graphite.

To conduct studies of thermo-elastic plasticity at the early stages of burning of IG blanks, the composition of the coke-pitch composite was used, including calcined pitch coke as a filler with an average grain size of 15 μm and a matrix of high-temperature pitch (HTP) in an amount of 40 % (by weight) [7]. The softening temperature of the HTP is 140 $^{\circ}\text{C}$. Pitch coke is characterized by physical properties close to isotropic [20], which positively affects the properties of the finished IG. The calcination temperature of coke exceeds the burning temperature of the IG blanks, which minimizes its shrinkage during the heat treatment. The physical properties of the coke-pitch composite used in the calculations are given in Table 3.

In the calculations, the Poisson's ratio, CLThE, the yield strength and the hardening modulus of the IG blanks were taken equal to $\nu = 0.235$, $\beta = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $\sigma_{y0} = 3 \text{ MPa}$ and $h = 0 \text{ Pa}$, respectively. When heated, the composite material of the



IG blanks behaves differently: to the softening temperature of the pitch (matrices) expand, and after the onset of destruction, accompanied by gas-fission, it shrinks with the formation of semicoke and coke in the temperature range of more than 250 °C, which leads to an increase in its density [7, 21].

Table 3

Physico-mechanical properties of IG blanks at the burning stage (composition: calcined coke (15 μm) +40% HTP).

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$c_p, \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$\lambda, \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	E, GPa	σ_c, MPa	σ_t, MPa
20		1420	0,67	0,60	3,8	12,0 3,1
100		1380	0,95	0,77	5,0	12,0 3,1
200		1450	1,18	0,90	8,4	20,6 5,3

Source: [7]

Note: t is temperature; ρ is density; c_p is mass isobaric heat capacity; λ is coefficient of thermal conductivity; σ_c , σ_t are the compressive and tensile strengths, respectively.

The calculations were performed for vertically standing IG blanks with a diameter of 300 mm and a height of 500 mm, taking into account gravitational and temperature loads on a finite element mesh consisting of 4762 linear tetrahedral FEs and 1311 nodes. The temperature load in the form of radial temperature drops across the workpieces varied within the range $\Delta T_r = 5\text{--}15$ K. The results of numerical simulation of the physical fields of elastic-plasticity of the “green” IG blanks at the initial stage of burning to the softening temperature of the pitch (140 °C) are shown in Fig. 1.

Analysis of the calculation results shows that:

- a significant part of the IG blank under the influence of temperature loading is in the plastic state (Fig. 1, d);
- in the upper part along the axis of the workpiece, gravitational compressive forces and temperature expansion cancel each other out, which results in minimal equivalent elastic deformations (Fig. 1, c) and, accordingly, equivalent Mises stresses (Fig. 1, f).

Irreversible plastic deformations worsen the uniformity of the composite and provoke cracks nucleation at the initial stage of burning, i.e. to reach the level of softening temperatures of the matrix material, the beginning of destruction and intense gas evolution.

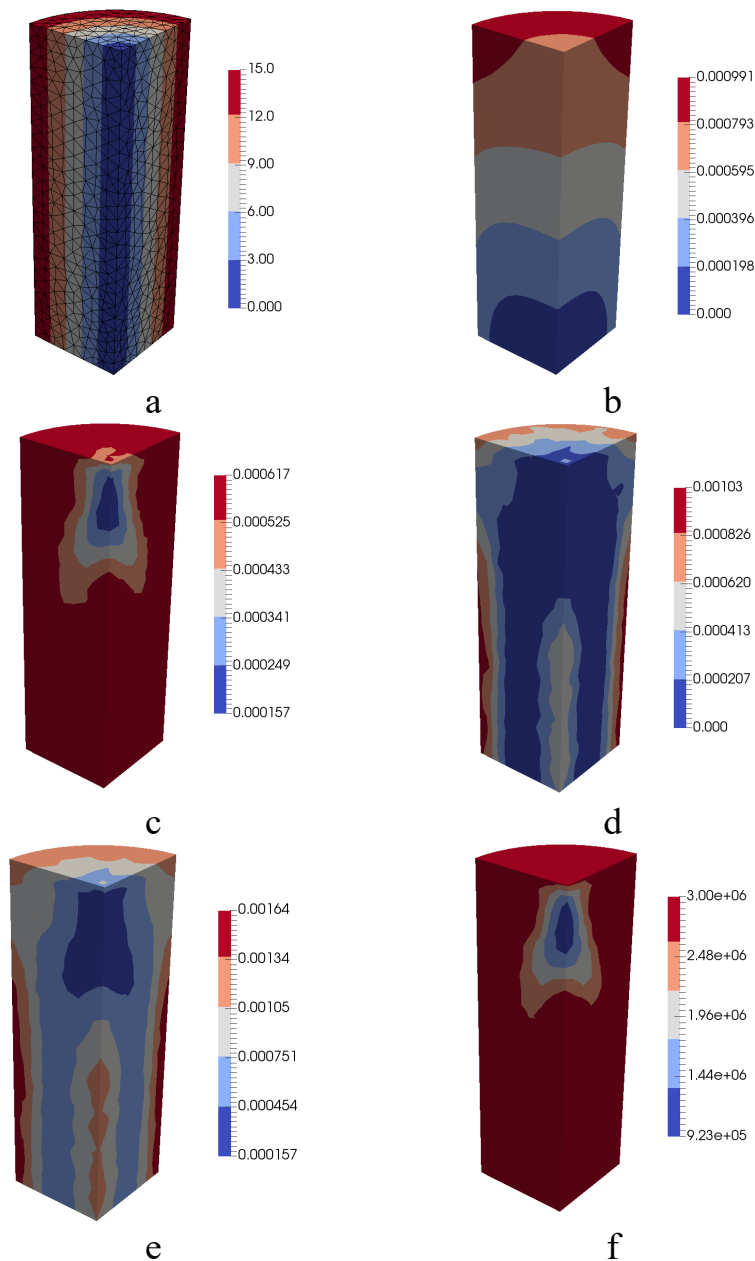
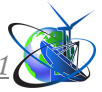


Figure 1 – The results of numerical simulation of the thermo-elasto-plastic behavior of the composite material during the burning of “green” IG blanks at $\Delta T_r = 15$ K: a – excess temperature ($T - T_{ref}$, K); b – displacement vector module ($|u|$, m); c – equivalent elastic deformations according to Mises (ϵ_{eq}^{el}); d – equivalent plastic deformations according to Mises (ϵ_{eq}^{pl}); e – equivalent full deformations according to Mises (ϵ_{eq}^{tot}); f – equivalent von Mises stresses (σ_{eq} , Pa).

Author's development

5 Conclusions.

Tools have been developed in the form of methodology and software for the numerical study of the thermo-elasto-plastic state of coke-pitch composites in the production technology of isostatic graphite.

Verification of the program code developed in the Mathcad environment is carried out using the example of a numerical solution of the test problem of the

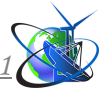


elastic-plasticity of an isotropic material. A comparison of the results with the data of numerical analysis obtained using the ANSYS Mechanical APDL software product shows that, with isotropic hardening, the maximum discrepancy does not exceed 1.13 %, and for ideal plasticity it is no more than 3.58 %.

A numerical analysis of the thermo-elastic-plastic state of composite IG blanks during the burning process is carried out. It is shown that in the early stages of burning at radial temperature gradients of large 33 K/m in the coke-pitch composite, undesirable plastic deformations may occur, which can contribute to the initiation of cracks and reduce the uniformity of the composite material.

References:

1. Chung, D. D. L.: Composite Materials: Science and Applications. Springer-Verlag London Limited, London (2010).
2. Askeland, D. R., Phule, P. P.: The Science and Engineering of Materials, 5th Edition, Thomson, Toronto (2006).
3. Kostikov, V., Samoylov, V., Beylina, N., Ostronov, B.: New high-strength carbon materials for traditional technologies. Russian chemical magazine 48(5), 64–75 (2004) (in Russian).
4. Asao, O.: High density isotropic graphites and glassy carbons. Japanese situation: production, properties and applications. Universidad de Alicante. Secretariado de Publicaciones, Alicante (1997).
5. Global Isostatic Graphite Market 2015 Industry Trends, Analysis & Forecast to 2020. QY Research, Florida (2015).
6. Karvatskii, A., Leleka, S., Pedchenko, A., Lasariev, T.: Investigation of the current state of isostatic graphite production technology. Technology audit and production reserves 2/1(34), 16–21 (2017).
7. Samoylov, V.: Receiving fine carbon fillers and development of the production technology of fine-grained graphites on their basis. Doctoral thesis. Research institute of constructional materials on the basis of graphite «NIIgrazit», Moscow (2006) (in Russian).
8. Karvatskii, A., Mikulionok, I., Leleka, S., Solovei, V. : Numerical Simulation of Elasto-Plastic Behavior of Isotropic Composite Materials. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 1, 492–501 (2020). DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7_48
9. Shuvalov, E.: About distribution of temperatures and thermal tension in carbon and graphite bodies of a cylindrical form. Collection of works of Chelyabinsk Electrometallurgical plant 2, 200–214 (1970) (in Russian).
10. Simo, J., Taylor, R.: Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity. Comp. methods in applied mechanics and engineering 48, 101–118 (1985).
11. R. Borst de, R., Crisfield, M., Remmers, J., Verhoosel, C.: Non-linear finite element analysis of solids and structures. 2nd edn. John Wiley & Sons Ltd, New York (2012).
12. Zienkiewicz, O., Taylor, R., Fox, D.: The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. 7th edn. Elsevier Ltd., Oxford (2014).
13. Karvatskii, A., Panov, E., Pedchenko, A., Shkil, V.: Modification of implicit algorithm for solving a problem on the elastic plasticity of bulk materials. Eastern-



European Journal of Enterprise Technologies . 5(7(89)), 17–23 (2017).

14. Jones, R.: Mechanics of composite materials: 2nd edn. Taylor & Francis, Philadelphia (1999).

15. Karvatskii, A., Leleka, S., Pedchenko, A., Lazariiev, T.: Numerical analysis of physical fields of graphitization process of electrode production in Castner's furnace. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 6(5(84)), 19–25 (2016).

16. PTC Mathcad, <https://www.ptc.com/en/products/mathcad>, last accessed 2019/05/29.

17. Gmsh. A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities, <http://gmsh.info/>, last accessed 2019/05/29.

18. ParaView, <https://www.paraview.org/>, last accessed 2019/05/29.

19. Thompson, M., Thompson, J.: ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. Butterworth-Heinemann, Oxford (2017).

20. Ostrovskiy, V., Beylina, N., Lipkina, N., Sinelnikov, L.: Peak coke as filler of constructional graphites. Chemistry of solid fuel 1. 56–61 (1995).

21. Gromov, B., Panov, Ye., Bozhenko, M., Vasilchenko, G., Karvatskii, A., Shilovich, I.: Burning and start of aluminum electrolyzers. Ore and Metals Publishing house, Moscow (2001).

Анотація. Встановлено, що у доступних літературних джерелах відсутня інформація про результати моделювання пружно-пластичної поведінки коксопексових композитів на стадіях виробництва заготовок ізостатичного графіту, а відомості щодо механічних властивостей приводяться в основному у сертифікатах виробників і тільки для готового продукту, що може бути пов'язане з високим комерційним потенціалом цієї технології. У розглянутих працях відсутні замкнені постановки завдань термо-пружно-пластичності композитних матеріалів та приклади їх числової реалізації, які можна було безпосередньо використовувати при удосконаленні технологій отримання ізостатичного графіту. У зв'язку з наведеним, дана робота спрямована на розробку інструментів для числового дослідження пружно-пластичного стану коксопексових композитів у технології ізостатичного графіту. Розроблено засоби у формі методології та програмного забезпечення для числового дослідження термо-еласто-пластичного стану композитів коксової смоли на прикладі технології виробництва ізостатичного графіту. Розглянуто замкнуте математичне формулювання та методику числового розв'язання пружно-пластичної задачі з ізотропним зміцненням на основі неявного алгоритму зворотного відображення. За допомогою методу скінченних елементів був розроблений та перевірений відповідний програмний код. Порівняння результатів з даними числового аналізу, отриманого за допомогою програмного продукту ANSYS Mechanical APDL, показує, що за ізотропного зміцнення максимальна розбіжність не перевищує 1,13%, а для ідеальної пластичності становить не більше 3,58%. Виконано розрахунки термо-еласто-пластичної поведінки коксопексового композиту на технологічному етапі виробництва ізостатичних графітових заготовок. Показано, що у разі невідповідності температурних режимів на початкових стадіях випалювання в ізостатичних графітових заготовках відбуваються пластичні деформації, що призводять до зародження тріщин та зниженню однорідності матеріалу композита.

Ключові слова: композитний матеріал, еластопластичність, числовий аналіз, неявний алгоритм, ізостатичний графіт

Стаття відправлена: 27.03.2021 р.

© Карвацький А. Я., Мікульонок І. О., Лелека С. В.,

Витвицький В. М., Соловей В. В.



УДК 666.9.05

THERMAL PROTECTION INSULATION IN THE LINING OF THE ROTARY KILNS

Shvachko D.G.,

Postgraduate

H-index (Scopus or Google Scholar) – 2(ta2sFv4AAAAJ)

ORCID: 0000-0001-6031-1490

Shcherbina V. Yu.

d.t.s., Professor

H-index (Scopus or Google Scholar) – 4(mcNnfnIAAAAJ)

ORCID: 0000-0002-7218-3868

Borshchik S.A.,

Senior Lecturer

ORCID: 0000-0002-7791-6821

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**Kyiv, Peremohy ave, 37, Ukraine*

Abstract: The work considers the main part of cement clinker in Ukraine is fired in furnaces, the thermal efficiency of which does not exceed 55-60%, therefore the task of increasing the efficiency of using such units is extremely urgent, since an increase in these indicators even by several percent gives a great economic effect. A fragment of the lining consists of a steel sheet modeling the casing and shaped periclase-chromite refractories with cells filled with mullite-silica wool. The stand is designed to simulate the operating modes of the lining of the rotary kiln body during operation.

Keywords: rotary kilns, thermal insulation, lining, building materials, production of cement clinker.

Introduction

Tubular furnaces are widely used in the oil refining, chemical and gas industries, where the furnace performs the technological functions of a thermal apparatus. However, the most widespread of these units are in the building materials industry, where they are the main thermal plants for the production of cement clinker, expanded clay, lime, perlite and other materials. However, rotary kilns, which are the main consumers of fuel, have a fairly low thermal efficiency. Thus, the main part of cement clinker in Ukraine is fired in furnaces whose thermal efficiency does not exceed 55-60%, so the task of improving the efficiency of such units is extremely important, as increasing these indicators by even a few percent gives a significant economic effect [1, 2].

The purpose of the work. One of the main factors determining the thermal efficiency of the rotary kiln is the value of the thermal resistance of the lining, as in the used rotary kilns heat loss through the body into the environment is very significant and reaches 20-25% of total combustion heat [3]. The lack of durable heat-resistant material with good thermal insulation properties largely determined the direction of work on creating a lining with high thermal resistance by introducing additional fibrous thermal insulation material, which is achieved by changing the shape of the refractory (Fig. 1). For example, such insulation can be mulite silica wool with inorganic additives, which can be used at temperatures up to 1600 °C. In



this case, a cell filled with heat-insulating material is formed between the refractory and the furnace body.

The greatest efficiency in reducing the heat loss of the furnace to the environment and the lining weight is achieved by installing shaped refractories in the high temperature zone of the furnace, which provides greater heat transfer to the material and reducing the mass of the heating apparatus [2, 3].

Figure 1 shows a constructive solution where the refractory brick rests on the body with a leg formed by a cell [4]. At the mechanical and thermal loadings which arise during work, the resulted form gives the chance, it is better to keep mechanical stability of a refractory brick and to provide high thermal efficiency. In this case, a cell having the shape of a triangle is considered.

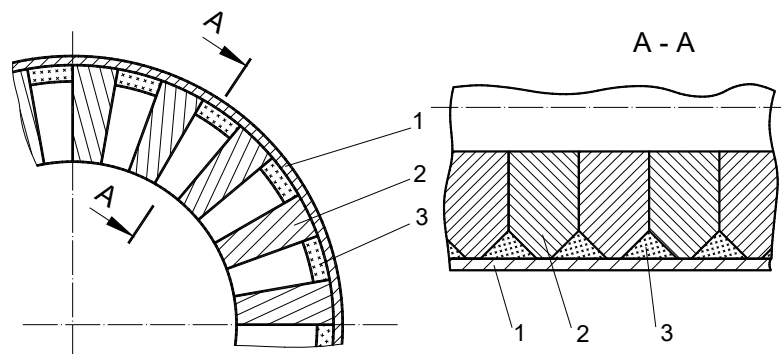


Fig. 1 - Furnace lining with shaped refractories.

1 - furnace body; 2 - refractory;

3 - cell with additional thermal insulation.

This work is devoted to the experimental study of the distribution of temperature fields in the lining fragment in the presence of shaped refractory and thermal insulation material.

The aim of the work is to study the possibilities of installing a lining with a shaped refractory, taking into account the thermal efficiency and structural reliability due to the magnitude of the resulting thermomechanical stresses.

Carrying out of experimental researches is connected with necessity of reception of values of temperatures and the subsequent estimation of correctness of mathematical model and a technique of calculation of temperatures in refractories. The data for determination of temperatures in refractories and thermal insulation by means of the developed experimental installation are specified.

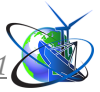
Materials and methods

Installation description

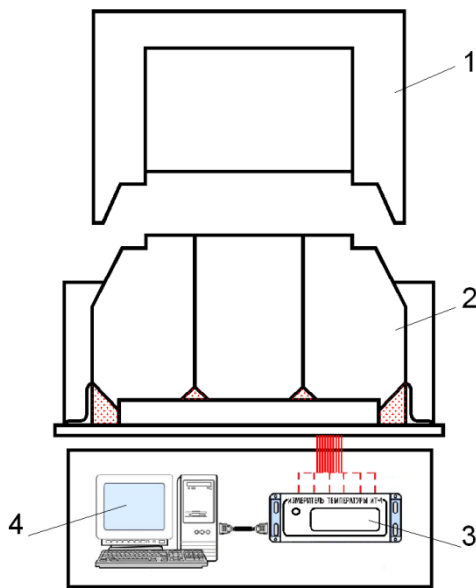
Experimental installation is a fragment of the lining of a rotary kiln with additional insulation and includes (Fig. 2):

1. Heating furnace,
2. The lining element of the rotary kiln,
3. Temperature meter IT-4.
4. Computer for collecting and processing the received data.

The tests were performed in an electric heating furnace type CHO-34,5-2 / 16. During the tests, the furnace operated autonomously. Temperature control was

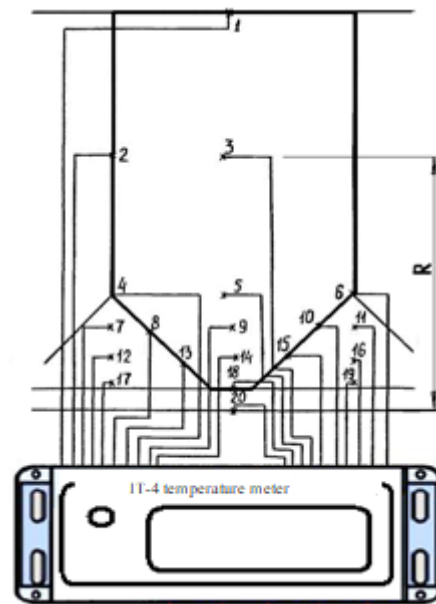


carried out using a thermocouple installed in the oven. The temperature in the working chamber was kept constant and was 1200 ° C. Stationary heat flow through the refractories was installed 12 hours after turning on the furnace. A fragment of the lining of a rotary kiln was the main part of the experimental setup, which investigated the process of temperature distribution in cells with thermal insulation and directly in refractories. Shaped periclazochromite refractories are standard, PCC-28 brand, used for lining rotary cement kilns. Refractories are fastened together with ties, and with the help of hinged bolts are attached to a steel sheet (material ST.3) with a thickness of 14 mm, simulating the body of the furnace.



1 - furnace; 2 - a fragment of the lining;
3 - temperature meter IT-4; 4 - computer.

Fig. 2. Experimental installation



1-20 places of temperature measurement

Fig. 3. The scheme of placement of thermocouples in the refractory

The cell is enclosed with heat-insulating material - mulito-silica wool (MKRR - 130). Laying density is 300 kg / m³. To reduce the influence of external heat transfer conditions during the experiment, a prototype of refractories was placed in the center of the fragment of the lining. In addition, to exclude heat runoff from the side surfaces of the external refractories, these surfaces were covered with a layer of insulating material.

Results and discussion.

The test method was to measure the temperature in the body of the refractory. Measurements were performed using 20 thermocouples of the chromel-alumel type with a diameter of 0.5 mm made according to GOST 3044-94. Of these, 13 are installed in refractory, 6 - in mulite silica, 1 - in the case (Fig. 3). The thermocouple beads are pressed into the refractory to a depth of 3-6 mm. Thermocouple readings were taken using a connector to which a switch is connected to transmit thermocouple readings to the IT-4 temperature meter. The measurement accuracy of the IT-4 meter is 0.1%, the maximum error of the chromel-alumel thermocouple is 0.75%. From the IT-4 meter data is sent to the computer for recording and processing



of the received data. After heating the furnace to 1200 ° C and entering the stationary mode, temperature measurements were carried out in the refractory, thermal insulation and metal plate (table). The interval of measurements was 4 hours.

Analysis of results

After receiving the experimental data were processed according to standard methods [5], which determined:

1. The average value of n measurement $\bar{x} = \sum x_i / n$;
2. Measurement error $\Delta x_i = \bar{x} - x_i$;
3. Squares of measurement error $(\Delta x_1)^2, (\Delta x_2)^2, \dots, (\Delta x_n)^2$;
4. The root mean square error is the arithmetic mean $S_r = \sqrt{\sum (x_i)^2 / n(n-1)}$;
5. Student's coefficient for a given confidence probability $P = 0.95$ and six measurements is $t = 2,446$;
6. Confidence interval (measurement errors) $\Delta x = S_r \cdot t$;
7. The limits of the confidence interval taking into account the random and instrumental error $\Delta x = \sqrt{(S_r \cdot t)^2 + \delta^2}$, where δ - the error of thermocouples and temperature meter IT-4.
8. Relative error of measurement result $\varepsilon = \Delta x / x \cdot 100\%$.

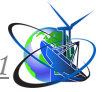
The results of the calculation are summarized in the table.

Table 1

Temperature measurements and error estimates

№	Temperature measurements							Data Processing					
	R	Experiment number (T °C)						$\bar{x}$	S_r	$S_r \cdot t$	δ	Δx	ε
		1	2	3	4	5	6						
		T °C	T °C	T °C	T °C	T °C	T °C						
	mm	T °C	T °C	T °C	T °C	T °C	T °C	T °C	T °C	T °C	T °C	T °C	%
1	241	1193,0	1190,0	1193,0	1193,0	1192,0	1192,0	1192,8	0,703	1,72	8,95	9,11	0,76
2	153	956,0	955,0	957,0	957,0	958,0	957,0	956,3	0,614	1,50	7,17	7,33	0,77
3	157	960,0	965,0	964,0	963,0	962,0	962,0	962,8	0,600	1,47	7,22	7,37	0,77
4	71	769,0	773,0	773,0	773,0	772,0	771,0	771,8	0,654	1,60	5,79	6,01	0,78
5	71	744,0	747,0	746,0	745,0	744,0	746,0	745,3	0,494	1,21	5,59	5,72	0,77
6	68	760,0	764,0	764,0	765,0	763,0	763,0	763,3	0,557	1,36	5,73	5,89	0,77
7	54	721,0	720,0	721,0	721,0	722,0	721,0	721,0	0,258	0,63	5,41	5,44	0,76
8	51	705,0	706,0	707,0	706,0	705,0	706,0	705,8	0,307	0,75	5,29	5,35	0,76
9	51	669,0	671,0	673,0	671,0	670,0	670,0	670,6	0,557	1,36	5,03	5,21	0,78
10	50	699,0	700,0	701,0	701,0	700,0	701,0	700,3	0,333	0,82	5,25	5,32	0,76
11	51	715,0	717,0	718,0	717,0	716,0	717,0	716,6	0,421	1,03	5,38	5,47	0,76
12	32	621,0	624,0	626,0	628,0	626,0	625,0	625,6	0,557	1,36	4,69	4,89	0,78
13	32	559,0	561,0	563,0	563,0	562,0	560,0	561,6	0,494	1,21	4,21	4,38	0,78
14	32	556,0	556,0	558,0	557,0	557,0	554,0	556,3	0,557	1,36	4,17	4,39	0,79
15	30	575,0	572,0	577,0	575,0	574,0	573,0	573,8	0,477	1,17	4,30	4,46	0,78
16	30	616,0	617,0	619,0	619,0	618,0	619,0	618,0	0,516	1,26	4,64	4,80	0,78
17	16	410,0	414,0	413,0	413,0	412,0	412,0	412,5	0,428	1,05	3,09	3,27	0,79
18	13	332,0	334,0	335,0	335,0	333,0	334,0	333,8	0,477	1,17	2,50	2,76	0,83
19	17	420,0	421,0	422,0	422,0	421,0	422,0	421,3	0,333	0,82	3,16	3,26	0,77
20	2	305,0	307,0	308,0	308,0	306,0	307,0	307,0	0,365	0,89	2,30	2,47	0,80

Temperature measurements were extrapolated linearly between the values obtained at the installation points of thermocouples. The temperature distribution in the shaped refractories and cells with thermal insulation are shown in Fig.4.



The temperature distribution in the center of the refractory in Fig.5.

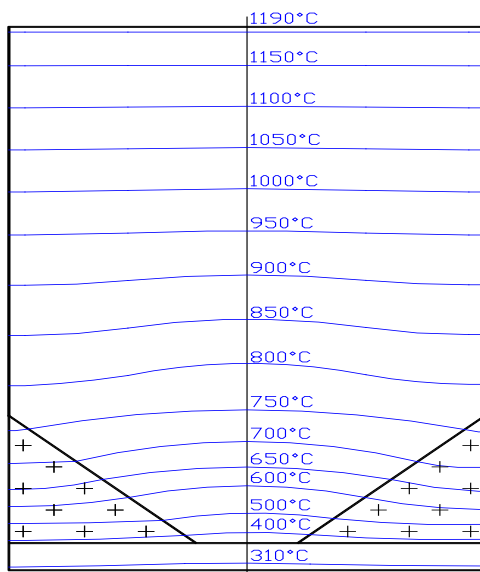


Fig. 4. Temperature distribution in prepackaged refractories and measures with thermal insulation (experimental data)

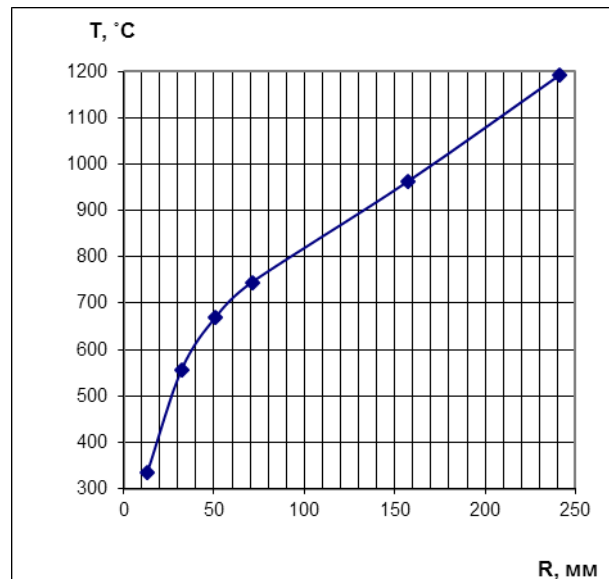


Fig. 5. Temperature distribution in the center of the refractory

Fig. 5. Temperature distribution Given the differences obtained by comparing the data, the proposed method of experimental research can be considered acceptable, and the results can be used as initial for the development of methods for calculating temperature fields in refractory refractory and thermal insulation.

The temperature distribution in the shaped refractory can be numerically simulated using the technique described in [6] for a simplified model, or the technique [7] for a more accurate calculation.

Conclusions.

An experimental stand designed and manufactured for experimental studies of the heat exchange process in the fragment of the lining of a rotary kiln with additional thermal insulation has been developed and manufactured. The lining fragment consists of a steel sheet modeling the body of the drug, and shaped periclazochromite refractories with cells filled with mullitokremnezemisty cotton wool. The stand is intended for modeling of operating modes of lining of the case of the rotary furnace in the course of operation.

Experimental studies have been carried out in which the processes of heat exchange in the furnace lining are physically modeled. The experimental setup allows in the process of research to determine the degree of influence of various regime and design factors on the heat transfer process.

Experimental studies of the heat transfer process, and the creation on their basis of the calculation technique, will allow to implement in the practice of development of rotating thermal devices lining with high thermal resistance. The efficiency of such lining is higher in comparison with the existing ones, which opens wide prospects for its introduction into the production process, as it has significantly better thermal and acceptable cost indicators.



In further research it is planned to develop a mathematical model for modeling the process of heat transfer and comparing the data of numerical and field experiments.

Literature

1. Islamov M.Sh. Design and operation of industrial furnaces. - L.: Chemistry, 1986. - 280 p.
2. Shcherbina V.Yu., Shvachko DG "Improving the energy efficiency of rotating heat units." SCIENTISTS NOTES OF THE TAVRIA NATIONAL UNIVERSITY NAMED AFTER VI VERNADSKY Series: Technical Sciences 2018. Volume 29 (68). Part 2. № 4, art. 68-72. URL: http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/4_2018/part_2/15.pdf
3. Shcherbina V., Shvachko D., Borshchik S. Heat exchange simulation in energy zones of a rotary kiln with change of heat resistance of the body. «Technology audit and production reserves» 2019. №6 / 1 (50). pp. 36-41. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.189169>
4. Pat. u 64150 Ukraine, IPC7 (2006.01) F27B 7/00. Rotary furnace / Shcherbina V.Yu., Shishkovsky OV, Samilenko Yu.M., Kryvko Yu.V.; applicant and owner Shcherbina V.Yu. - № u201010558; declared 31.08.2010; publ. 10.03.2011, Bull. № 5/2011.
5. Kunkin SN, Vostrov VN, Kuznetsov PA, Ryabinin AG Mathematical methods of experimental data processing. Textbook.— St. Petersburg: St. Petersburg State Technical University Publishing House, —2002. - 68 p
6. Shvachko, D.G., & Shcherbina, V. Yu. (2019). METHODS OF OPERATIONAL CALCULATION OF THERMAL CONDITIONS IN PACKAGED REFRACTORIES. Bulletin of NTUU Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Series Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving, (1), 102-109. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171193>
7. Shcherbina, V. Yu., Shvachko, D. G., & fimenko, Є. A. (2018). MODELING OF PET-CONTAINERS BLOW MOLDING FROM PREFORM. Bulletin of NTUU Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Series Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving, (1), 65–72. <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2018.143382>

Анотація: У роботі розглядається основна частина цементного клінкеру в Україні, що випалюється в печах, теплова ефективність яких не перевищує 55-60%, тому завдання підвищення ефективності використання таких агрегатів є надзвичайно актуальним, оскільки збільшення ці показники навіть на кілька відсотків дають великий економічний ефект. Фрагмент футеровки складається із сталевих листів, що моделює кожух, і фасонних периклазохромітових вогнетривів з осередками, заповненими мулітно-силікатною ватою. Стійка призначена для імітації режимів роботи футеровки корпусу обертової печі під час роботи.

Ключові слова: обертові печі, теплоізоляція, футеровка, будівельні матеріали, виробництво цементного клінкеру.

Supervisor: Shcherbina V. Yu.

Article sent: 03/04/2021

© Shvachko D.G., Shcherbina V. Yu., Borshchik S.A.



УДК 532.137

**MEASURING THE VISCOSITY OF LIQUIDS IN A CONICAL
VISCOMETER****ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РІДИН В КОНІЧНОМУ ВІСКОЗИМЕТРІ****Andreiev I. A. / Андреев І. А.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доцент*

ORCID: 0000-0003-2965-8722

Koval V. O. / Коваль В. О.*student / студент*

ORCID: 0000-0002-8150-1805

*National Technical University of Ukraine**"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Анотація. Запропонована методика визначення в'язкості ньютонівських рідин на конічному віскозиметрі нової конструкції, яка потребує виміру тільки часу повного витікання певної кількості рідини.

Виконане ретельне калібрування віскозиметра за допомогою еталонних рідин з відомою в'язкістю.

Застосування в розрахункових формулах еквівалентного перепаду тиску дозволяє врахувати кінетичну енергію і деякі відхилення плин рідини від теоретичної траєкторії, які мають місце у випадку вимірювань систем з низькою в'язкістю.

Ключові слова: в'язкість, віскозиметр, ньютонівська рідина, конічний канал.

Постановка проблеми. Капілярна віскозиметрія дозволяє отримати точні значення реологічних характеристик рідин при умові забезпечення нерозривного ламінарного плин у вимірювальному каналі. Для унеможливлення розриву суцільності плин вертикальний капіляр занурюють в ємність, яка має набагато більший поперечний переріз ніж капіляр віскозиметра або застосовують віскозиметр U-подібного типу. Такі прилади характеризуються відносно складними конструкціями і обмеженістю в застосуванні.

Є ряд приладів, в яких для забезпечення суцільності плин рідин використовують конічні канали. До таких приладів відносяться проточний чашковий або занурюваний віскозиметри і воронка Марша. В цих випадках вимірюється умовна в'язкість, яка виражається в секундах часу витікання. Недоліком таких вимірювань є те, що для перерахунку в абсолютні одиниці в'язкості застосовуються емпіричні формули, які мають наближений характер, а деякі з них просто неточні [1].

З метою суттєвого спрощення конструкції і облегшення проведення замірів в'язкості авторами був запропонований віскозиметр з конічною вертикальною вимірювальною трубкою, що звужується донизу і має у верхній частині карман [2]. Віскозиметр не потребує застосування насоса, а плин рідини здійснюється під дією власної ваги. Застосування на практиці цього віскозиметра дає можливість отримання якісних фізичних характеристики рідин, які використовуються для вирішення багатьох прикладних задач.



Важливим у віскозиметрії є наявність значних відхилень виміряних на стандартних капілярних віскозиметрах значень в'язкості від табличних, які залежать від критерію Рейнольдса [3]. Тому при розрахунку в'язкості рідин за аналітичними формулами слід вводити поправку на кінетичну енергію (поправку Хагенбаха) або коефіцієнт віскозиметра, що змінюється залежно від витрати.

Метою статті є представлення результатів пошукових досліджень, які були спрямовані на розробку методики визначення в'язкості ньютонівських рідин за допомогою запропонованого конічного віскозиметра.

Виклад основного матеріалу. Вважається, що плин рідини в конічному каналі здійснюється у радіальних напрямках до початку координат. В роботі [4] авторами була запропонована формула розрахунку в'язкості рідини за часом її повного витікання з вертикального конічного каналу (**рис.1**):

$$\mu = \frac{t_e \Delta p}{C_t}, \quad (1)$$

де $C_t = -\frac{8(L_2^3 - L_1^3)}{9L_1^3 L_2^3 \tan^2 \theta_0}$ – конструктивний коефіцієнт; L_1 – відстань від початку координат до вихідного зрізу бункера, м; L_2 – відстань від початку координат до входу в канал, м; θ_0 – кут нахилу похилої стінки каналу до вертикалі, рад.; μ – динамічна в'язкість рідини, Па.с; Δp – перепад тиску в конічному каналі на довжині $L = L_2 - L_1$, Па.

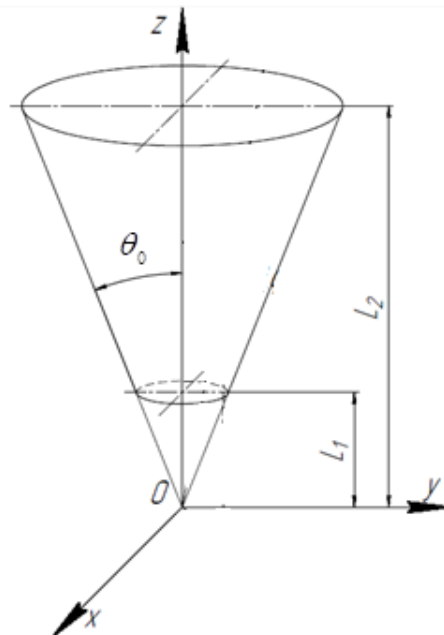
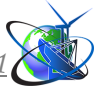


Рис.1 Розрахункова схема

Запропонована методика визначення реологічних характеристик ньютонівських систем спрощує процес вимірювання, а також застосовна при обмеженій кількості рідини.

Перепишемо формулу (1) у вигляді:



$$t_g = C_{\text{ікон}} \frac{\mu(L_2 - L_1)}{\Delta p},$$

$$\text{де } C_{\text{ікон}} = -\frac{8(L_2^3 - L_1^3)^2}{9L_1^3 L_2^3 t g^2 \theta_0 (L_2 - L_1)}.$$

Звідки напишемо формулу для визначення в'язкості:

$$\mu = \frac{t_g \Delta p}{C_{\text{ікон}} L}. \quad (2)$$

В процесі проведених експериментів був зроблений ряд вимірювань часу витікання t_g еталонних рідин з відомою в'язкістю (вода, ацетон, гліцерин різних концентрацій, оливкова олія, моторне масло SAE 40, моторне масло SAE 10, касторове масло) із запропонованого віскозиметра.

Надалі формулу (2) було замінено на таку:

$$\mu = \frac{t_g \Delta p_e}{C_{\text{ікон}} L}, \quad (3)$$

де Δp_e – еквівалентний перепад тиску, МПа.

Заміна Δp на Δp_e дає можливість врахування кінетичної енергії і деякого відхилення від виключно радіального руху рідини у напрямку до початку координат при використанні аналітичних залежностей.

Використовуючи отримані значення часу витікання t_g еталонних рідин і формулу (3) побудуємо графік залежності $\frac{\Delta p_e}{L} = f(t_g)$ (рис.2).

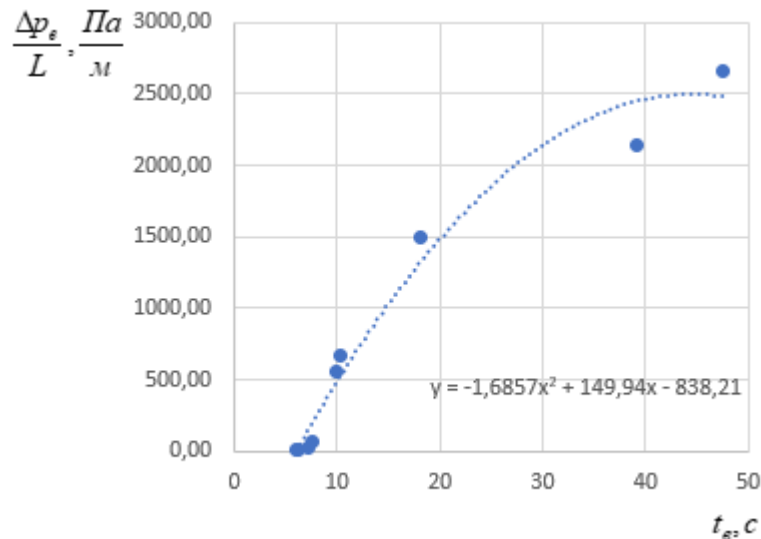


Рис.2 Залежність еквівалентного перепаду тиску по довжині конічного

каналу $\frac{\Delta p_e}{L}$ запропонованого віскозиметра від часу витікання t_g

Надалі для розрахунку в'язкості досліджуваної рідини за часом витікання t_g по графіку (рис.2) визначається еквівалентний перепад тиску по довжині конічного каналу $\frac{\Delta p_e}{L}$ і за допомогою формули (3) розраховується динамічна в'язкість μ .



Апроксимуємо отриману криву (рис.2) рівнянням:

$$\frac{\Delta p_e}{L} = -1,6857t_g^2 + 149,94t_g - 838,21. \quad (4)$$

В цьому випадку розрахунок в'язкості виконується за формулами (4) і (3) без використання графіка (рис.2).

Необхідно зазначити, що наведені результати були отримані на експериментальному віскозиметрі з великим діаметром вихідного отвору, який складає 7 мм. Згідно цього витрата рідини і, відповідно, відхилення від теоретичного ламінарного плину були набагато більшими, ніж у типових віскозиметрів.

Висновки

Запропонована методика розрахунку в'язкості в конічному віскозиметрі враховує кінетичну енергію і деякі відхилення плину рідини від теоретичної траєкторії, які мають місце у випадку вимірювань систем з низькою в'язкістю.

При цьому отримуються кількісні фізичні характеристики в'язкості, які придатні для вирішення прикладних задач.

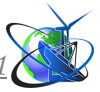
Подальші дослідження у цьому напрямку будуть спрямовані на удосконалення запропонованого обладнання для дослідження властивостей різноманітних рідин.

Література

1. Справочник инженера по эксплуатации нефтегазопроводов и продуктопроводов / Г. В. Бахмат и др.; под общ. ред. Ю. Д. Земенкова. М.: Инфра-Инженерия, 2006. 928 с.
2. Віскозиметр: пат. 140265 U Україна: МПК G01N 11/00 (2006.01). № u201908141; заявл. 15.07.2019; опубл. 10.02.2020, Бюл. № 3.
3. Даренский А. Н., Гончаров И. В., Обласов Н. В. Особенности определения вязкости пластовых нефтей на капиллярном вискозиметре при проведении PVT-тестов. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Москва, 2016. № 7. С. 825–833.
4. Андреев І. А., Коваль В. О. Удосконалення вимірювання в'язкості ньютонівських рідин. Modern engineering and innovative technologies, Karlsruhe, 2020. Issue 12, Part 1, P.13–18. DOI: 10.30890/2567-5273.2020-12-01-021.

References

1. Spravochnik inzhenera po jekspluataciji neftegazoprovodov i produktoprovodov / G. V. Bahmat i dr.; pod obshh. red. Ju. D. Zemenkova. M.: Infra-Inzhenerija, 2006. 928 s.
2. Viskozimetr: pat. 140265 U Ukraïna: MPK G01N 11/00 (2006.01). № u201908141; zajavl. 15.07.2019; opubl. 10.02.2020, Bjul. № 3.
3. Darenskij A. N., Goncharov I. V., Oblasov N. V. Osobennosti opredelenija vjazkosti plastovyh neftej na kapilljarnom viskozimetre pri provedenii PVT-testov. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. Moskva, 2016. № 7. S. 825–833.
4. Andrejev I. A., Koval' V. O. Udoskonalennja vymirjuvannja v'jazkosti n'jutonivs'kyh ridyn. Modern engineering and innovative technologies, Karlsruhe, 2020. Issue 12, Part 1, P.13–18. DOI: 10.30890/2567-5273.2020-12-01-021.



Abstract. *The proposed method for determining the viscosity of Newtonian fluids on a conical viscometer of a new design, which requires only the measurement of the time of the complete outflow of a certain amount of fluid.*

The viscometer has been carefully calibrated with reference liquids of known viscosity.

The use of the equivalent pressure drop in the calculation formulas allows one to take into account the kinetic energy and some deviations of the fluid flow from the theoretical trajectory, which occur in the case of measurements of systems with low viscosity.

Key words: *viscosity, viscometer, Newtonian fluid, conical channel.*



УДК 66.045.132, 697.921.4

REGENERATIVE HEAT EXCHANGER WITH NOZZLE FROM THE NET OF A CANVAS WEAVING

РЕГЕНЕРАТИВНИЙ ТЕПЛООБМІННИК З НАСАДКОЮ ІЗ СІТКИ ПОЛОТНЯНОГО ПЛЕТІННЯ

Dvoinos Y.H. / Двойнос Я.Г.

c.t.s., assis.prof./к.т.н., ст.викл.

<https://orcid.org/0000-0002-2025-2809>

Yevziutin Pavlo / Євзютін Павло

master student /магістр

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Kyiv, 37, Prosp. Peremohy, 03056

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, пр.Перемоги, 37, 03056

Анотація. В роботі проаналізовано вплив гідродинамічного режиму руху повітря на коефіцієнт корисної дії регенеративного теплообмінника з насадкою із сітки полотняного плетіння. Результати серії числових експериментів узагальнено, запропоновано кореляційну залежність. Умови числових експериментів передбачали розрахунок періоду регенерації таким, що через теплообмінник в кожному експерименті проходило за один цикл однаковий об'єму повітря, який було обрано як об'єм, який відповідає масі 10% маси матеріалу насадки. Зроблено висновки щодо проектування регенеративних теплообмінників для систем вентиляції повітря.

Ключові слова: регенеративний теплообмінник, вентиляція, сітка полотняного плетіння

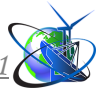
Вступ

Регенеративні теплообмінники широко використовуються в системах вентиляції завдяки економічності та простоті конструкції. Відомі моделі містять насадки з целюлози у вигляді гофрованих листів та керамічні з стільниковою структурою. При роботі такого теплообмінника з значними перепадами температури на насадці конденсується волога і накопичується пил, тому у якості матеріалу насадки може бути використано сітку з нержавіючого дроту. Такий матеріал може бути очищений під тиском і має більший термін експлуатації.

Для моделювання роботи теплообмінника з металевою сіткою використано фізичну модель (рис. 1) [1].

Зроблено наступні припущення:

1. Температурна та концентраційна неоднорідність у перерізі каналу регенератора відсутні [2];
2. Вплив теплопровідності в осьовому напрямку при контакті елементів насадки на температурний профіль насадки незначний [3];
3. Робота регенератора відбувається за умови відсутності процесів конденсації вологи.
4. Теплофізичні параметри повітря прийнято сталими за температури +20°C.
5. Рух повітря в каналах насадки представлено як пробковий, що



обумовлено значним гідравлічним опором насадки порівняно з гальмуванням потоку біля стінок каналу.

5. Обрано діапазон $Re=1\div 40$, та використано закономірності, отримані D.C. Collis and M.J. Williams [4]:

$$Nu \left(\frac{T_m}{T_g} \right)^{-0,17} = A + B Re^n$$

$$\alpha = \left(A + B Re^n \right) \left(\frac{\lambda}{d} \right) \left(\frac{T_m}{T_g} \right)^{0,17}, \quad (1)$$

де Nu та Re – критерії подібності, A , B , n – коефіцієнти, які залежать від Re та параметрів насадки; T_{gas} – температура газу, К; T_{solid} – температура матеріалу насадки, К. Коефіцієнти A , B , n для рівняння (1), при $Re \leq 40$: $A=0,095$; $B=0,012$ [1].

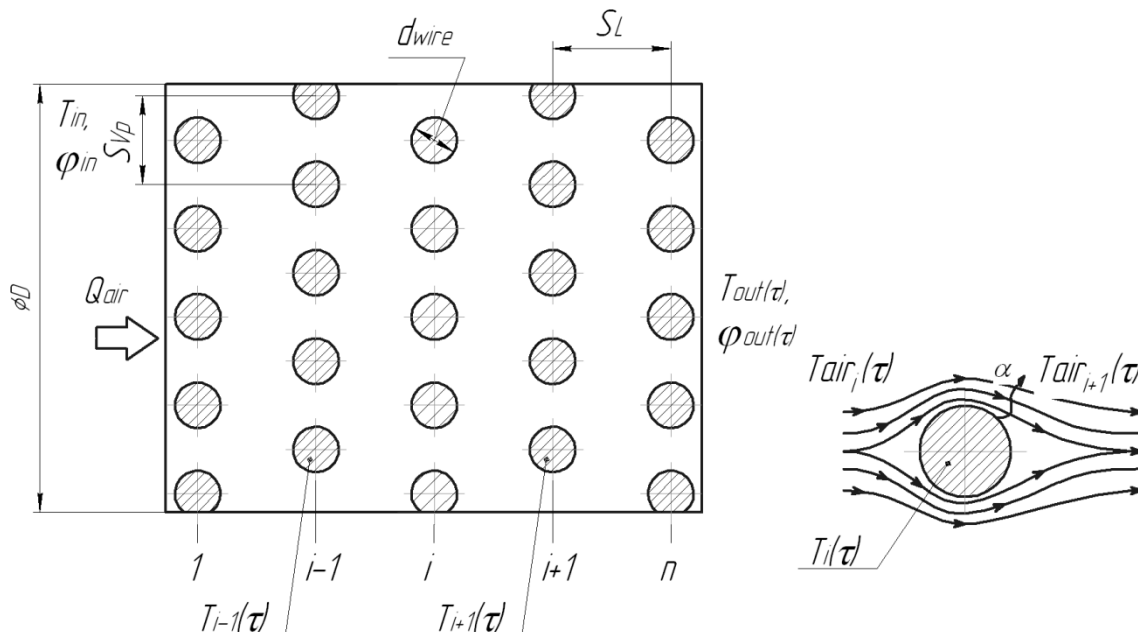


Рис. 1. Фізична модель процесу теплообміну у регенеративному теплообміннику з насадкою сітки полотняного плетіння

Q_{air} – витрата повітря на вході до регенеративного теплообмінника, m^3/s ;

T_{in} – температура повітря на вході до теплообмінника, $^{\circ}C$; ϕ_{in} – відносна

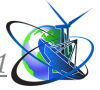
вологість повітря на вході до теплообмінника, доля; T_{out} ϕ_{out} – параметри повітря на виході; d_{wire} – діаметр дроту сітки, м; S_{vp} – шаг плетіння сітки, м;

S_L – шаг між шарами сітки, м; D – діаметр теплообмінника, м;

n – загальна кількість шарів сітки

Умови експерименту: сітку обрано з розміром ячейки $S_{VP}=1,6$ мм (1,4 мм на світ) сітка 2-160-400 НУ ДСТУ 3826-82, діаметр дроту $d_{wire}=0,4$ мм, матеріал: Сталь 08X18H10T, відстань між сітками у пакеті $S_L=0,002$ м. Тривалість циклу однакова і відповідає об'єму повітря, який дорівнює 10% маси матеріалу насадки.

Тепловий баланс між шаром повітря, що розташований між шарами насадки та одним шаром насадки регенератора [1]:



$$\begin{cases} \Delta I_{air_i} = \frac{\pi D^2 S_L}{4} \rho (i_{air_i+1} - i_{air_i}) \\ \Delta I_{wire} = \frac{\pi D^2}{4} \rho_{wire} C p_{wire} (T(\tau + \Delta\tau) - T(\tau)) \\ \Delta I = \Delta I_{wire} = \alpha (\bar{T}_{air} - \bar{T}_{wire}) \frac{\pi D^2}{4} S_{gh} \Delta\tau \\ \Delta\tau = \frac{\pi D^2 S_L}{4 Q_{air}} \end{cases}, \quad (2)$$

де $\rho_{wire}=1,3$ – питома маса сітки полотняного плетіння, кг/м²; $S_{gh}=1,57$ – питома поверхня сітки полотняного плетіння, м²/м²; $\Delta\tau$ – час перебування повітря у проміжку між шарами насадки, с.

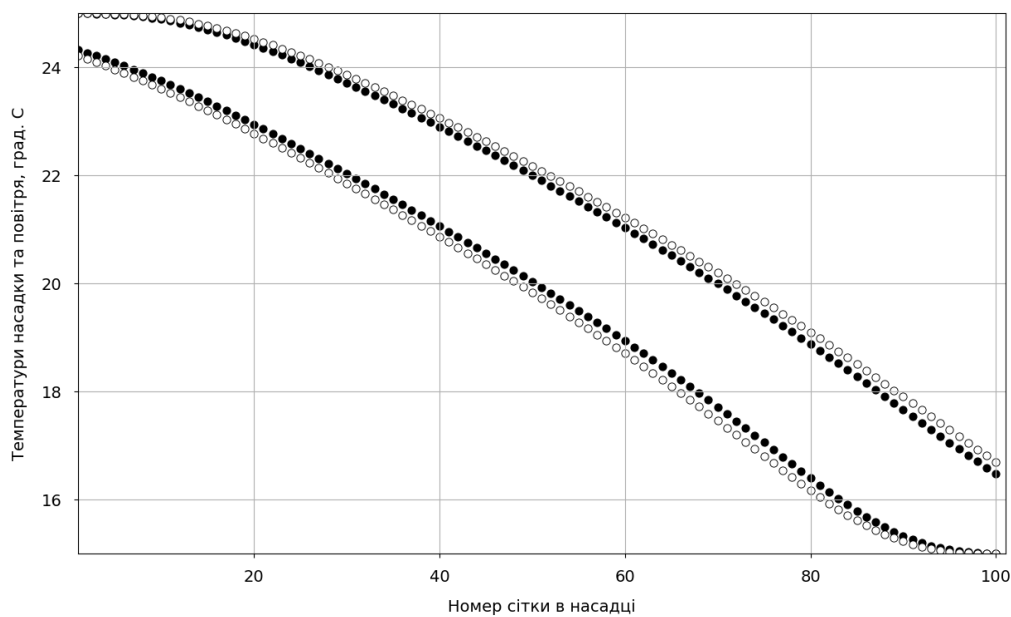


Рис. 2. Температури насадки і повітря при прямому та зворотному ході, $Re=5$, $\tau=57.15$ с

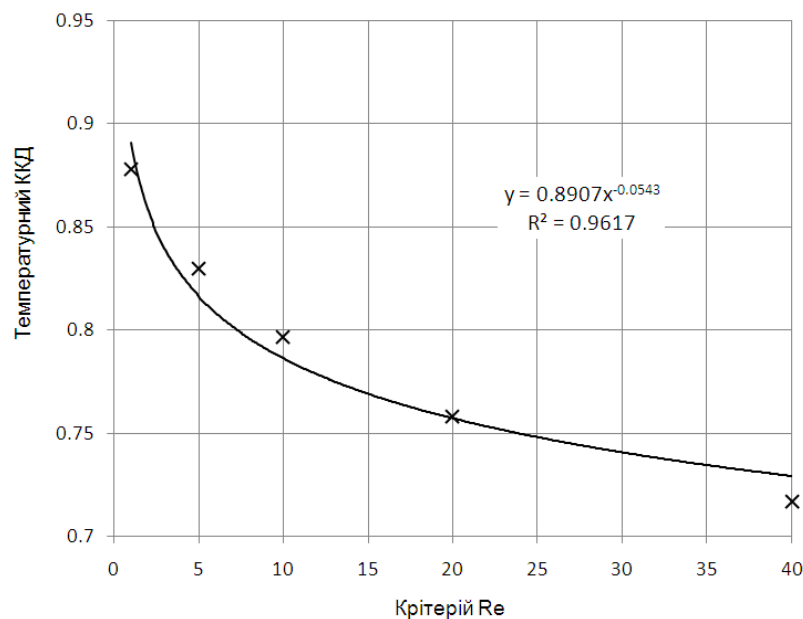


Рис. 3. Результат числового моделювання



Кількість сіток у насадці – 100 шт., температура повітря з теплої сторони +25°C, з холодної +15°C. Програму розрахунку виконано на інтерпретованій об'єктно-орієнтованій мові програмування *Python* 2.7. Результат розрахунку для $Re=5$ наведено на рис. 2. На рис. 3 узагальнено результати серії експериментів.

Для узагальнення результатів серії експериментів з різними значеннями критерію Рейнольдса обрано ступеневу критеріальну залежність:

$$\eta_t = \frac{t_{in} - t_{out}}{t_{in} - t_{out}} = C Re^n, \quad (3)$$

де коефіцієнти рівняння для даних умов $C=0,8907$; $n=-0,0543$.

Висновки.

Інтенсифікація гідродинамічного режиму роботи регенератора з насадкою із сітки полотняного плетіння призводить до зменшення температурного ККД і збільшення гідравлічного опору апарату, тому для інженерних розрахунків при проектуванні доцільно обрати температурний ККД в діапазоні роботи аналогів $0,75 \div 0,8$, що відповідає гідродинамічному режиму роботи апарату $Re=10 \div 20$ для сітки полотняного плетіння 2-160-400 НУ ДСТУ 3826-82, при цьому період переключення може відповідати масовій продуктивності циклу 10% від маси матеріалу насадки.

Література:

1. Yevziutin P. Y., Dvoinos Y.G. Parameters of the grid of the plain weaving for the nozzle of the regenerative heat exchanger // Матеріали доповідей XX Міжнародної наукової конференції «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання», 28 квітня 2021 р., м. Київ. / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. – 156 с.
2. Liu, X. H., Jiang, Y., & Qu, K. Y. (2007). Heat and mass transfer model of cross flow liquid desiccant air dehumidifier/regenerator. *Energy Conversion and Management*, 48(2), 546–554. doi:10.1016/j.enconman.2006.06.002.
3. Muralikrishna, S. (1999). Study of Heat Transfer Process in a Regenerator. *Chemical Engineering Research and Design*, 77(2), 131–137. doi:10.1205/026387699526016.
4. Collis, D. C., & Williams, M. J. (1959). Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 6(03), 357. doi:10.1017/s0022112059000696.

References.

1. Yevziutin P. Y., Dvoinos Y.G. Parameters of the grid of the plain weaving for the nozzle of the regenerative heat exchanger // Materialy dopovidei KhX Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii «Resursoenerhozberihaiuchi tekhnolohii ta obladnannia», 28 kvitnia 2021 r., m. Kyiv. / Ukladach Ya.M. Korniienko. – K.: «KPI im. Ihoria Sikorskoho», 2021. – 156 s.
2. Liu, X. H., Jiang, Y., & Qu, K. Y. (2007). Heat and mass transfer model of cross flow liquid desiccant air dehumidifier/regenerator. *Energy Conversion and Management*, 48(2), 546–554. doi:10.1016/j.enconman.2006.06.002.
3. Muralikrishna, S. (1999). Study of Heat Transfer Process in a Regenerator. *Chemical Engineering Research and Design*, 77(2), 131–137. doi:10.1205/026387699526016.



4. Collis, D. C., & Williams, M. J. (1959). Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers. Journal of Fluid Mechanics, 6(03), 357. doi:10.1017/s0022112059000696.

Abstract. *The influence of the hydrodynamic regime of air movement on the efficiency of a regenerative heat exchanger with a nozzle made of linen mesh is analyzed. The results of a series of numerical experiments are generalized, and a correlation dependence is proposed. The conditions of the numerical experiments provided for the calculation of the regeneration period such that through the heat exchanger in each experiment passed in one cycle the same volume of air, which was selected as the volume corresponding to the mass of 10% by weight of the nozzle material. Conclusions on the design of regenerative heat exchangers for air ventilation systems are made.*

Key words: *регенеративний теплообмінник, вентиляція, сітка полотняного плетіння*

Статтю відправлено: 27.04.2021 г.

© Двойнос Я.Г



УДК 66.045.126, 536.24.023

COEFFICIENTS OF CRITERION EQUATION OF HEAT RELEASE GAS TO THE CORRUGATED PLATE

КОЕФІЦІЄНТИ КРИТЕРІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ГАЗУ ДО ГОФРОВАНОЇ ПЛАСТИНИ

Dvoinos Y.H. / Двойнос Я.Г.

c.t.s., assis.prof./к.т.н., ст.викл.

<https://orcid.org/0000-0002-2025-2809>

Italiantsev O.I. / Італьянцев О.І.

master student /магістр

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Kyiv, 37, Prosp. Peremohy, 03056

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського", Київ, пр.Перемоги, 37, 03056

Анотація. проведено серію симуляційних експериментів в системі CFD, для плоского гофрованого каналу при різних гідродинамічних режимах, проаналізовано отримані параметри процесу теплопередачі від газу до стінки. Узагальнено результати, та отримано коефіцієнти критеріального рівняння для плоского гофрованого каналу пластинчастого теплообмінника заданої конфігурації, зроблено висновки.

Ключові слова: пластинчастий теплообмінник, коефіцієнт тепловіддачі, гідравлічний опір

В роботі розглянуто пластинчастий теплообмінник для системи газ-рідина, який може бути встановлено у якості переохолоджувача конденсату парокомпресійної холодильної машини [1].

Для визначення коефіцієнтів критеріального рівняння тепловіддачі від газу до стінки в пластинчастому теплообміннику з гофрованими пластинами використано CFD програмне забезпечення. В симуляційному експерименті було досліджено фрагмент каналу теплообмінника з гофрованими пластинами (рис. 1):

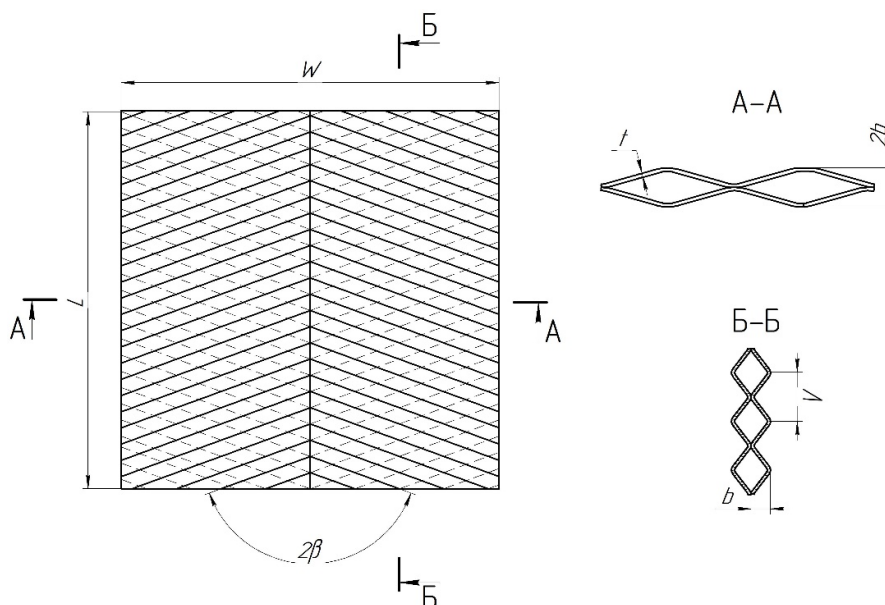


Рис. 1. Конфігурація фрагменту каналу з гофрованими пластинами



ширина каналу $W = 70 \cdot 10^{-3}$ м, довжина $L = 70 \cdot 10^{-3}$ м, товщина стінки каналу $t = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м, теплоносії – фреон R22 (газ), тиск $P = 0,201$ МПа, температура теплоносія на вході в канал $T_1 = 248,15$ К (-25°C), температура стінки $T_{\text{н0}} = 250,15$ К (-23°C) кут шеврона $\beta = 70^\circ$, крок гофри $\Lambda = 6 \cdot 10^{-3}$ м, глибина гофри $b = 2 \cdot 10^{-3}$ м, діапазон значень числа Рейнольдса $\text{Re} = 2000..35000$.

Результати симуляційного експерименту для різних значень продуктивності та критерію Рейнольдса наведено на рис. 2.

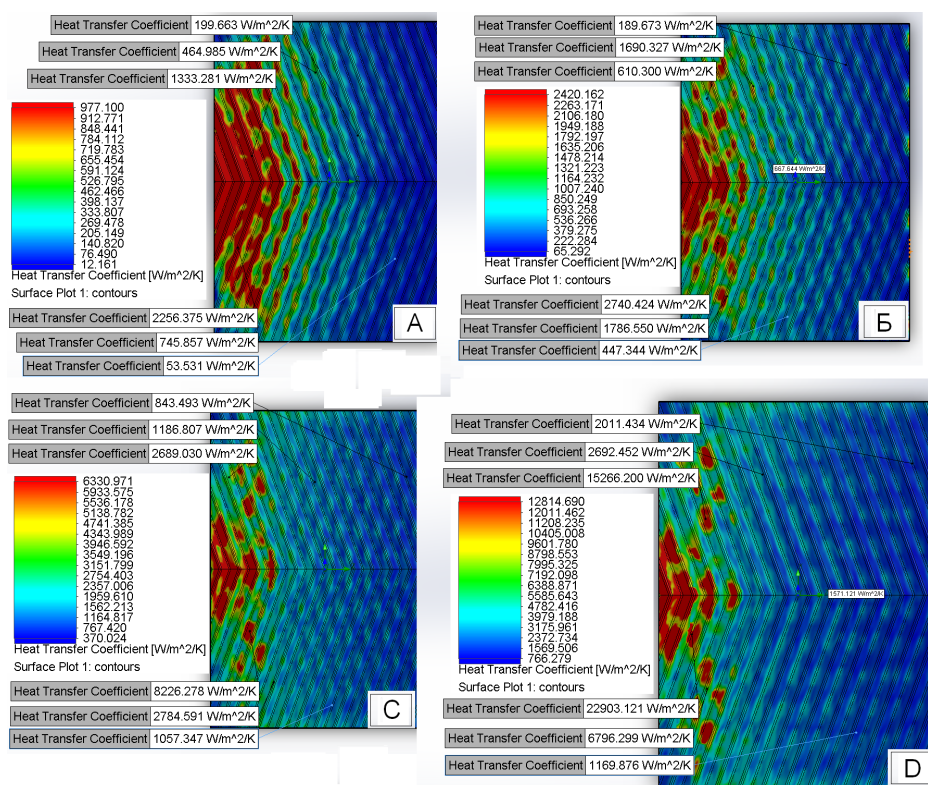


Рис. 2. Результати симуляційних експериментів
 A – $0,003$ кг/с; B – $0,006$ кг/с; C – $0,02$ кг/с; D – $0,03$ кг/с.

Для узагальнення отриманих значень коефіцієнту тепловіддачі використано ступеневу залежність, для значень градієнту тиску – поліном другого ступеня, рис. 3.

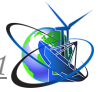
Аналіз отриманих результатів показав, що при значеннях числа Рейнольдса більше 30000 коефіцієнт тепловіддачі майже не змінюється, а градієнт тиску продовжує суттєво збільшуватися. Отже, робочий діапазон ефективної роботи теплообмінника може знаходитись в діапазоні значень числа Рейнольдса до 30000.

Критеріальне рівняння для тепловіддачі газу до гофрованої пласти [2] в загальному випадку:

$$\text{Nu} = c \text{Re}^n \text{Pr}^m, \quad (1)$$

де Nu – середнє значення числа Нуссельта:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}, \quad (2)$$



де α – середнє значення коефіцієнта тепловіддачі, Вт/(м² · К);
 d_e – визначальний розмір, м;
 λ – коефіцієнт теплопровідності теплоносія, Вт/(м · К).

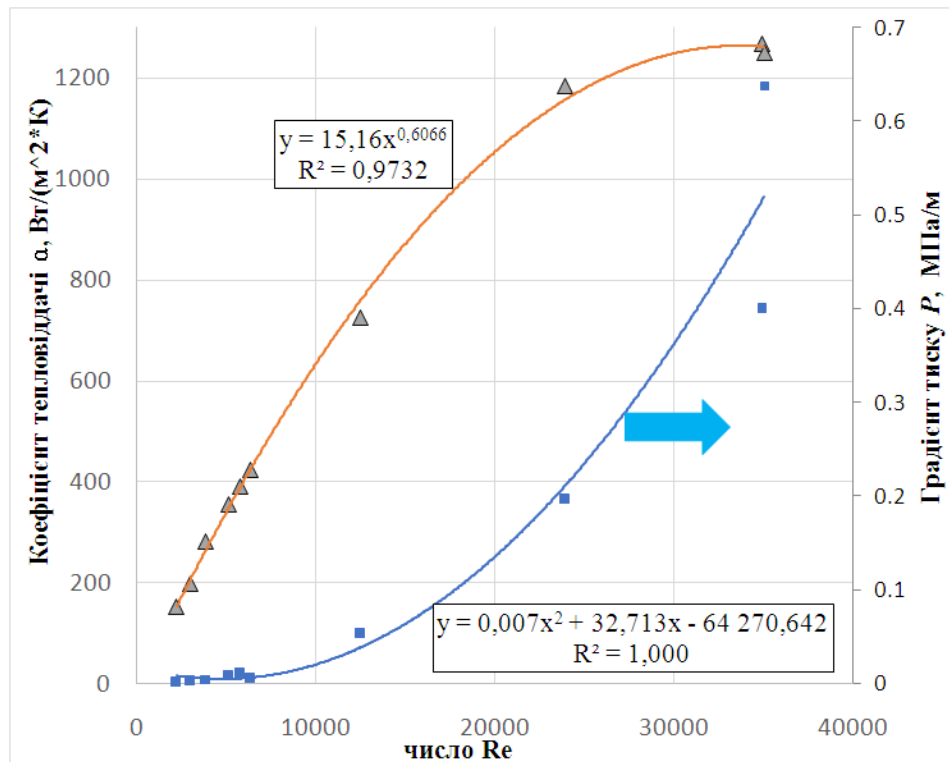


Рис. 3. Кореляційні залежності для коефіцієнту тепловіддачі та градієнту тиску в умовах експерименту
 Δ – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²К); $\square$ – градієнт тиску, МПа/м.

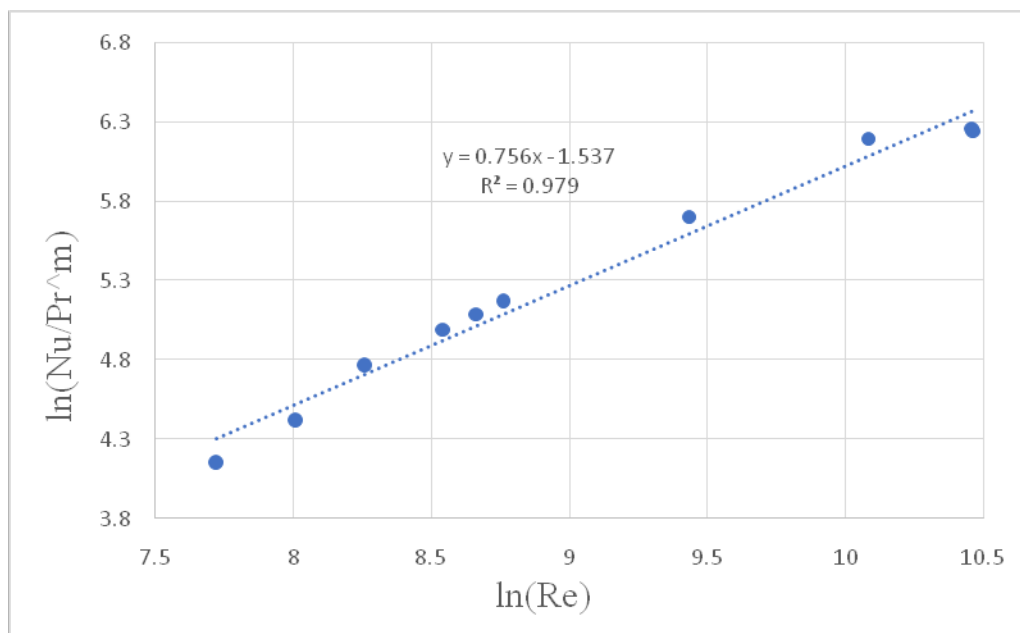


Рис. 4. Графік залежності $\ln(\text{Nu}/\text{Pr}^m)$ від $\ln(\text{Re})$

Після перетворення (1):



$$\ln(\text{Nu}) = \ln(c) + n \cdot \ln(\text{Re}) + m \cdot \ln(\text{Pr}), \quad (3)$$

та враховуючи коефіцієнт $m = 0,4$ для газів [3] знайдено коефіцієнт n та побудовано графік (рис 4.) залежності $\ln(\text{Nu}/\text{Pr}^m)$ від $\ln(\text{Re})$. Відповідно, знайдемо тангенс кута нахилу прямої в прийнятих координатах та одиницях СІ.

Коефіцієнт n апроксимуючої прямої дорівнює 0,7563.

Значення коефіцієнта c :

$$c = \frac{\text{Nu}}{\text{Re}^n \text{Pr}^m}. \quad (4)$$

Підставивши відповідні значення для умов експерименту $c = 0,201$.

Остаточно критеріальне рівняння для тепловіддачі газу до гофрованої стінки має вигляд:

$$\text{Nu} = 0,201 \text{Re}^{0,756} \text{Pr}^{0,4}. \quad (5)$$

Знайдені коефіцієнти в цілому збігаються з даними інших авторів [4].

Висновки.

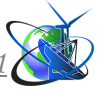
Було отримано коефіцієнти для критеріального рівняння тепловіддачі фреону R22 до гофрованої пластини з кутом нахилу шеврону 70° за умов, наближених до умов в переохолоджувачі конденсату парокомпресійної холодильної машини.

Література:

1. Двойнос Я., Італьянцев, О. (2021) Вибір переохолоджувача конденсату парокомпресорної холодильної машини. *Refrigeration Engineering and Technology*, 57(1), pp 5-12. doi: 10.15673/ret.v57i1.1975.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов – 7-е изд. – М.: Госхимиздат, 1961. – 831 с.
3. Lee, J., & Lee, K.-S. (2014). Flow characteristics and thermal performance in chevron type plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 78, 699–706.
4. Saha, S. K., & Haaris Khan, A. (2020). Numerical Study on the Effect of Corrugation Angle on Thermal Performance of Cross Corrugated Plate Heat Exchangers. *Thermal Science and Engineering Progress*, 100711. doi:10.1016/j.tsep.2020.100711. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100711>

References.

1. Dvoynos, Ya., Italiansev O. (2021) Vybir pereokholodzhuvacha kondensatu parokompresornoï kholodylnoï mashyny. *Refrigeration Engineering and Technology*, 57(1), pp 5-12. doi: 10.15673/ret.v57, i1.1975.
2. Kasatkin A.G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii. Uchebnik dlya vuzov – 7-e izd. – М.: Goskhimizdat, 1961. – 831 s.
3. Lee, J., & Lee, K.-S. (2014). Flow characteristics and thermal performance in chevron type plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 78, 699–706.
4. Saha, S. K., & Haaris Khan, A. (2020). Numerical Study on the Effect of Corrugation Angle on Thermal Performance of Cross Corrugated Plate Heat Exchangers. *Thermal Science and Engineering Progress*, 100711. doi:10.1016/j.tsep.2020.100711. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100711>



Abstract. *A series of simulation experiments in the CFD system was performed for a flat corrugated channel at different hydrodynamic modes, the obtained parameters of the heat transfer process from gas to wall were analyzed. The results are generalized, and the coefficients of the criterion equation for the flat corrugated channel of the plate heat exchanger of the given configuration are obtained, conclusions are made.*

Key words: *plate heat exchanger, heat transfer coefficient, hydraulic resistance*

Статтю відправлено: 27.04.2021 г.

© Двойнос Я.Г.



УДК 620.178.311.62

ESTIMATION OF SENSITIVITY OF DAMPING ABILITY OF STRUCTURES

ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ ДЕМПФУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ

Bovsunovsky A.P. / Бовсуновський А.П.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0001-9562-0250

Nosal O.Yu. / Носаль О.Ю.

student / студент

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Politechnichna, 6, 03056

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського», Київ, Політехнічна, 6, 03056

Анотація. Досліджено чутливість демпфування для діагностики крайової поперечної тріщини в балці на двох опорах круглого поперечного перерізу при згинальних коливаннях. В результаті роботи розроблено формулу для оцінки чутливості характеристики демпфування до пошкоджень типу тріщини.

Ключові слова: демпфування, балка на двох опорах, крайова тріщина, згинальні коливання, діагностика пошкоджень.

Вступ.

Зміна демпфуючої здатності може бути пов'язана з тими чи іншими видами пошкодження конструкції [1]. Проблема полягає в тому, що вплив тріщини на демпфуючу здатність конструкцій залежить від ряду факторів, таких як демпфуюча здатність конструкції в неушкодженому стані, коефіцієнт гнучкості, рівень напружень в околі тріщини. Одним із можливих шляхів вирішення цієї проблеми є розробка методики для діагностики тріщини, яка заснована на підходах механіки руйнування і використовує експериментально-аналітичну залежність між енергією, що розсіюється в тріщині, та розмахом коефіцієнту інтенсивності напружень (KIH) [2].

Основний текст.

Для дослідження характеристики демпфування використовується CAD – модель балки круглого поперечного перерізу з урахуванням наявності в ній крайової поперечної тріщини, яка розташована посередині $L_c / L = 0,5$ з відносною глибиною $\gamma = a/D < 0,4$. Інтенсивність напружень в пошкодженій ділянці валу повинна бути достатньо високою, щоб викликати розсіювання енергії вібрації.

Таблиця 1.

Механічні властивості CAD -моделі

Матеріал балки	Густина матеріалу	Модуль Юнга	Модуль зсуву	Коефіцієнт Пуассона
	$\rho, [кг/м^3]$	$E, [ГПа]$	$G, [ГПа]$	ν
<u>сталь 25Х1МФА</u>	<u>7800</u>	<u>200</u>	<u>80</u>	<u>0,26</u>

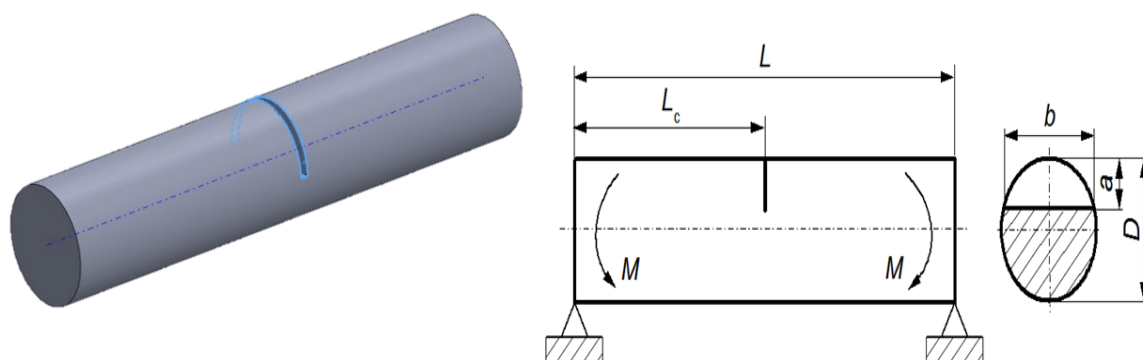


Рис. 1. CAD-модель та розрахункова схема балки круглого поперечного перерізу з крайовою поперечною тріщиною на двох опорах

Авторська розробка

де L – довжина балки, L_c – місце розташування тріщини, a – глибина тріщини; b – ширина фронту тріщини; D – діаметр балки; M – згинальний момент в перерізі з тріщиною.

Для розрахунку логарифмічного декременту коливань δ величина амплітуди напружень становить $\sigma = 10$ МПа. Такий рівень напружень дає змогу запобігти поширенню тріщини під час дослідження.

За умови, що погрішність експериментального визначення характеристики демпфування становить 20%, відносна зміна логарифмічного декременту коливань $\delta_c / \delta = 1,2$ приймається для виявлення тріщин мінімальних розмірів $\alpha_{\text{вимір}}$. $\gamma_{\text{вимір}}$.

Якщо тріщина періодично відкривається і закривається на кожному півциклі вібрації, то логарифмічний декремент коливань може бути розрахований за формулою: [3]

$$\delta_c(\sigma) = \delta(\sigma) + \frac{\Delta U_c(\sigma_c)}{2U(\sigma)} \quad (1)$$

де δ – логарифмічний декремент коливань неушкодженої балки;

U – максимальна енергія деформації;

ΔU_c – енергія, що розсіюється в тріщині;

σ – максимальна амплітуда напружень вздовж балки.

Енергія, яка розсіюється в тріщині, залежить від розмаху KIH [2]

$$\overline{\Delta U_c} = 8,634675 \cdot 10^{-5} \Delta K_I + 3,87315 \cdot 10^{-4} \Delta K_I^2 - 1,29826 \cdot 10^{-5} \Delta K_I^3 \quad (2)$$

де $\overline{\Delta U_c}$ – розсіяна в тріщині енергія, віднесена до одиниці довжини фронту тріщини;

ΔK_I – розмах KIH .

Максимальне значення KIH для крайової тріщини нормального відриву при згині визначається за формулою [4]

$$K_I = \sigma_c \cdot \sqrt{\pi a} (1,105 - 2,6475 \cdot \gamma + 5,6875 \cdot \gamma^2) \quad (3)$$

де $\gamma = a/D$ – відносна глибина тріщини;

D – діаметр балки.



Рівень розсіяної енергії в тріщині визначається за наступним рівнянням:

$$U_c = 2c\Delta\overline{U_c} \quad (4)$$

де $2c$ - довжина фронту тріщини, який для балки круглого поперечного перерізу становить $2c = 2a(D-a)$.

Енергія деформації при згинальних коливаннях визначається за формулою:

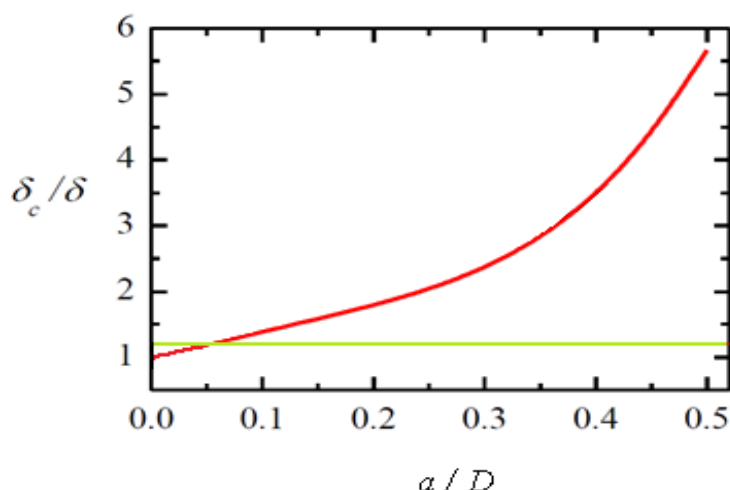
$$U(\sigma) = \frac{\pi D^2 L}{64E} \sigma^2 \quad (5)$$

Таблиця 2.

Мінімальна тріщина, що виявляється в балці круглого поперечного перерізу при згині за умови 20% зміни логарифмічного декременту коливань ($L_c/L = 0,5$)

δ	L/D	$\alpha_{\text{вимір.}} \gamma_{\text{вимір.}} (\delta_c/\delta=1,2)$
0,002	10	0,054
	20	0,104
	50	0,246
	100	0,367
0,02	10	0,367
	20	0,75
	50...100	>0,5
0,2	10	>0,5
	20	>0,5
	50...100	>0,5

Авторська розробка



Залежність відносної зміни логарифмічного декременту коливань від відносної глибини тріщини, при згинальних коливаннях для балки круглого поперечного перерізу ($L/D = 10$; $L_c/L = 0,5$; $\delta = 0,002$; $\delta_c/\delta=1,2$)

Авторська розробка

На основі аналізу вищезазначених результатів розроблено умову достатньої чутливості демпфування для діагностики тріщини.



Відношення енергії, що розсіюється в тріщині ΔU_c до подвоєної максимальної енергії деформації конструкції U має бути більшим або рівним добутку початкової демпфуючої здатності δ конструкції на коефіцієнт, що дорівнює відносній похибці експериментального визначення характеристик демпфування k .

$$\frac{\Delta U_c}{2U} \geq k\delta$$

Висновки.

Спільне використання потужностей сучасної обчислювальної техніки з CAD/CAE-системами дозволяє здійснювати ґрунтовний аналіз поведінки конструкцій при різних умовах експлуатації обладнання.

При проведенні оцінки застосовності демпфування для діагностики пошкоджень слід враховувати такі фактори як: глибина тріщини, місце розташування тріщини, тип тріщини, тип вібрації, демпфуючу здатність неущождженої балки та коефіцієнт гнучкості.

Демпфування, як характеристика для виявлення пошкодження, може бути ефективна лише в тому випадку, якщо навантаження пошкодженої ділянки балки є достатнім для того, щоб закрити або відкрити тріщину при вібраціях конструкції.

Практично всі характеристики демпфування, включаючи логарифмічний декремент коливань, є відносними значеннями: енергія, що розсіюється, пов'язана з енергією деформації механічної системи. Зміна розмірів конструкції (і, отже, зміна коефіцієнту гнучкості) спричиняє зміну енергії деформації конструкції і, отже, впливає на відносну зміну демпфування через тріщину.

Використовуючи підходи механіки руйнування була сформульована умова достатньої чутливості демпфування, яка є досить доцільною та характерною для діагностики пошкоджень валів з тріщиною.

Продовження цього дослідження передбачає перевірку вищезазначеної методики виявлення тріщин на дисках і лопатках турбін різного призначення.

References.

1. Česnik M., Slavič J., Boltežar M. (2012) Uninterrupted and accelerated vibrational fatigue testing with simultaneous monitoring of the natural frequency and damping. J Sound Vibr. 331: 5370–5382. doi: 10.1016/j.jsv.2012.06.022
2. Bovsunovsky A.P. (2004) The mechanisms of energy dissipation in the non propagating fatigue cracks in metallic materials. Eng Fract Mech 71: 2271–2281. doi: 10.1016/j.engfracmech.2004.02.003
3. Rytter A., Brincker R., Kirkegaard P.H. (1992) An experimental study of the modal parameters of a cantilever. Fracture & Dynamics. Paper No.37, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Denmark, 76 p.
4. Kiuchi A., Aoki M., Kobayashi M., Ikeda K. (1982) Fracture strength of surface notched round bar. The Iron and Steel Inst of Japan 68: 1830–1838. doi: 10.2355/tetsutohagane1955.68.13_1830



Abstract. *The sensitivity of damping as applied for the diagnosis of edge transverse crack in the simply supported beam of circular cross-section at bending was investigated. As a result, a formula has been developed to assess the sensitivity of damping ability for the detection of damage.*

Key words: *damping, simply supported beam, edge transverse crack, bending vibration, damage diagnostics.*

Научный руководитель: д.т.н., проф. Бовсуновский А.П.

Статья отправлена: 28.04. 2021 г.

© Бовсуновский А.П., Носаль О.Ю.



UDC 621.314

**SIMULATION OF POWER LOSSES IN THE FREQUENCY CONVERTER
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЧАСТОТЫ****Nerubatskyi V. P. / Нерубацкий В. П.***c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-4309-601X

SPIN: 5106-4483

Plakhtii O. A. / Плахтий А. А.*c.t.s. / к.т.н.*

ORCID: 0000-0002-1535-8991

Hordiienko D. A. / Гордиенко Д. А.*postgraduate / аспирант*

ORCID: 0000-0002-0347-5656

Karpenko N. P. / Карпенко Н. П.*c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-9252-9934

*Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Feierbakh sq., 7, 61050**Украинский государственный университет железнодорожного транспорта,**Харьков, пл. Фейербаха, 7, 61050*

Abstract. The article presents a method of computer simulation of static and dynamic power losses in semiconductor diodes and transistors of the semiconductor converter SIEMENS SINAMICS G110.

Analytical expressions describing static and dynamic power losses in power semiconductor diodes and transistors are given. Mathematical expressions were obtained by the method of polynomial approximation of power characteristics of IGBT modules, on the basis of which the block of calculation of static and dynamic power losses was developed in the Matlab / Simulink program.

A computer model of the SIEMENS SINAMICS G110 frequency converter was developed using blocks from the SimPowerSystem library, on which the study of power loss components was performed.

The results were verified by comparing the simulation data with the data of the frequency converter manufacturer. With the help of the developed unit for calculating power losses, the dependences of power losses on the switching frequency and load current are obtained. The dependences of power losses on the frequency of pulse-width modulation are investigated.

Key words: frequency converter, uncontrolled rectifier, autonomous voltage inverter, pulse-width modulation, static losses, dynamic losses, efficiency.

Introduction. Conversion of AC mains voltage with DC amplitude and frequency into AC voltage with adjustable amplitude and frequency parameters can be performed using a frequency converter, made according to the scheme with a DC circuit [1, 2]. Such a frequency converter includes an input uncontrolled rectifier, the output of which is a smoothing filter and a autonomous voltage inverter (AVI) with pulse-width modulation (PWM) on IGBT-transistor modules [3, 4]. One of the simplest converters of this type is the SIEMENS SINAMICS G110 frequency converter, the scheme of which is presented in Fig. 1. The frequency converter is powered by an AC mains voltage of 220 V and a frequency of 50 Hz. The frequency converter includes an input uncontrolled bridge rectifier on diodes VD7...VD10, a smoothing filter on capacitor C1 and a stand-alone three-phase bridge voltage



inverter on six IGBT-transistors $VT1...VT6$, to which the diodes $VD6$ are connected in opposite direction.

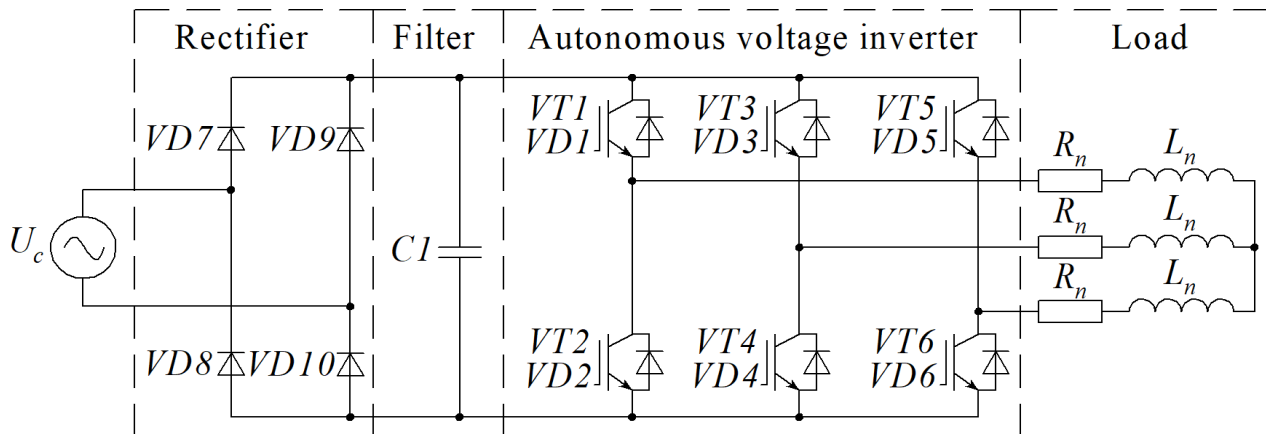


Figure 1 – Structural scheme of the frequency converter

The load of the inverter (R_n, L_n) is included in the diagonal of the AC AVI.

A significant part of the losses occurring in the frequency converter connected to the network, mainly occur in the bridge rectifier, consisting of diodes and losses in the AVI modules, consisting of IGBT-transistors and connected to them reverse diodes [5, 6]. The additional losses that occur in the capacitor on the DC side, the cooling system, the control system in this article are neglected.

In frequency converter, the losses that occur in the uncontrolled rectifier and in the AVI can be critical [7, 8]. In this paper, the losses in rectifier and inverter systems are considered. Currently, for these types of losses, there are different ways to calculate them accurately, but with a rather complex formula and complex parameters. Therefore, these calculation methods are not easy to implement in practice. Therefore, it is necessary to determine the losses in the rectifier circuit and in the AVI circuit by simulation.

The work continues the research performed by the authors in previous years and is based on the results and scientific achievements, partially published in [9–12].

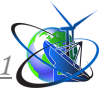
Main text. The reliability and usefulness of the proposed method of modeling the calculation of power losses is assessed by comparing the results given in the documentation of the frequency converter SIEMENS SINAMICS G110, and physical modeling in the MATLAB environment.

Technical data of the SIEMENS SINAMICS G110 frequency converter are given in Table 1.

Table 1

Technical data of the SINAMICS G110 frequency converter

Parameter	Value
Network voltage, V	230
Network frequency, Hz	50
Output power, kW	1.5
Losses, W	118
Efficiency	0.927
Pulse frequency, kHz	8



The SIEMENS SINAMICS G110 frequency converter with a power of 1.5 kW in the diode uncontrolled rectifier uses the brand of the module GBPC2508W, the electrical data of which are given in Table 2.

Table 2

Basic data of the rectifier diode module GBPC2508W

Parameter	Value
Maximum pulse repeating voltage U_{RRM} , V	800
Long direct current I_o , A	25
Maximum peak direct current in one cycle I_{FSM} , A	400
Maximum voltage drop in the forward direction U_{FM} , V	1.1

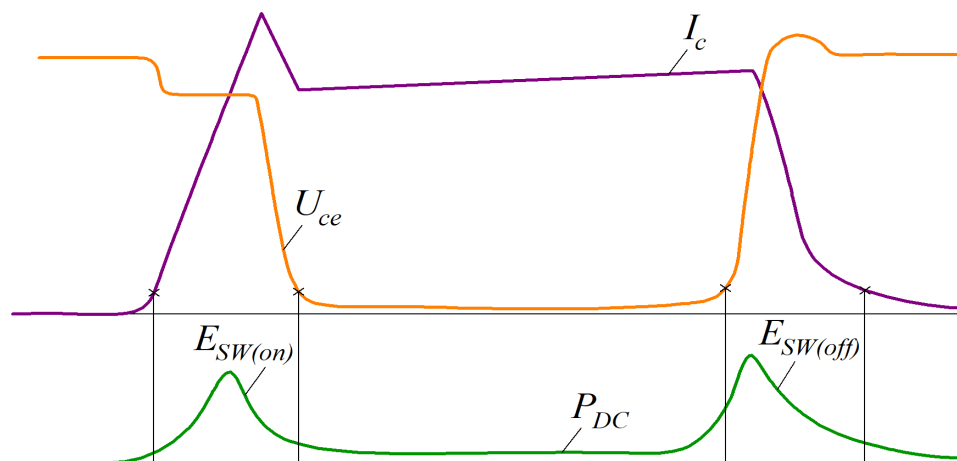
In the Table 3 shows the electrical data of the module of IGBT-transistors with a reverse diode type FS15R06XE3, used in the frequency converter SIEMENS SINAMICS G110.

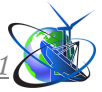
Table 3

Basic data of IGBT transistors and reverse diodes

Parameter	Value
Voltage collector-emitter U_{CES} , V	600
Collector current I_{cnom} , A	15
Repetitive peak collector current I_{CRM} , A	30
Collector-emitter saturation voltage U_{CESat} , V	1.55
Energy loss when turning on E_{on} , mJ	0.25
Energy loss when switched off by the pulse E_{off} , mJ	0.34
Repetitive peak reverse voltage in the diode U_{RRM} , V	600
DC direct current of the reverse diode I_F , A	15
Direct voltage U_F , V	1.6
Reverse reduction energy of diode E_{rec} , mJ	0.16

The process of switching current and voltage in the IGBT-key and the graphical distribution of static P_{DC} and dynamic E_{SW} losses are shown in Fig. 2.

Figure 2 – Distribution of static P_{DC} and dynamic E_{SW} losses



The losses in the IGBT AVI module include conduction and switching losses in the IGBT-transistor and in the reverse diode. Conduction losses in IGBT-transistors occur when the state is on [13, 14].

Losses P_{cond} can be calculated as the product of collector current (I_c) and collector-emitter voltage (U_{ce}) [15, 16]:

$$P_{cond.inv} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (U_{ce}(I_c) \cdot I_c \cdot D_{on}) \cdot dt, \quad (1)$$

where I_c is the collector current; U_{ce} is the collector-emitter voltage; D_{on} is the time during which the IGBT-transistor is in the on state.

Dynamic losses in IGBT-transistors occur during the transition from one steady state to another, ie during the transition from off to on (dynamic on loss) and, conversely, from on to off (dynamic off loss) [17, 18]. Switching energy losses can be varied depending on the device current, voltage, gate resistance and transition temperature [19, 20].

The value of the average power of switching losses is defined as [21]:

$$P_{sw.inv} = [E_{on}(I_c) + E_{off}(I_c)] \cdot f = \int_{t1}^{t2} [(I_c \cdot U_{ce})] \cdot dt + \int_{t3}^{t4} [(I_c \cdot U_{ce})] dt, \quad (2)$$

where $E_{on}(I_c)$ is the power at start-up, which depends on the magnitude of the collector current; $E_{off}(I_c)$ is the energy at shutdown, which depends on the value of the collector current; f is the switching frequency.

Total losses in the frequency converter can be determined by the following expression [22, 23]:

$$P_{FC} = P_{con.rec.} + P_{con.inv.} + P_{SW.inv.} \cdot \quad (3)$$

Switching losses that occur in the frequency converter make a significant contribution to the total losses in the AVI [24, 25]. In order to accurately estimate the efficiency of the frequency converter and increase the reliability of the design, it is necessary to accurately calculate the switching losses [26, 27].

In the Matlab R2019a environment using blocks from the Simulink / Simscape library the scheme of the SIEMENS SINAMICS G110 frequency converter is developed, which is shown in Fig. 3.

The model contains the following blocks:

- block rectifier on diodes $VD7...VD10$, including a smoothing filter on the capacitor CI ;
- unit of autonomous three-phase bridge voltage inverter on six IGBT / diode-transistors $VT1 (VD1)...VT6 (VD6)$;
- unit for calculating the loss in the rectifier and inverter;
- load unit;
- a set of measuring instruments.

The method of approximation determines the mathematical functions that most accurately describe the energy graphs of the dependences $V_{ce}(I_c)$, $V_f(I_f)$, $E_{on}(I_c)$, $E_{off}(I_c)$, $E_{rec}(I_c)$ [28, 29].

Using this calculation method, it is possible to determine the static losses in the uncontrolled rectifier, static and dynamic losses in IGBT-transistors and reverse



diodes AVI, and in general it is possible to quantify the efficiency of the frequency converter [30, 31].

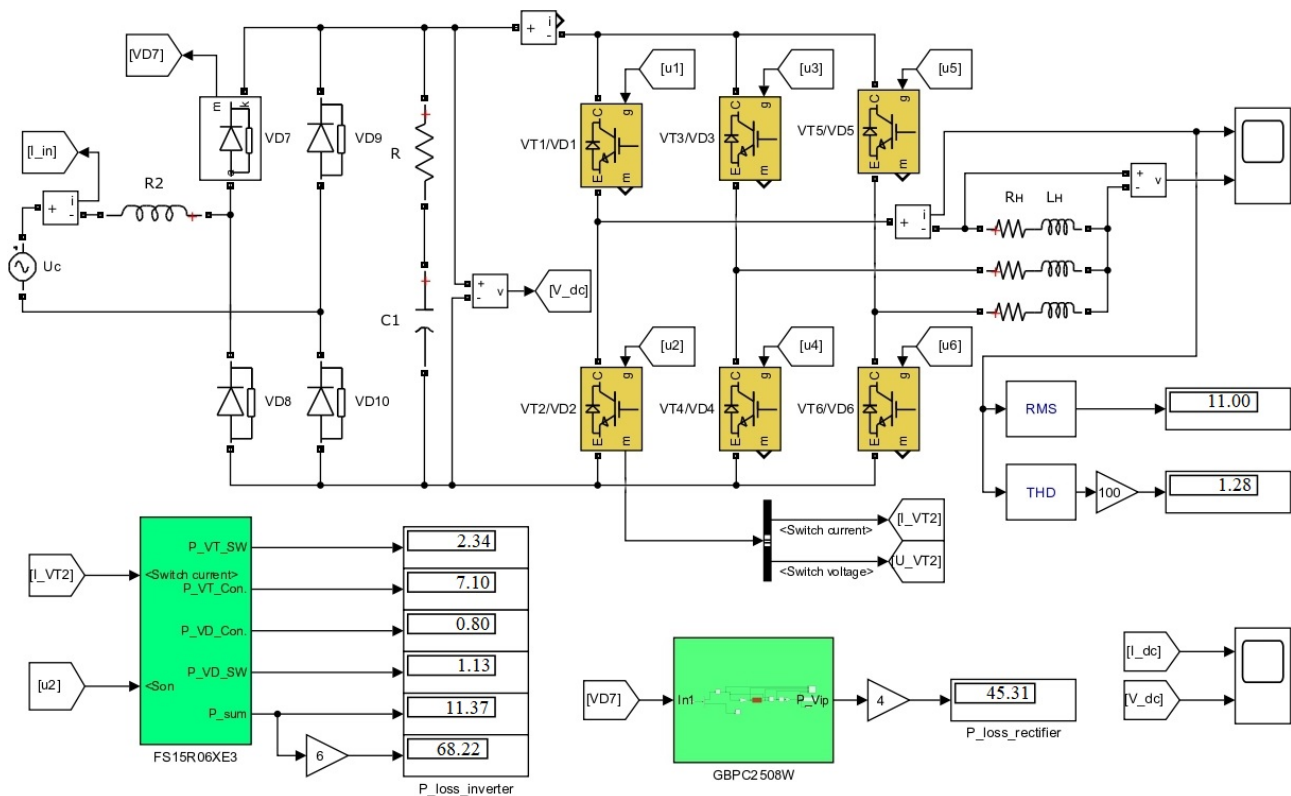


Figure 3 – Model of the frequency converter SIEMENS SINAMICS G110

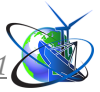
After approximation of power loss graphs of diode uncontrolled rectifier type GBPC2508W and IGBT-transistor module type FS15R06XE3 expressions were obtained. Equation for diode uncontrolled rectifier type GBPC2508W:

$$U_F(I_F) = 0.0277 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^5 - 0.2812 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^4 + 0.9917 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^3 - 1.4921 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^2 + 1.6057 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right) + 0.6551. \quad (4)$$

Equation for IGBT-transistor module type FS15R06XE3:

$$U_{CE}(I_C) = -102775 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^6 + 98467 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^5 - 36327 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^4 + 6505.8 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^3 - 590.76 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^2 + 32.772 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right) + 0.3152; \quad (5)$$

$$U_F(I_F) = -72672 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^6 + 71308 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^5 - 27122 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^4 + 5045.3 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^3 - 481.84 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^2 + 27.018 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right) + 0.4514; \quad (6)$$



$$E_{on}(I_C) = 4.8894 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^4 + 7.928 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^3 + 0.0715 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^2 + 1.8573 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right) + 0.0486; \quad (7)$$

$$E_{off}(I_C) = -15.198 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^4 + 16.984 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^3 - 8.0363 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^2 + 3.6428 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right) + 0.0456; \quad (8)$$

$$E_{rec}(I_F) = 5,4932 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^3 - 5,7025 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^2 + 2,6764 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right) + 0,0792. \quad (9)$$

The block for calculating the power losses of AVI by the method of approximation of loss graphs is shown in Fig. 4, 5.

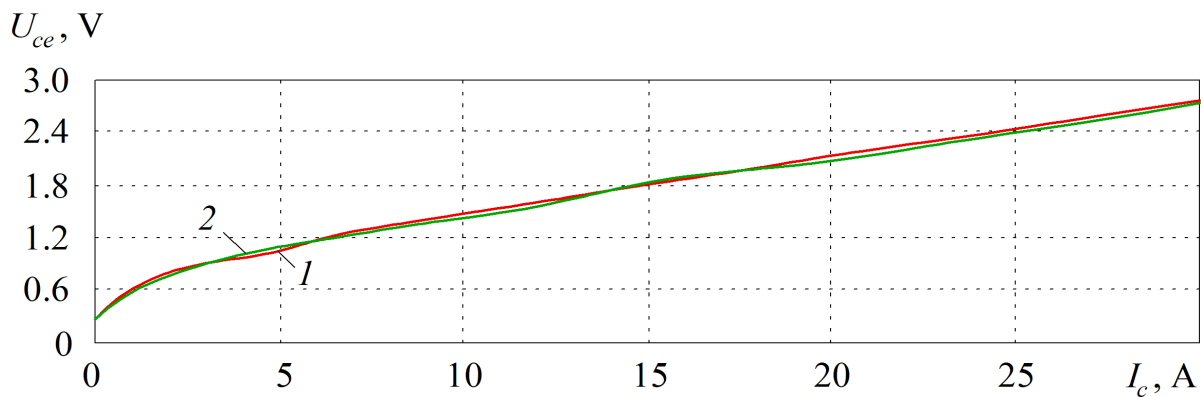


Figure 4 – Saturation voltage of the collector-emitter of the power transistor type FS15R06XE3: 1 – documentation; 2 – approximation

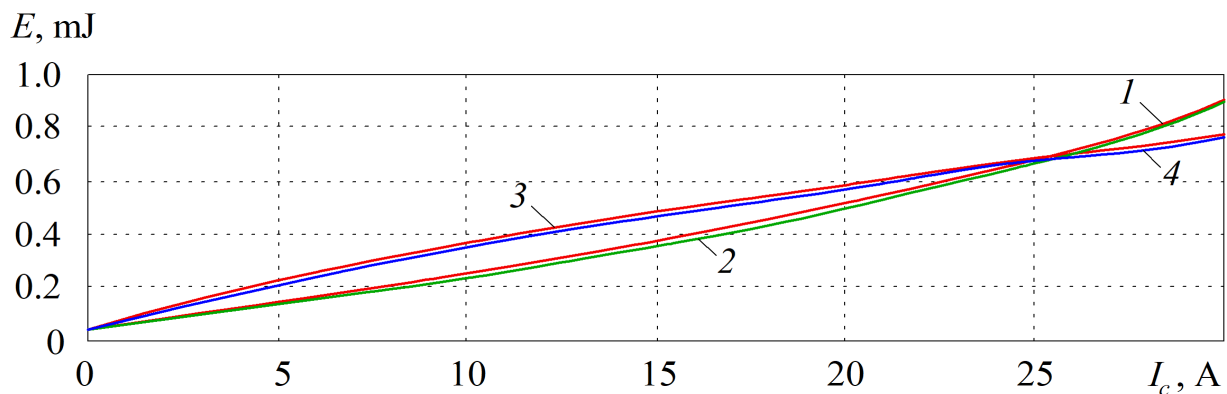


Figure 5 – Power switching characteristics of power transistor type FS15R06XE3: 1 – E_{on} (documentation); 2 – E_{on} (approximation); 3 – E_{off} (documentation); 4 – E_{off} (approximation)

The obtained mathematical dependences quite accurately describe the power graphs of power losses of the diode uncontrolled rectifier and IGBT-transistor module [32, 33].

The block model for calculating the power loss of the reverse diode of the IGBT-transistor module type FS15R06XE3 is shown in Fig. 6.

The control voltage and current of the transistor are used to calculate the static and dynamic power losses of the IGBT-transistor [34, 35].

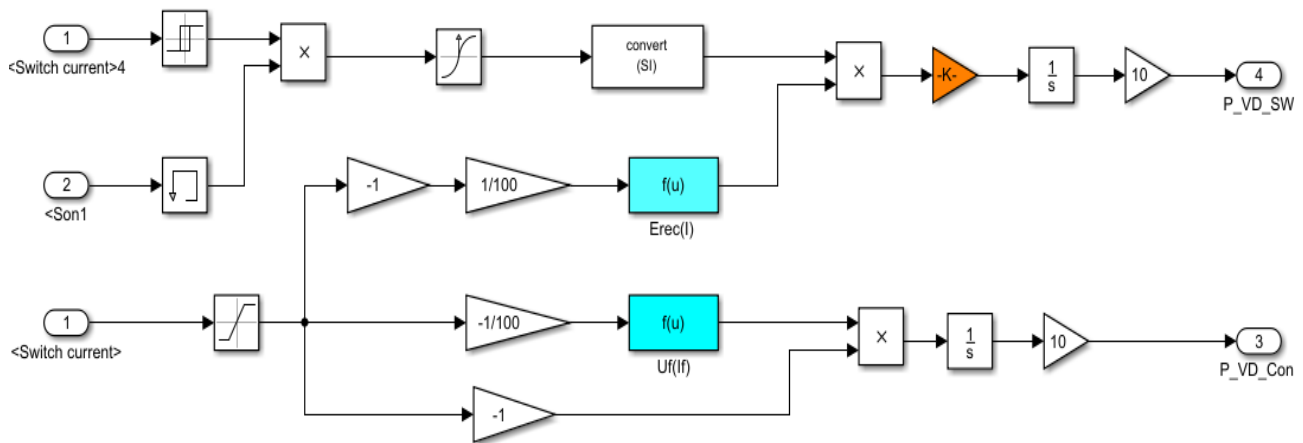
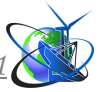


Figure 6 – Block model for calculating the power loss of the reverse diode of the IGBT transistor module type FS15R06XE3

The block model for calculating the power loss of the IGBT-transistor module type FS15R06XE3 is shown in Fig. 7.

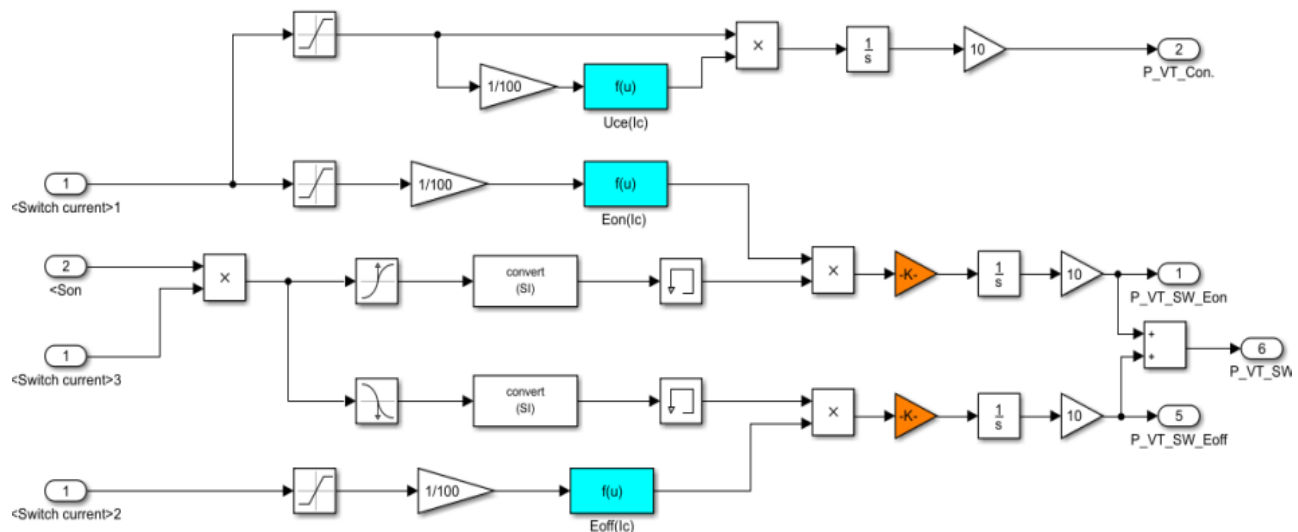


Figure 7 – Block model for calculating the power loss of the IGBT-transistor module type FS15R06XE3

The results of modeling static losses are shown in Fig. 8, and dynamic losses – in Fig. 9. As can be seen from the graphs, the on and off energies depend on the magnitude of the transistor current. To simulate dynamic losses, it is necessary to use the modeling method with a constant calculation step.

To verify the developed model in Matlab, which calculates power losses, a comparison was made with such programs as SemiSel and MelcoSim [36, 37]. The developed method of determination of power losses in power IGBT-transistors is checked. A comparative calculation of power losses using MelcoSim 5.1 for a three-level stand-alone voltage inverter with RL load, as well as the calculation of power losses performed in Matlab using the described methods.

The presented methods for calculating power losses in the frequency converter are implemented in Matlab / Simulink, compare the simulation results with data obtained using the online tool Semikron SemiSel at www.Semikron.com and using



the program MelcoSim 5.4, which are used as a reference test. The interface of the MelcoSim 5.4 program is shown in Fig. 10.

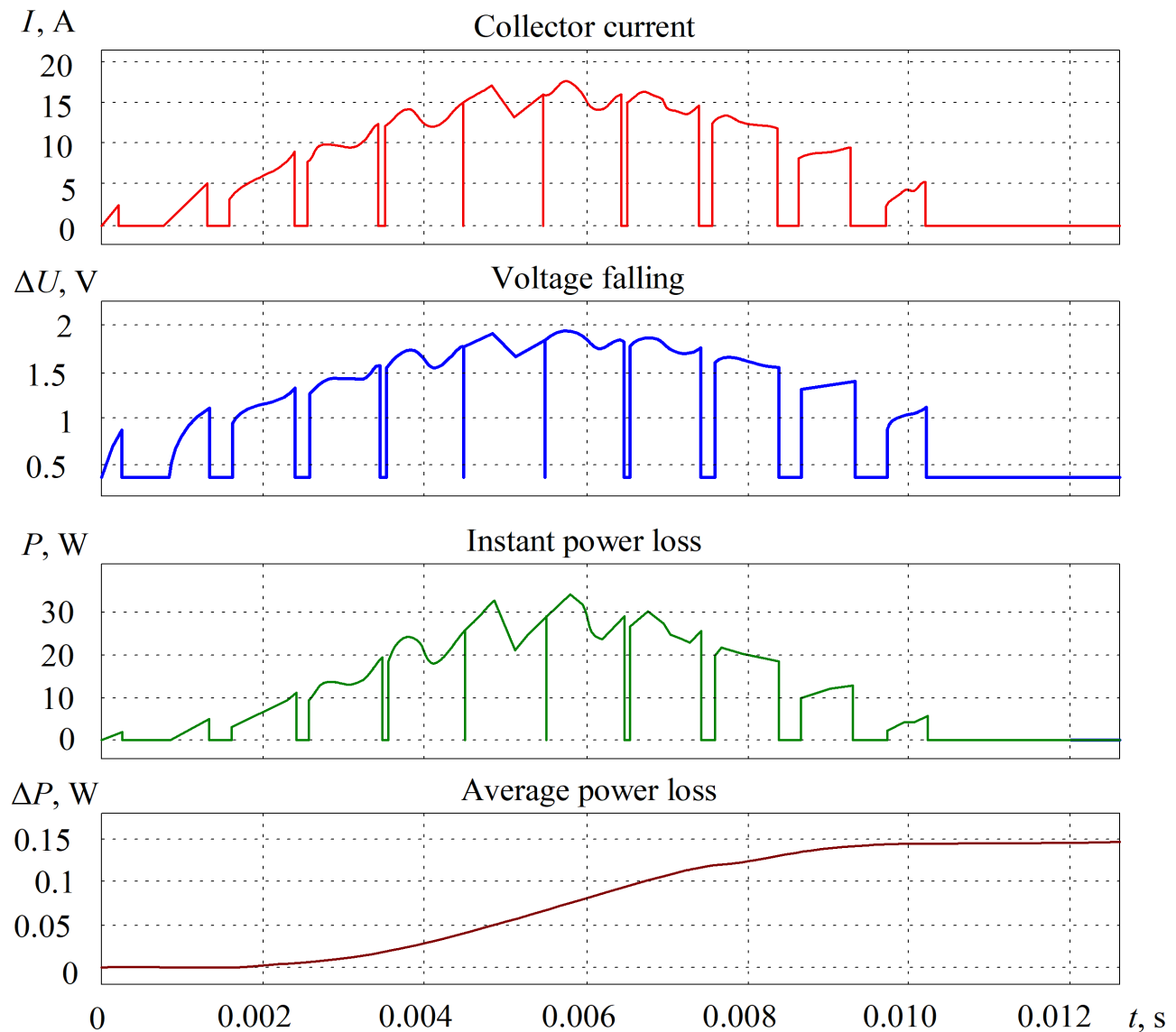


Figure 8 – The results of modeling the static losses of the IGBT-transistor module type FS15R06XE3

The results of the calculation of the loss in the uncontrolled rectifier are given in Table 4, which compares the calculation errors between the online tool Semikron SemiSel and Matlab Simulink.

Table 4
The results of the calculation of power losses in the uncontrolled rectifier type SKKE 15/08

Parameter	Matlab Simulink, W	Semikron SemiSel, W	Error, %
Static losses of the rectifier	24.66	23.66	4.05



The comparison error is 4.05 %, which is an indicator of the adequacy of the model in Matlab / Simulink.

The comparison and verification of the calculation of power losses in the AVI between the programs Matlab / Simulink and MelcoSim 5.4 were also performed. Analysis of the convergence of the calculation results in the programs Matlab / Simulink and MelcoSim 5.4 are given in Table 5.

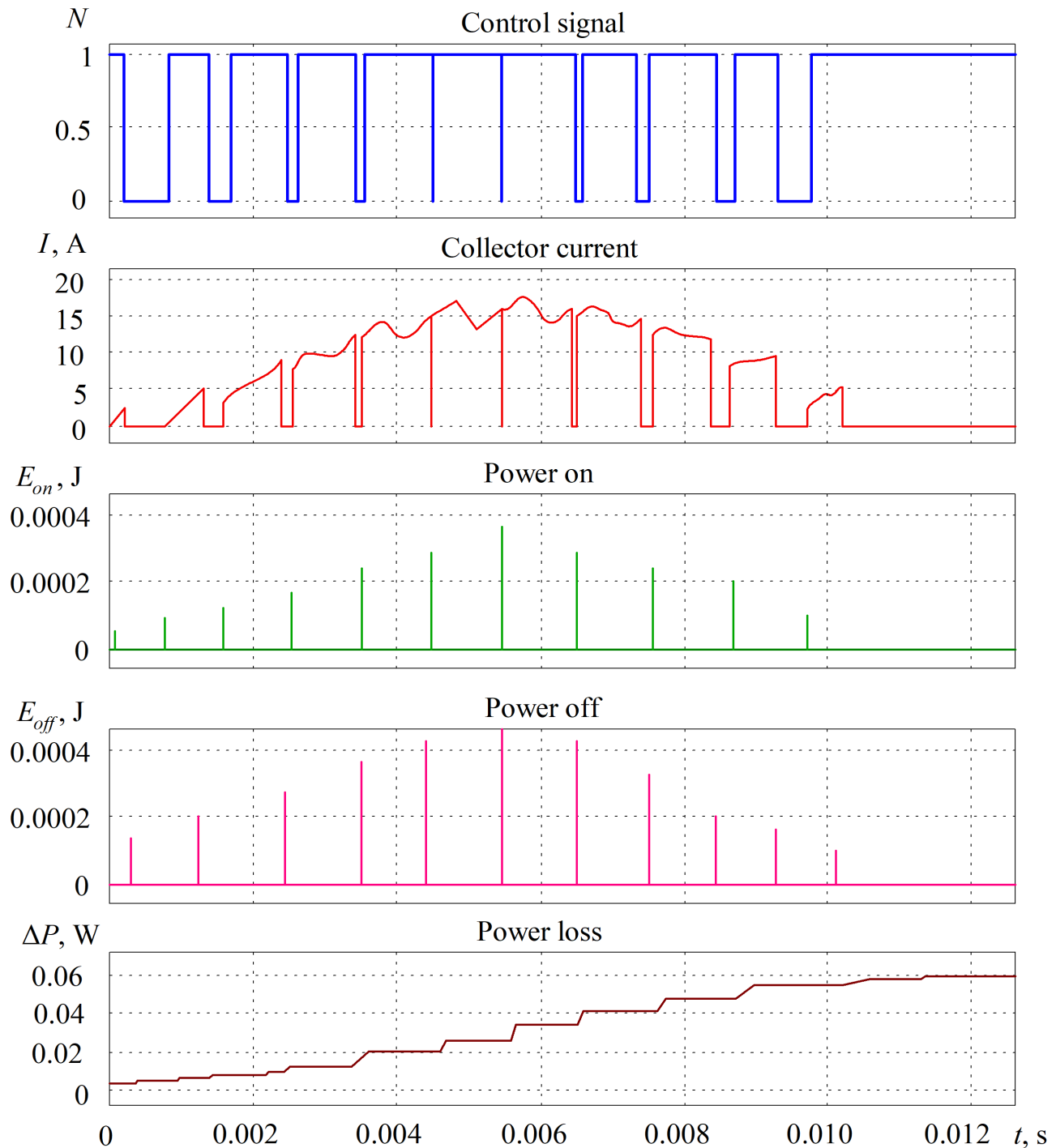


Figure 9 – The results of modeling the static losses of the IGBT-transistor module type FS15R06XE3

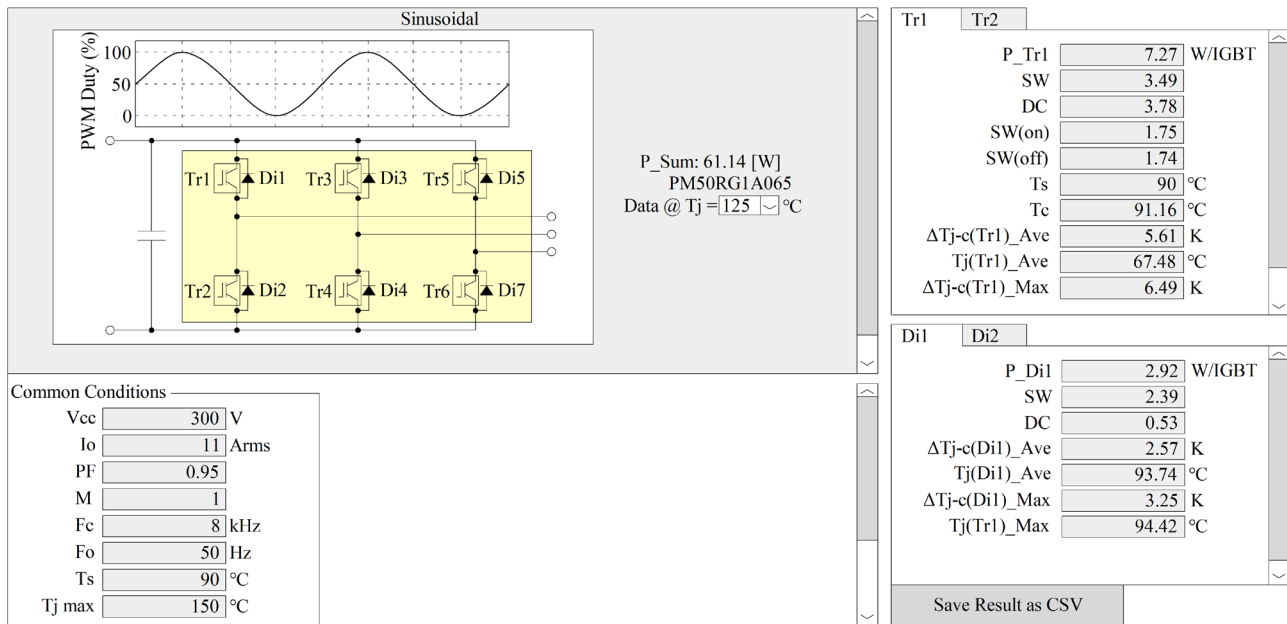
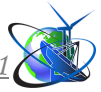


Figure 10 – MelcoSim 5.4 software interface

Table 5

The results of the calculation of power losses in the IGBT-transistor type PM50RG1A065

Parameter	Matlab Simulink, W	MelcoSim 5.4, W	Error, %
Static transistor losses	3.91	3.78	3.32
Dynamic transistor losses	3.62	3.49	3.59
Static losses in the reverse diode	2.49	2.39	4.01
Dynamic losses in the reverse diode	0.55	0.53	3.63

The results of the comparison showed that the discrepancy between the calculation of power losses in the developed model Matlab / Simulink and the calculation performed by the specialized program MelcoSim 5.4, does not give more than 4.1 %.

In the Table 6 shows a comparison between the losses obtained during physical simulation in Matlab / Simulink and the losses reported in the documentation of the frequency converter SIEMENS SINAMICS G110 with a power of 1.5 kW.

Table 6

The results of the calculation of power losses frequency converter in SIEMENS SINAMICS G110 with a capacity of 1.5 kW

Parameter	Documentation frequency converter, W	Matlab Simulink, W	Error, %
Total losses frequency converter GBPC2508W, W	118	113.53 + losses on active resistance	3.78

The results of the comparison between the losses are very close. The comparison error is only 3.78 %, which is an indicator of the sufficient adequacy of the developed model of the frequency converter in Matlab / Simulink.



Summary and conclusions. Losses in the rectifier circuit and in the AVI circuit were determined by the simulation method. A compromise has been reached between the accuracy of modeling in Matlab and programs such as SemiSel and MelcoSim.

Practical methods for calculating losses while maintaining high accuracy were chosen. The reliability and usefulness of the proposed method of modeling the calculation of power losses is assessed by comparing the results given in the documentation of the frequency converter SIEMENS SINAMICS G110 and physical modeling in the MATLAB environment.

The method of simulation modeling is presented, which allows to estimate power losses in power semiconductor converters. This method is used to estimate the power loss in the frequency converter SIEMENS SINAMICS G110 and gave an error of 3...4 % relative to the data stated by the manufacturer. A block of the model is calculated that calculates the loss of conductivity in the uncontrolled rectifier and the losses that occur in the AVI of the frequency converter. This method of calculating power losses can be used in the design and analysis of frequency converters of any power.

To calculate the power losses by the approximation method, mathematical equations are determined that most accurately describe the energy graphs of the dependences $V_{ce}(I_c)$, $V_f(I_f)$, $E_{on}(I_c)$, $E_{off}(I_c)$, $E_{rec}(I_c)$. The obtained mathematical equations quite accurately describe the graphs of power losses.

References:

1. Побєдаш К. К., Святненко В. А. (2017). Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 244 с.
2. Шавьолкін О. О. (2015). Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 403 с.
3. Zhemerov G. G., Krylov D. S. (2018). Concept of construction of power circuits of a multilevel modular converter and its transistor modules in *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 6, pp. 26–32. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.6.03.
4. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. (2021). Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Scientific bulletin of National mining university*, no. 1 (181), pp. 103–110. DOI: 10.33271/nvngu/2021-1/103.
5. Карпова Л. В., Гула І. В. (2015). Застосування IGBT транзисторів для задач керування у силовій електроніці. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, № 2, С. 62–67.
6. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskyi H. (2020). Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multi-level inverters. *International scientific journal «Industry 4.0»*, vol. 5, issue 3, pp. 118–121.
7. Vamanan N., John V. (2018). Dual-Comparison One-Cycle Control for Single-Phase Bidirectional Power Converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 4621–4631. DOI: 10.1109/TIA.2018.2836359.
8. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Кавун В. Є., Машура А. В.,



Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. (2018). Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з різними типами модуляції. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, 180, с. 106–120.

9. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Карпенко Н. П., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. (2019). Аналіз енергетичних процесів у семирівневному автономному інверторі напруги при різних алгоритмах модуляції. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, № 5, с. 8–18. DOI: 10.18664/ikszt.v24i5.181286.

10. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Цибульник В. Р., Гордієнко Д. А., Хоружевський Г. А. (2020). Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з імпедансною і квазіімпедансною ланками у вхідному колі при застосуванні різних алгоритмів модуляції. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, т. 25, № 3, с. 19–31. DOI: 10.18664/ikszt.v25i3.214089.

11. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Kavun V. Ye., Hordiienko D. A. (2019). Active single-phase four-quadrant rectifier with improved hysteresis modulation algorithm. Scientific Bulletin of National Mining University, no. 5 (173), pp. 93–98. DOI: 10.29202/nvngu/2019-5/16.

12. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. (2019). Аналіз енергоефективності трирівневих автономних інверторів напруги в режимі перемодуляції. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, № 4, с. 3–12. DOI: 10.18664/ikszt.v0i4.177089.

13. Kim Y., Oh C., Sung W., Lee B. (2017). Topology and control scheme of OBC-LDC integrated power unit for electric vehicles. IEEE Trans. Power Electron, vol. 32, pp. 1731–1743.

14. Liu T., Feng Y., Ning R., Wong T. T., Shen Z. J. (2017). Extracting parasitic inductances of IGBT power modules with two-port S-parameter measurement. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp. 281–287.

15. Kumar P., Bhowmick B. (2018). A physics-based threshold voltage model for hetero-dielectric dual material gate Schottky barrier MOSFET. Int. J. Numer. Model, vol. 31, pp. 1–11.

16. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. (2021). A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 1, no. 8 (109), pp. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225327.

17. Boram Y., Yeong-Hun P., Ji-Woon Y. (2020). Physics-based compact model of transient leakage current caused by parasitic bipolar junction transistor in gate-all-around MOSFETs. Solid State Electron, vol. 164, pp. 1–12.

18. Safaee A., Jain P., Bakhshai A. (2016). A ZVS pulsedwidth modulation full-bridge converter with a low-RMS-current resonant auxiliary circuit. IEEE Trans. Power Electron, vol. 31, pp. 4031–4047.

19. Mali S. M., Patil Dr. B. (2018). THD Minimization in Multilevel Inverter Using Optimization Approach. International Journal of Engineering Research &



Technology (IJERT), vol. 7, issue 6, pp. 97–100.

20. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A. (2020). Calculation of static and dynamic losses in power IGBT-transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. Scientific bulletin of National mining university, no. 2 (176), pp. 82–88. DOI: 10.33271/nvngu/2020-2/082.

21. Gervasio F., Mastromauro R., Liserre M. (2015). Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. 1123–1128. DOI: 10.1109/icit.2015.7125248.

22. Rainer K., Alberto C. (2016). A physics-based compact model of SiC power MOSFETs. IEEE Trans. Power Electron, vol. 31, pp. 5863–5870.

23. Jin M., Gao Q., Wang Y., Xu D. (2018). A temperature-dependent sic MOSFET modeling method based on MATLAB/Simulink. IEEE Access, vol. 6, pp. 4497–4505.

24. Xie L., Ruan X., Ye Z. (2018). Reducing common mode noise in phase-shifted full-bridge converter. IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 65, pp. 7866–7877.

25. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Sushko D., Hordiienko D., Khoruzhevskyi H. (2020). Improving the harmonic composition of output voltage in multilevel inverters under an optimum mode of amplitude modulation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 2, no. 8 (104), pp. 17–24. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200021.

26. Bashir S. B., Memon Z. A. (2018). An Improved Voltage Balancing Method for Grid Connected PV System Based on MMC Under Different Irradiance Conditions. 2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), pp. 865–868. DOI: 10.1109/MWSCAS.2018.8623947.

27. Ahmed M. R., Todd R., Forsyth A. J. (2017). Predicting SiC MOSFET behavior under hard-switching, soft-switching, and false turn-on conditions. IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 64, pp. 9001–9011.

28. Dias R. A., Lira G. R., Costa E. G., Ferreira R. S., Andrade A. F. (2018). Skin effect comparative analysis in electric cables using computational simulations. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). DOI: 10.1109/sbse.2018.8395687.

29. Wang Q., Cheng M., Zhang B. (2015). An improved topology for the current fed parallel resonant half bridge circuits used in fluorescent lamp electronic ballasts. J. Power Electron, vol. 15, pp. 567–575.

30. Bharadwaj P., John V. (2019). Subcell Modeling of Partially Shaded Photovoltaic Modules. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 3, pp. 3046–3054. DOI: 10.1109/TIA.2019.2899813.

31. Borrega M., Marroyo L., Gonzalez R., Balda J., Agorreta J. (2013). Modeling and control of a master-slave PV inverter with n-paralleled inverters and three-phase three-limb inductors. IEEE Trans. Power Electron, vol. 28, no. 6, pp. 2842–2855.

32. Liu T., Wong T. T., Shen Z. J. (2018). A new characterization technique for extracting parasitic inductances of sic power MOSFETs in discrete and module packages based on two-port s-parameters measurement. IEEE Trans. Power Electron,



vol. 33, pp. 9819–9833.

33. Lee H., Smet V., Tummala R. (2019). A review of sic power module packaging technologies: Challenges, advances, and emerging issues. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron, vol. 8, pp. 239–255.

34. Christen D., Biela J. (2019). Analytical switching loss modeling based on datasheet parameters for MOSFETs in a half-bridge. IEEE Trans. Power Electron, vol. 34, pp. 3700–3710.

35. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. (2020). Intellectual system of traction power supply of electric rolling stock. Applied Scientific and Technical Research: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, April 1–3, 2020, Ivano-Frankivsk Academy of Technical Sciences of Ukraine. Ivano-Frankivsk: Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, vol. 2, pp. 111–113.

36. Yan Q., Yuan X., Geng Y., Charalambous A., Wu X. (2017). Performance evaluation of split output converters with SiC MOSFETs and SiC schottky diodes. IEEE Trans Power Electron, vol. 32, pp. 406–422.

37. Weiss M., Dekker P., Moro A., Scholz H., Patel M. (2015). On the electrification of road transportation – a review of the environmental, economic, and social performance of electric two-wheelers. Transport. Res. Transport Environ, vol. 41, pp. 348–366. DOI: 10.1016/j.trd.2015.09.007.

The article was prepared as part of the support of the grant of young scientists of Ukraine «Development of scientific bases for improving energy efficiency and improving the quality of electricity in electricity networks»

Аннотация. В статье представлен метод компьютерного моделирования статических и динамических потерь мощности в полупроводниковых диодах и транзисторах полупроводникового преобразователя SIEMENS SINAMICS G110.

Приведены аналитические выражения, описывающие статические и динамические потери мощности в силовых полупроводниковых диодах и транзисторах. Методом полиномиальной аппроксимации силовых характеристик IGBT модулей получены математические выражения, на базе которых в программе Matlab/Simulink разработан блок расчёта статических и динамических потерь мощности.

Разработана компьютерная модель преобразователя частоты SIEMENS SINAMICS G110 с использованием блоков из библиотеки SimPowerSystem, на которой проведены исследования составляющих потерь мощности.

Верификация результатов проведена путём сопоставления данных моделирования с данными производителя преобразователя частоты. С помощью разработанного блока расчёта потерь мощности получены зависимости потерь мощности от частоты коммутации и тока нагрузки. Исследованы зависимости потерь мощности от частоты широтно-импульсной модуляции.

Ключевые слова: преобразователь частоты, неуправляемый выпрямитель, автономный инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция, статические потери, динамические потери, коэффициент полезного действия.

Article sent: 04/04/2021

© Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A.,
Hordiienko D. A., Karpenko N. P.



УДК 621.316.825

SEMICONDUCTOR TEMPERATURE SENSORS - THERMORESISTORS**НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ – ТЕРМОРЕЗИСТОРИ****Gorbachuk N.T. / Горбачук М.Т.***PhD, c.p.m.s, as. prof. / канд. ф.-м. наук, доцент*

ORCID: 0000-0001-6059-2464

SPIN: 2993-8149

Shybyryn V.S. / Шибырин В.С.*student / студент**Kyiv National University of Technologies and Design (KNUITD)**Nemyrovycha-Danchenka Street, 2, Kyiv, 01011**Київський національний університет технологій та дизайну (КНУІТД)**вул. Немировича-Данченка, 2, Київ, 01011*

Abstract. A brief overview of information about semiconductor temperature sensors - thermistors. Their types, designs, main characteristics, materials used for manufacturing are considered. Their advantages and disadvantages are noted. The results of experimental studies of samples of thermistors based on dispersed germanium presented.

Keywords: sensors, temperature, thermistors, semiconductors, measurements.

Introduction

Among the many semiconductor devices used today, the leading place belongs to resistors, in particular thermistors - nonlinear semiconductor resistors, the distinguishing feature of which is the significant dependence of their electrical resistance on temperature. Thermistors are used in various fields of technology and science because they help to perform and actually perform a huge number of different tasks and have become one of the indispensable widely used semiconductor devices [1-4].

In recent years in our country and especially abroad, thermistors are widely used in industrial electronics and household appliances: refrigerators, cars, electric heaters, televisions, central heating systems, level gauges, telephone equipment and more. A special place is occupied by the development and use of thermistors in scientific experiments, research, new techniques and technologies. In particular, semiconductor thermistors play an important role in the process of measuring temperature in a wide range of temperatures - from liquid helium temperatures to the climatic range and above, measuring in complex conditions of various external physical influences - strong magnetic fields, radiation and others.

Main section

Thermistor - a semiconductor resistor, the active electrical resistance of which depends on the temperature. Thermistors are available in the form of rods, tubes, disks, washers and beads, and their sizes vary from hundreds of microns to several cm.

In general, thermistors divided into two groups: with a negative temperature coefficient of resistance (TCR) (NTC - thermistors), and respectively with a positive temperature coefficient of resistance (TCR) (PTC - posistors).

Thermistors (NTC) are resistors with a negative temperature coefficient, in which the resistance decreases with increasing temperature. This type of thermistor is



made using powdered metal oxides and the exact composition of these oxides and stabilizers determines the electrical characteristics of the thermistor. They mainly use as resistive temperature sensors and current-limiting devices. The temperature sensitivity factor in such thermistors is five times higher than that of silicon temperature sensors (silistors) and about ten times higher than that of resistive temperature detectors (RTDs). NTC thermistors have a nonlinear temperature dependence on resistance and can withstand temperatures in the range from -55°C to $+300^{\circ}\text{C}$ (and more, depending on the material of manufacture).

Thermistors (PTC) are resistors with a positive temperature coefficient, in which the resistance increases with increasing temperature. They are divided into two groups, based on the materials used in their production, their structure and the manufacturing process. The first group is silistors, which use silicon as a semiconductor material. They are used as PTC temperature sensors due to their linear characteristics. The second group is switching thermistors. This type of thermistors is widely used in PTC heaters, sensors, etc. Polymer PTC thermistors made of special plastic are also included in the second group, they are often used as fuses. The transition temperature in them is usually $60^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$. Silicon PTC thermistors are usually designed for a temperature of $\pm 150^{\circ}\text{C}$, if used above this temperature, they can have a negative temperature factor / 1-3 /.

The main parameters of the thermistor are rated resistance, temperature coefficient of resistance, operating temperature range, the maximum allowable power dissipation.

Nominal resistance is its resistance at a certain temperature (usually at 20°C). Thermistors are produced with certain tolerances from the rated resistance. Nominal resistance of different types of thermistors have values from several Ω to several $\text{k}\Omega$.

Temperature coefficient of resistance (TCR) α_T is a value equal to the relative change in electrical resistance when the temperature changes by one degree.

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (1)$$

Operating temperature range - the range of temperatures in which the thermistor operates.

Maximum allowable scattering power - the power at which the thermistor, located at a temperature of 20°C , is heated by the passage of current to the maximum allowable temperature. Similar to changes in the resistance of thermistors with temperature changes, the scattering power also changes.

The advantages and disadvantages of thermistors include:

Advantages:

- Reliability.
- Sensitivity.
- Compactness.
- Relatively affordable.
- Best for measuring the temperature at one point.

Disadvantages:

- Strong dependence of characteristics on materials of manufacturing.



- Limited temperature range.
- Work poorly at extreme temperatures and their differences.

For the manufacture of sensitive elements of thermistors use different semiconductor materials - silicon, germanium, gallium arsenide and others. These materials can be in volumetric, in the form of films, different levels of alloying and technological processing / 3-6 /.

For example, we have manufactured and studied experimental samples of thermistors based on dispersed germanium obtained under different technological conditions and different levels of dispersion of the starting material. Figure 1 shows the temperature dependence of dispersed germanium samples obtained at pressing temperatures of 500 °C (1) and 700 °C (2).

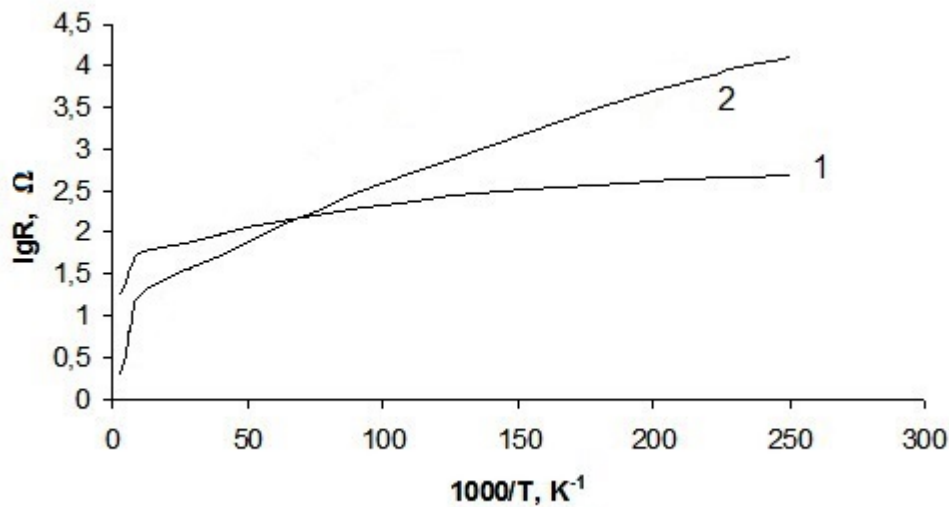


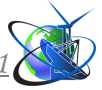
Fig.1. Dependence of electrical resistance of experimental thermistors on temperature. 1 - obtained at a pressing temperature of 500 °C, 2 - at a temperature of 700 °C.

The studies were conducted to obtain optimal characteristics in the region of temperatures of liquid nitrogen (77 K) and liquid helium (4.2 K). From the obtained temperature dependences of the electrical resistance, it is seen that the sensitivity of samples 1 in the temperature region of 4.2 K is approximately 10% / K, and samples 2, respectively, at the level of (50 - 100)% / K. This indicates the high capabilities of this technology to control the characteristics of thermistors and obtain thermistors with high sensitivity in the field of cryogenic temperatures. The technology allows to constructively make thermistors of the small sizes (at the level of 1 mm³) that provides their low inertia.

The temperature dependences of the electrical resistance R can be described by polynomial of the form:

$$\ln R = \sum_{i=0}^n A_i (\ln T) \quad , \quad (2)$$

where A_i - constant coefficients determined by the method of least squares, n - determined from the condition of the smallest approximation error.



Conclusions

In conclusion, even though thermistors are difficult to use at extreme temperatures, they are perfect for measuring at a certain point. They are accurate when used in a limited temperature range to maintain a certain temperature because thermistors are sensitive to even small changes.

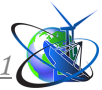
Recent research in the field of development of devices for a wide range of thermometry shows significant achievements / 4-6 /. Microminiature thermistors based on films of semiconductor materials, volumetric material of different levels of alloying and production technologies have been developed.

References:

1. Maklin E. D. Thermoresistors. Radio and communications. 1983, p.208.
2. Bondarenko I. B. Electrорadioelements. Part 1. Resistors. - SPb: SPb NIU ITMO, 2012, p.108.
3. Sheftel I.T. Thermoresistory. Publishing house "Science". 1973, p.416.
4. M .P. Orlova, O. F. Pogorelov, S. A. Ulybin. Low temperature thermometry. Energoatomizdat, Moscow, 1987, p. 280.
5. N.Gorbachuk, M.Larionov, A.Firsov, N.Shatil. Semiconductor Sensors for a Wide Temperature Range. Sensors & Transducers Journal and Magazine, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4.
6. N.S. Boltovets, V.K. Dugaev, V.V. Kholechuk et al., New Generation of Resistance Thermometers Based on Ge Films on GaAs Substrates, Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry 7, 399-404 (2003).

Анотація. Приведено короткий огляд відомостей про напівпровідникові датчики температури – терморезистори. Розглянуто їх види, галузі застосування, особливості конструкції, основні характеристики, матеріали, які використовують для виготовлення. Відзначено переваги та недоліки терморезисторів. Приведено результати експериментальних досліджень температурної залежності електричного опору зразків терморезисторів на основі дисперсного германію, виготовлених при різних температурах .

Ключові слова: датчики, температура, терморезистори, напівпровідники, вимірювання.



УДК 621.39

SELECTION OF EFFICIENT DIGITAL PHASE MODULATION IN
TELECOMMUNICATION SYSTEMВИБІР ЕФЕКТИВНОЇ ЦИФРОВОЇ ФАЗОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ В
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

Pelishok V.O. / Пелішок В.О.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф.

Lviv Polytechnic National University, Lviv, 12 Bandera street, 79013

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, вул. С. Бандери 12, 79013

Shestopal Y.O. / Шестопал Є.О.

Post-graduate student / аспірант

ORCID: 0000-0003-1322-1163

Odessa National A.S. Popov Academy of Telecommunications, Odessa, Kuznechna street 1, 65023

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Одеса, вул. Кузнечна 1, 65023

Semenko A.I. / Семенко А.І.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0002-7043-7801

The Open International University of Human Development "Ukraine",

Kyiv, 23 Lvivs'ka Street, 04071

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»,

Київ, вул. Львівська 23, 04071

Анотація. Для забезпечення потрібних ймовірності помилки приймання сигналу, ширини смуги частот, швидкості передачі сигналу в телекомунікаційних системах зазвичай використовується фазова маніпуляція сигналу. Дана робота присвячена вибору ефективної цифрової фазової модуляції в телекомунікаційній системі.

Важливою характеристикою системи є ймовірність помилки прийому сигналу, яка розраховується з використання інтеграла Гауса і наведення результатів у вигляді таблиць. В роботі використовуються менш трудомісткий метод розрахунків з використанням системи МАТЛАБ.

В літературі зазвичай графічно залежності ймовірності помилки приймання сигналу від відношення сигнал/шум в децибелах, що незручно при їх використанні. В роботі на графіках відношення сигнал/шум позначається в разях, та вказуються значення рівнів позицій М-арного сигналу, що теж саме, що спектральна ефективність систем. Здійснений синтез систем з використанням розроблених методик, що дозволило визначити оптимальні види маніпуляції в системі з наявними параметрами. Проведені дослідження показали, що найкращу енергетичну ефективність забезпечує використання модуляція QPSK (ФМ4), коли здійснюється в 2 рази збільшення швидкості передачі інформації при збереженні ширини смуги пропускання в порівнянні BPSK. Також встановлено, що енергетичні затрати, необхідні для збільшення відношення сигнал/шум для збільшення спектральної ефективності значно перевищують отримане збільшення енергетичної ефективності.

Ключові слова: телекомунікаційна система, фазова модуляція, спектральна ефективність, смуга частот, енергетична ефективність, оптимізація, ймовірність помилки, відношення сигнал/шум.

Вступ.

Фазова маніпуляція найбільш широко використовується в телекомунікаційних системах для забезпечення потрібних ймовірності помилки приймання сигналу, ширини смуги частот, швидкості передачі сигналу. В літературі доволі повно розглянути характеристики даних видів маніпуляції



[1-7], але недостатньо уваги приділяється методу вибору оптимального виду маніпуляції, що розглядається в даній роботі.

Загальна характеристика видів фазової модуляції.

Практично використовують двійкову (В-рівневу, бінарну) та М-рівневу модуляцію[8,9]. При бінарних - високочастотний аналоговий несучий сигнал модулюється 1-м бітом, а при М-рівневих – несучий сигнал модулюється символом, який містить $k > 1$ біт, причому

$$M = 2^k, \quad k = 1, 2, 3 \text{ і т. д.} \quad (1)$$

Між параметрами бінарних та М- рівневих маніпуляцій наявні наступні залежності:

$$E_s = E_b(\log_2 M), \quad (2)$$

$$P_b = P_s/k \quad (\text{для } P_s \ll 1 \text{ при кодах Грея}), \quad (3)$$

$$R_s = R/k, \quad (4)$$

де: E_s , P_s , R_s – для символів: енергія, ймовірність помилки та швидкість передачі, відповідно.

Ймовірність помилок визначається з використанням інтенралу Гауса [8]:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (5)$$

або

$$Q(x) = 0.5 \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2}), \quad (6)$$

де

$$\operatorname{erfc}(x) = \int_x^\infty \exp(-u^2) du. \quad (7)$$

Визначення даного інтегралу досить складне, тому доцільно використовувати функцію $\operatorname{erfc}(x)$, яка наявна в системі MATLAB. Значення P_b , P_s для різних видів фазової модуляції наведені в табл. 1[8-10].

Таблиця 1

Ймовірність помилок в залежності від модуляції

Назва та вид модуляції	Ймовірність помилок
1. BPSK з КД, (v1)	$P_b = Q((2E_b/N_0)^{1/2}), (k=1)$
2. Диф. BPSK з КД, (v2)	$P_b = 2Q((2E_b/N_0)^{1/2})(1 - Q((2E_b/N_0)^{1/2})), (k=1)$
3. BPSK з диф. КД, (v3)	$P_b = (1/2)\exp(-E_b/N_0), (k=1)$
4. MPSK з КД, (v4)	$P_s(M) = 2Q((2E_s/N_0)^{1/2} \sin(\pi/M)), E_s = E_b(\log_2 M), (k \geq 2)$
5. MPSK з диф. КД, (v5)	$P_s(M) = 2Q((2E_s/N_0)^{1/2} \sin(\pi/M/2^{1/2})), E_s = E_b(\log_2 M), (k \geq 2)$

Примітки. 1. КД – когерентне детектування. 2. Для кожного виду цифра після букви v вказує її номер в табл. 1.

Далі використаємо фундаментальні залежності: $W = R_b$ – для бінарних модуляцій, $W = R_s$ – для М-рівневих модуляцій.

Згідно теореми Найквіста для передачі **немодульованих** сигналів необхідна мінімальна смуга частот $W = R/2$, для **модульованих** - $W = R$.

Виконання досліджень

В роботі запропонована методика вибору оптимальних видів фазової модуляції та оцінки їх ефективності.

В табл.2 наведені обрані параметри типових систем радіозв'язку.

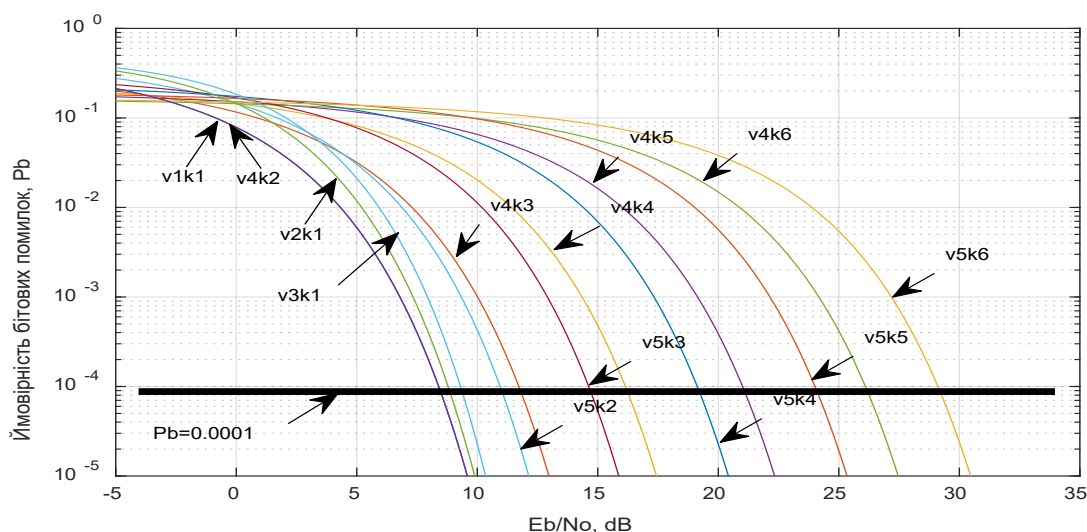


Таблиця 2

Параметри типових систем радіозв'язку

№ системи	Вимоги до систем		Наявні ресурси		R/W
	P_b	R, Мбіт/с	E_b/N_0 в дБ, (размах)	W, МГц	R/W, Мбіт/с/МГц
1	10^{-4}	100	23 дБ, (≈ 200)	20	5
2	10^{-4}	50	16 дБ, (≈ 40)	20	2.5
3	10^{-4}	80	16 дБ, (≈ 40)	20	4
4	10^{-4}	20	8.5 дБ, (≈ 7)	20	1
5	10^{-4}	25	16 дБ, (≈ 40)	10	2.5
6	10^{-5}	50	16 дБ, (≈ 40)	20	2.5

При виконанні досліджень використовуються одержані залежності $P_b(E_b/N_0)$ (рис.1).

Рисунок 1 - Залежність $P_b(E_b/N_0)$ для фазових модуляцій BPSK, MPSK

На рис. 2 наведені модифіковані залежності $P_b(E_b/N_0)$ з використанням запропонованих позначень.

З використанням рис. 2 отримані дані для вибору необхідної модуляції (рис. 3) при $R/W=5$. Видно, що для даної системи, при $E_b/N_0=200$, можна використати лише модуляцію $v4$, $k=R/W=5$ (тобто 32PSK з КД), для якої достатньо значення $E_b/N_0 \approx 158$. Сусідня модуляція $v5$, $k=R/W=5$ вимагає відношення $E_b/N_0 \approx 316$, що на 100% більше від оптимальної модуляції для системи 1 (32PSK з КД) та на 58% більше від наявного відношення $E_b/N_0 \approx 200$.

Враховуючи те, що для вибраної оптимальної модуляції даної системи достатньо значення $E_b/N_0 \approx 158$, можна оптимізувати систему 1, зменшивши наявне значення $E_b/N_0 \approx 200$.

Після вибору оптимальної модуляції для системи 1 представляє інтерес, наскільки вибрана модуляція близька до граничного значення при заданих вимогах та наявних ресурсах.

Для цього в даній методиці використовується одержана з формули Шеннона гранична залежність [7]



$$E_b/N_0 = W/C(2^{C/W} - 1) \quad ,$$

(6)

де C - теоретично можлива максимальна швидкість передачі сигналу.

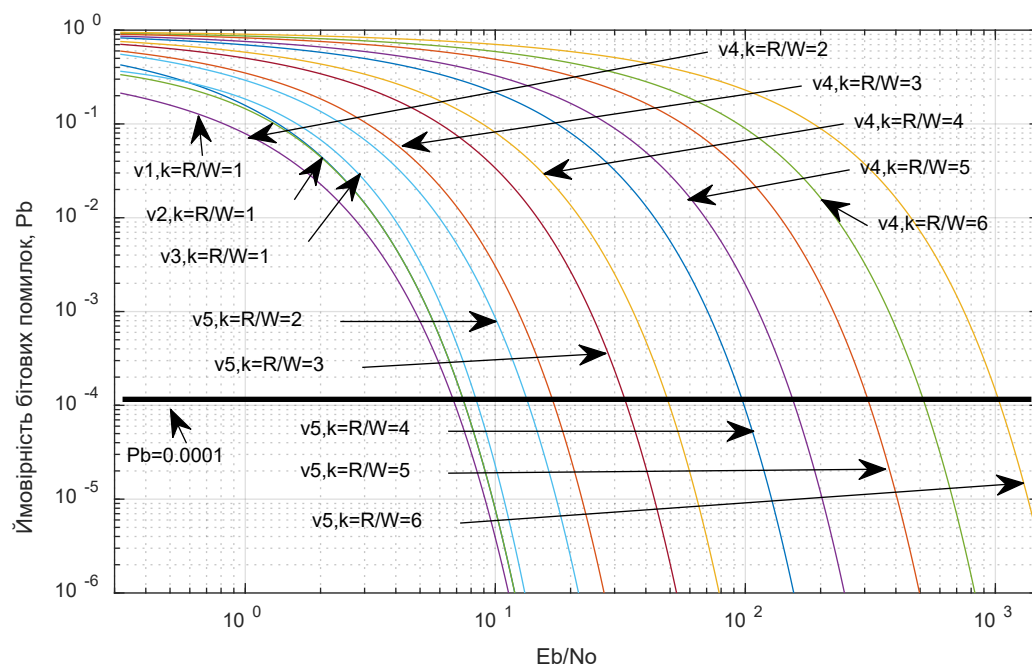


Рисунок 2 - Модифіковані залежності $P_b(E_b/N_0)$ для фазових модуляцій BPSK, MPSK

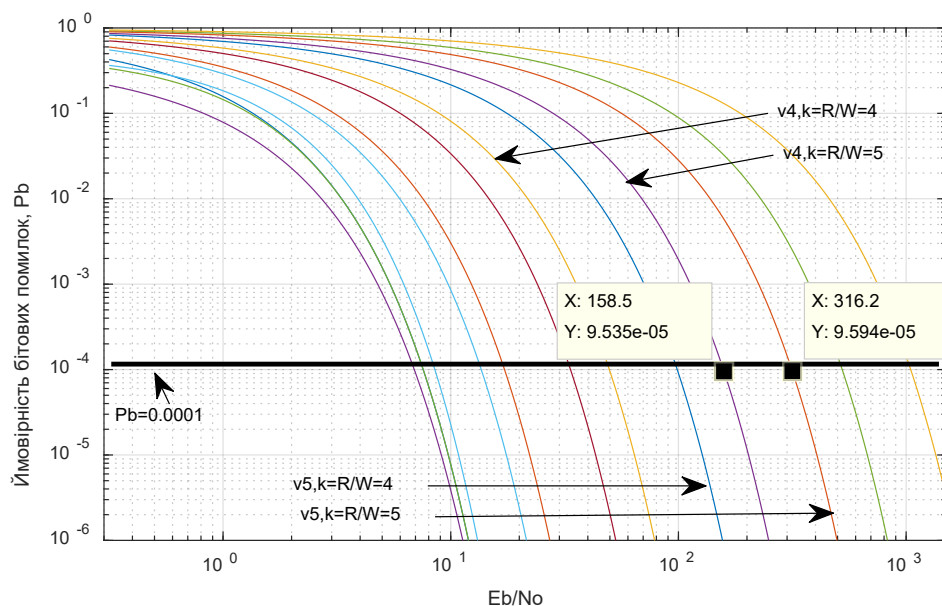


Рисунок 3 - Вибір модуляції для системи 1 (табл. 2)

Результати досліджень показані на рис. 4.

Очевидно, що спектральна ефективність обраної оптимальної модуляції при $E_b/N_0 \approx 200$, становить орієнтовно 50% (5/11) від максимально можливого значення та незначно збільшується при оптимізації системи.

Аналогічно можна знайти параметри оптимальної модуляції для систем 2-5.

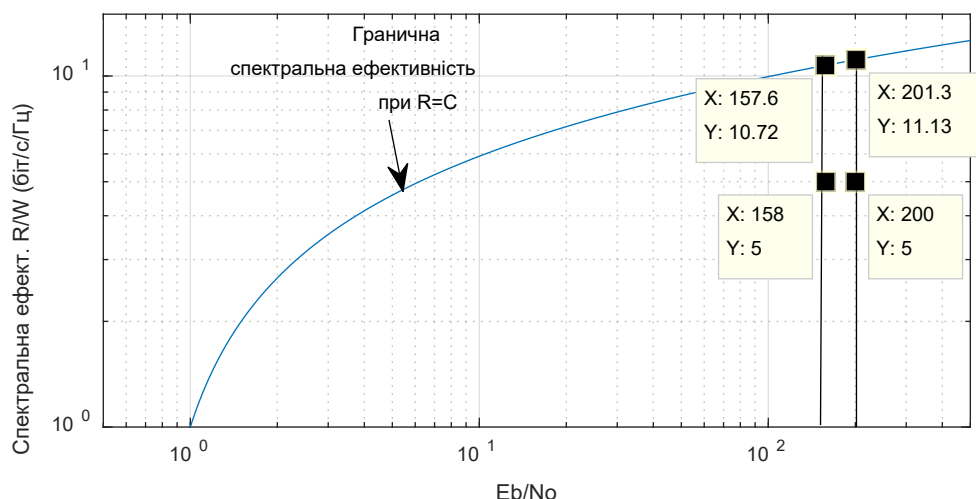


Рисунок 4 - Спектральна ефективність модуляції для системи 1

Ефективність модуляцій можна оцінювати тільки при конкретному значенні P_b . В роботі запропоновано та визначено два показники спектральної ефективності. 1-ий показник вказує, на скільки спектральна ефективність модуляції менша порівняно з її максимально можливим значенням, тобто:

$$E_1 = (R/W)/(R_{\max}/W) = R/R_{\max} \quad \text{при } P_b = \text{const} \quad (7)$$

Модуляція MPSK використовується в системах з обмеженою смугою пропускання. Тобто в таких системах відсутній «запас» щодо можливості розширення смуги пропускання W . Але, при необхідності можна збільшити спектральну ефективність (R/W) за рахунок збільшення відношення E_b/N_o . Тому представляє інтерес, 2-ий запропонований показник спектральної ефективності для M -рівневих модуляцій при переході в них від значення k до значення $k+1$ (при $P_b = \text{const}$, $W = \text{const}$):

$$E_2 = [(R_{k+1}/W)/(R_k/W)] / [(E_b/N_o)_{k+1}/(E_b/N_o)_k] = (R_{k+1}/R_k) / [(E_b/N_o)_{k+1}/(E_b/N_o)_k] \quad (8)$$

В табл.3 наведені результати досліджень ефективності E_2 при $P_b = 10^{-6}$

Таблиця 3

Результати досліджень ефективності E_2 при $P_b = 10^{-6}$

Рівень k	2	3	4	5	6
Рівень $k+1$	3	4	5	6	7
Збільшення R при збільшенні k до $k+1$	50% (3/2)	33% (4/3)	25% (5/4)	20% (6/5)	17% (7/6)
E_b/N_o при k	11	27	77	250	830
E_b/N_o при $k+1$	27	77	250	830	
Збільшення E_b/N_o при збільшенні k до $k+1$	145% (27/11)	185% (77/27)	224% (250/77)	232% (830/250)	
Ефективність E_2 , орієнтовно	34% (50/145)	18% (33/185)	11% (25/224)	9% (20/232)	

Видно, що енергетичні затрати, необхідні для збільшення E_b/N_o , значно (в 3...11 разів) перевищують отримане збільшення енергетичної ефективності



Література.

1. Семенко А. Анализ влияния видов манипуляции сигнала на энергетику радиолинии/ А.Семенко, Н. Бокла, К. Домрачева, Є. Шестопап // Зв'язок. – 2017. – №1. – С. 40–43.
2. Домрачева К. Загальна порівняльна оцінка завадостійкості телекомунікаційних систем /К. Домрачева // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2016. – №3(43). – С. 83–89.
3. Семенко А. І. Радіорелейна лінія зв'язку з покращеними характеристиками/ А. І. Семенко, Н. І. Бокла, К. О. Домрачева., Є. О. Шестопап // Вісник університету «Україна», серія: інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. №1(22), 2019.-С.133-143.
4. Климаш М.М. Проектирование эффективных систем беспроводного зв'язку. /М.М Климаш., В.О. Пелішок. – Львів, 2010. – 324с.
5. Пелішок В. О. Дослідження частотної ефективності вузькосмугових модуляцій / В. О. Пелішок, Т. А. Максимюк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2011. – № 705 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 105-111.
6. Климаш М.М. Технології мереж мобільного зв'язку/ М.М., Климаш, В.О., Пелішок, П.М. Михайленіч.- К.: "Освіта України", 2010. - 624 с.
7. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толюпа. – К.: Лотос, 2018. – 227 с.
8. Скляр Бернанд. Цифровая связь/ Бернанд Скляр. -М., С-Пб., К.: Вильямс, 2004. - 1104 с.
9. Столлингс Вильям. Беспроводные линии связи и сети/ Вильям Столлингс.- Вильямс, 2003. – 640 с.
10. Сукачѳв Э.А. Сотовые системы радиосвязи с подвижными объектами: учеб. пособ. / Э.А. Сукачѳв– [3-е изд., перераб. и дополн.]. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – 256 с.

Key words: telecommunication system, phase modulation, spectral efficiency, frequency band, baud rate, energy efficiency, optimization, error probability, signal-to-noise ratio.

Стаття відправлена: 11.04.2021р.

© Шестопап Є.О.



УДК 620.92(75.8)

MODELING OF THE MATRIX BASE OF DESIGN OF INNOVATIVE EQUIPMENT FOR OBTAINING RENEWABLE ENERGY FROM CO₂
МОДЕЛЮВАННЯ МАТРИЧНОЇ БАЗИ ПРОЕКТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ З CO₂**Grigorieva N. / Григор'єва Н.С.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID 0000-0002-9787-5844

Shabaykovich V. / Шабайкович В.А.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID 0000-0001-6822-9520

Gumeniuk L. / Гуменюк Л.О.*s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID 0000-0002-7678-7060

Humeniuk P. / Гуменюк П.О.*PhD, as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID 0000-0002-6251-8548

*Lutsk National Technical University, Lutsk, Lvivska st. 75, 43018**Луцький національний технічний університет, Луцьк, вул. Львівська 75, 43018*

Анотація. Метою роботи є підвищення ефективності розробки інноваційного устаткування для відновлювальної енергії з CO₂ шляхом використання матричної бази проектування. Для забезпечення мети вдосконалено методику процесу проектування такого інноваційного устаткування. Обґрунтовано необхідність урахування основних технічних показників під час проектування шляхом встановлення взаємозв'язків устаткування, розгляду сукупності необхідних функцій, реалізуючих елементів, вибраних критеріїв. Показано сутність ітераційно-рекурентної розробки одержання конструкцій, що забезпечують ефективну експлуатацію різновидів такого устаткування. Запропоновано методику проектування інноваційного устаткування відновлювальної енергії з CO₂ з використанням класифікаційної матричної бази довільного розширення. Удосконалено метод визначення оптимальних технічних показників, що дозволяє підвищити ефективність процесу розробки. Практична значимість полягає у збільшенні обсягів і прискоренні одержання вуглекислого палива з одночасним очищенням земної атмосфери від парникового ефекту.

Ключові слова: відновлення, енергія, вуглекислий газ, ефективність, паливо, база, уловлювання, матриця, проектування, показник.

Вступ.

У світлі енергозберігаючих технологій та устаткування все більш актуальним стає використання відновлювальної електроенергії. Відновлювальна електроенергія, отримана з CO₂, звільняє споживача від залежності від централізованих енергетичних мереж, скорочує споживання інших видів дорогої енергії. Використання такої електроенергії також торкається питань екологічної безпеки, оскільки сприяє зменшенню небезпечного газу в земній атмосфері.

У країнах Європейського Союзу частка відновлювальної енергії щорічно зростає. Вуглекислий газ, що попадає в атмосферу як продукт згорання палива, повинен приносити користь. Існуючі проекти свідчать лише про початок їх серйозних розробок [1, 2]. Вважається, що витрати на перетворення тони CO₂ в



корисну електроенергію становлять лише 200 \$ [2].

На основі критичного розгляду відомих рішень проблеми, актуальність статті полягає у висвітленні пріоритетних питань отримання відновлюваної енергії з CO_2 при використанні підготовленої бази для розробки інноваційних рішень.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми.

Використання CO_2 для одержання електроенергії є сучасним ефективним напрямом. В публікаціях [3,4] описується загальний підхід до теми. В роботах [5, 6] наводяться також загальні чинники, що впливають на одержання відновлювальної електроенергії. Деякі матеріали присвячені відомих устаткуванням та пристроям, які реалізують цей напрям. Так, у пристрої для перетворення CO_2 у вуглекисле паливо [7] використовуються гарячі та холодні камери. В центрі розміщений ряд з кілець, які обертаються. В середині одної камери встановлений концентратор сонячного випромінювання для нагріву, що приводить до віддачі окислом заліза молекули кисню на одній стороні кільця. В протилежній камері реагуюча сторона кільця обертається, поступово тратить тепло, і уловлювання CO_2 закінчується. Це охолодження дозволяє окислу заліза вернути молекули кисню з CO_2 , залишивши після себе окис вуглецю.

Відомий також пристрій для поглинання CO_2 з виробництвом електроенергії [8], в основі якого лежить технологія перетворення води в електроліт за рахунок пропускання через неї утворених при спалюванні органічного палива газів. Відомий пристрій для одержання електричного струму за рахунок потоку газу чи повітря на п'єзоелементах у вигляді хвилеподібних пластин, розміщених з проміжком в корпусі генератора [9].

Аналізуючи публікації наукових видань, можна зазначити, що для подальших розробок доцільним є усунення їх різноманітності, що породжує конструкційну складність, різницю в їх показниках, недостатній коефіцієнт перетворення енергії повітряних газів у електричну енергію, пов'язаний з відбором лише частини тепла від газів та недостатню екологічність, котра пояснюється тим, що димові гази, крім CO_2 , містять інші елементи. Тому постановкою проблеми для майбутніх досліджень можна вважати як розробку теоретичної частини процесів відновлювальної електроенергії з CO_2 , так і вибір найкращих варіантів відомого технологічного устаткування, їх уніфікацію та розробку методів вдосконалення, як, наприклад, бази розробки інноваційних рішень устаткування відновлювальної енергії з CO_2 . Матеріалів по побудові такої бази не було знайдено.

Задачі дослідження.

Для досягнення поставленої мети підвищення ефективності розробки інноваційного устаткування для відновлювальної енергії з CO_2 шляхом використання матричної бази проектування, необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити особливості устаткування для отримання відновлювальної електроенергії з використанням CO_2 ;
- встановити взаємозв'язок між чинниками, що впливають на ефективність процесів;



- дати загальну характеристику бази розробки інноваційного устаткування з відновлювання електроенергії з CO₂;
- навести приклади сучасного ефективного устаткування для формування бази розробки.

Матеріали і методи дослідження.

Для ефективної розробки інноваційного устаткування відновлювальної енергії з CO₂ необхідна база, яка представляє собою перелік і опис відомих ефективних конструкцій та окремих їх елементів для виявлення майбутніх аналогів і прототипів. На основі встановлених взаємозв'язків устаткування, розгляду як об'єктів і сукупності необхідних функцій, реалізуючих елементів, вибраних критеріїв, розроблена така база, яка має можливість розширення за новими критеріями і поглиблення за рахунок деталізації. Це забезпечує ітераційно–рекурентну розробку різнотипного устаткування для одержання електроенергії з CO₂, котра включає аналіз їх експлуатаційних властивостей, ділення на окремі функціональні вузли, підвузли, деталі. Подібна розробка передбачає рекурентно–замкнуту послідовність одержання технології, конструкції, що забезпечують ефективну експлуатацію різновидів такого устаткування.

Така база математично може бути описана об'ємною матрицею, скомпонованою з простих матриць технічних рішень за окремими напрямками та критеріями (рис. 1). Наприклад, устаткування для уловлювання CO₂, описується різновидами елементів або модулів M_{ijk} перетворення у вуглекисле паливо, зберігання, подачу, тощо.

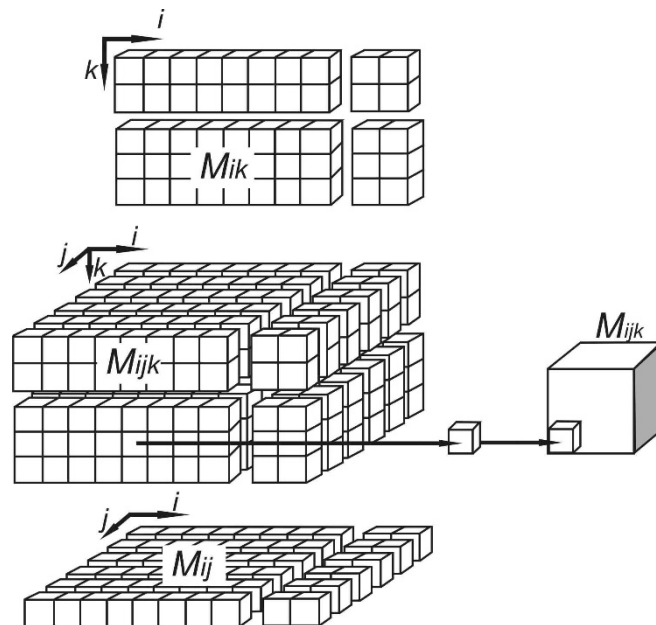


Рис.1 - Схема формування об'ємної матриці розробки відновлювальної енергії з CO₂

Авторська розробка

Під модулем розуміється добре відпрацьована оптимізована одиниця переліку необхідних елементарних робіт багаторазового користування обмеженої номенклатури з характерними рисами автономності, стикування,



зв'язаності та надмірності. Будь-який елемент цієї матриці уточняється за двома іншими критеріями, продуктивністю та точністю, що творить верхню горизонтальну матрицю M_{ij} , а її елемент є початком бокової вертикальної матриці M_{ik} , що конкретизує спосіб уловлювання, тощо. Таким підходом кожний елемент об'єднаної матриці може бути доволіно розширеним, а представлена інформація вичерпною, необхідною для проектування.

Пропонована схема технологічного модуля деталі описується послідовним рядом об'ємних похідних матриць, що розкривають його конструкційні, технологічні та організаційні параметри (рис.2).

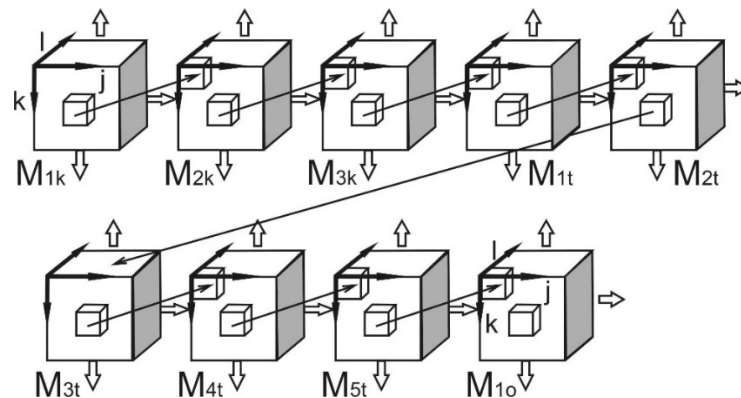


Рис. 2 - Схема способу опису формування відновлювальної енергії

Авторська розробка

На першому місці виступає матриця джерел CO_2 M_{1k} , що описує їх особливості, різновиди за напрямками розширення: рідкі, повітряні та інші. Кожні різновиди при необхідності можуть бути розширені своїми матрицями, які будуються за алгоритмом дерева. Об'ємна матриця M_{2k} описує способи одержання CO_2 з розширенням: після спалювання, до спалювання, після киснево-паливного спалювання. Матриця M_{3k} описує технологію відновлення енергії з CO_2 , M_{1t} - обладнання, M_{2t} - оснащення, M_{3t} - режими відновлення, M_{4t} - транспортування, M_{5t} - зберігання та використання, M_{1o} - техніко-економічну ефективність з бажаними потрібними розширеннями.

Найбільш складним є уловлювання CO_2 . При цьому забезпечується будь-яка бажана деталізація розробки. Об'ємна матриця записується як $M_{ijk} = M_{ij} \cap M_{ik} \cap M_{jk}$, де M_{ij} , M_{ik} , M_{jk} - складові об'ємної матриці, що є її пересіченнями, $\cap$ - логічний добуток „і”.

Без опису об'єктів проводити будь-який їх аналіз, синтез, дослідження, тощо просто неможливо, тому, залежно від ситуації, вибирається короткий чи розширений опис. При інноваційному підході проводиться технічний аналіз і синтез можливих конструкцій устаткування, в яких є відомі технічні рішення і вимагається отримати нове інноваційне. Оскільки в реальних умовах діє безліч чинників, то отримання рішення надзвичайно складне. Механізм отримання інноваційного рішення може розглядатись як чорна скринька, на вхід якої надходить повна інформація про можливі аналоги і прототипи, а на виході знімається інноваційне рішення.

Розроблена наступна методика. На початку аналізується ситуація з



виділенням об'єктів для розробки, формується постановка задачі та її мета, встановлення аналогів і прототипу, виявлення додаткового ефекту та необхідних витрат, аналіз і встановлення напрямків вирішення (інноваційного прориву), корегування задачі та мети розробки, механізм розробки інноваційного рішення з аналізом і синтезом отриманих конкурентних варіантів. Далі встановлюються базові варіанти з їх уточненням, дослідне впровадження інноваційного рішення, корегування рішення, виробниче впровадження. Важливим є правильний вибір ступеню деталізації опису відомих рішень, краще на рівні патентів, оскільки вони беззаперечно інноваційні. Значно збільшити ефективність застосування бази розробки інноваційного устаткування можна за рахунок використання комп'ютеризації та віртуального проектування устаткування, та постійного оновлення бази даних.

При одержанні електроенергії CO_2 поглинається речовинами, які нагріваються чи стравлюються, щоб вивільнити двоокис вуглецю. Концентрований вуглекислий газ далі стискується, транспортується та використовується. Одним з недоліків способу є те, що для уловлювання двоокису вуглецю необхідно використати біля 25% виробленої електроенергії.

Відомо три основні схеми уловлювання CO_2 : видалення вуглекислого газу після спалювання органічного палива, до спалювання та киснево-паливне спалювання [10].

В порядку інновацій винайдений новий пористий, поглинаючий CO_2 матеріал [11], який використовує структуру нового матеріалу NOTT-202a з стільниковою впорядкованістю. Відомий також інноваційний пристрій [12] який використовує сучасну технологію Фішера–Тромпа.

Відомий завод, який випускає авіаційне паливо з CO_2 [13]. За допомогою каталізаторів з атмосферного повітря в реакторі газ очищується і під тиском перетворюється в рідину, яка використовується для промисловості.

Найскладнішим і найвідповідальнішим є уловлювання CO_2 , для чого використовуються різноманітні пристрої, недоліком застосування яких є низька продуктивність. Вибір технології уловлювання CO_2 залежить від багатьох чинників, таких як опрацьованість, практичне застосування, експлуатаційні витрати, тощо. Найефективніші конструкції можуть бути аналогами і навіть прототипами в базі розробки інноваційного устаткування.

Цікавий також пристрій [14], який був прототипом при розробці інноваційного рішення з бази розробки інноваційних рішень, на яке була послана заявка на одержання патенту.

До недоліків, що вимагають виправлення, відноситься недостатній коефіцієнт перетворення енергії димових газів в електричну енергію, низька екологічність, тощо. Ці недоліки були усунуті в пристрої [15] за рахунок введення ємності з CO_2 , реактора з пристосуванням для впливу на газ, ультрафіолетового випромінювання, імпульсної активації газового реагенту, регулювання середньої вихідної потужності.

Результати дослідження.

Отримання відновлювальної електроенергії з CO_2 є перспективним



напрямок, тому важливим завданням є відбір найкращої теорії отримання відновлювальної електроенергії та відповідного технічного устаткування та, хоча б на перших порах, їх часткова уніфікація.

При дослідженні пристроїв для уловлювання CO_2 встановлено, що видалення CO_2 найкраще проводити після спалювання палива та киснево-паливного спалювання.

На основі проведення аналізу була розроблена універсальна установка одержання енергії з CO_2 (рис.3), на яку була отримано патент [16].

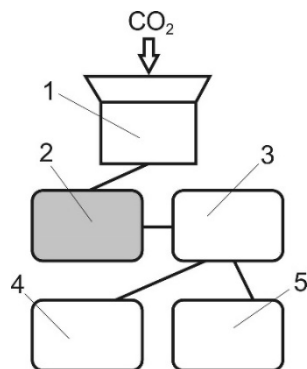
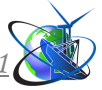


Рис. 3. Блок-схема установки одержання енергії з вуглекислого газу

Авторська розробка

Конструкція складається з уловлювачів CO_2 1, які розміщуються над середовищем з CO_2 , наприклад, трубами електростанцій, котелень, теплових станцій, заводів, тощо. Вловлений CO_2 подається в пристрої 2 перетворення його в рідке паливо за допомогою нових оптимальних каталізаторів, чим автоматично також вирішується проблема глобальної зміни клімату за допомогою очищення земної атмосфери. Рідке паливо зберігається в резервуарі 3 і далі поступає для використання в механічну частину 4 та електричну частину 5. Відомі пристрої, що входять в склад установки, підбираються за критерієм сучасності конструкції та високих техніко-економічних показників. Новим з установці є взаємозв'язок окремих пристроїв, використання двох джерел запасів енергії. Особливо важливим є те, що установка одержання енергії з CO_2 , одночасно і безкоштовно очищає атмосферу від CO_2 . Актуальність установки полягає в невичерпності запасів CO_2 і автоматичному очищенні атмосфери від парникового ефекту. Крім того, установка є універсальною, оскільки одержується та використовується електрична та механічна енергії. Підвищення техніко-економічних показників установки досягається використанням уловлювачів CO_2 , встановлених секційно, наявність електричної та механічної частин.

Перевага проведеного дослідження полягає в комплексному розкритті проблеми уловлювання CO_2 , виготовлення вуглекислого палива, його зберігання та транспортування в місце споживання. Відомі публікації, як правило, розкривають окремі елементи технологій відновлення та відомого устаткування. Можна стверджувати, що закономірним є виявлення впливу головних чинників на ці процеси, особливо взаємозв'язку та техніко-економічних показників. Необхідним є виокремлення їх дії за встановленими



впливами. Саме таким механізмом впливу чинників і бази даних розробки інноваційного устаткування можна досягнути підвищення ефективності відновлення електроенергії з CO₂.

Для одержання раціонального технічного рішення проектування устаткування та оснащення для отримання відновлювальної електроенергії з CO₂ попередньо необхідно вибрати найкращі прототипи серед відомих аналогів і в майбутньому їх кваліфіковано покращувати, використовуючи комп'ютеризацію та бажано віртуальне проектування з інноваційним підходом [17]. Таким чином можна одержати бажані конструкції для використання в промисловості та інших галузях економіки, в тому числі для енергозберігаючих технологій.

Продовження відповідних досліджень одержання відновлювальної електроенергії з CO₂ в найближчому майбутньому було б дуже доцільним оскільки дало б можливість одержання дешевої електроенергії та очищення земної атмосфери від шкідливих парникових газів, а також наявність додаткових джерел в електричних мережах, що сприяє підвищенню надійності електропостачання [18].

Висновки.

В результаті проведених досліджень було встановлено:

- найбільша актуальність і перспективність одержання відновлювальної електроенергії з CO₂, підтверджується подвійною користю – одержанням дешевої електроенергії з невичерпних запасів джерел CO₂ і одночасним очищенням земної атмосфери від шкідливого газу;
- одержання раціональних компоновок технологічного устаткування для відновлювальної електроенергії з CO₂ передбачає спочатку розробку технології відновлення, вибір найкращих зразків, пошук інноваційного рішення та проектування;
- для покращення ефективності розробок слід виділити як типові найкращі зразки устаткування технології одержання вуглецевого палива з наступною їх уніфікацією;
- у більшості випадків в літературі подаються фрагментарні багатопланові описи як теорії, так і устаткування, котрі відрізняються різноманітністю конструкцій та технічними характеристиками, що пояснюється індивідуальними підходами при розробці, організації роботи, різним постачанням і фінансуванням;
- значно підвищити ефективність розробки інноваційного устаткування з відновлювальної електроенергії з CO₂ можна за рахунок використання запропонованої бази даних їх розробок, яка містить перелік з описом найбільш ефективних прикладів таких конструкцій за основними напрямками з їх уніфікацією, а також приклади окремих елементів їх конструкції;
- суттєве покращення розробок забезпечується одночасним використанням запропонованої бази, куди можна швидко і без втрат внести необхідні зміни, особливо при модульній концепції та віртуальній розробці;



- така база розробок може бути описана об'ємною матрицею, скомпонованою зі звичайних матриць технічних рішень за окремими напрямками та критеріями.

Література:

1. Scientists have discovered a way to obtain energy from carbon dioxide. Researchers develop efficient way to make H₂, electricity from CO₂ [Електронний ресурс] // Yonhap News Agency. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://en.yna.co.kr/view/AEN20190604006700320>.
2. Janssen R. Renewable energy into the mainstream / R. Janssen. – Sittard, Netherlands, 2002. – 54 с. – (IEA Renewable Energy Working Party).
3. Global Trends in Renewable Energy Investment 2019 [Електронний ресурс] / A. McCrone, U. Moslener, C. Grüning, F. d'Estais // Frankfurt School UNEP Centre/BNEF. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: http://fsunepcentre.org/fileadmin/gtr/report/Global_Trends_Report_2019.pdf
4. Jacobson M. Z. A Path to Sustainable Energy by 2030 / M. Z. Jacobson, M. A. Delucchi. // Scientific American. – 2009. – № 301. – С. 58–65. doi: 10.1038/scientificamerican1109-58
5. Энергетика: история, современность и будущее. Кн. 2: Понимание и опыт — путь к современной энергетике [Текст] / С. Т. Базеев, Г. Б. Варламов, И. А. Вольчин, С. В. Казанский, Л. О. Кесова; Наук. ред. Ю. О. Ландау, И. Я. Сигал, С. В. Дубовской. – 2013. – 326 с. ISBN 966-8163-11-7
6. Електричні мережі з відновлювальними джерелами енергії [Текст]: навч. посіб. для студентів напряму "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Добровольська Л. Н. [та ін.]; [під ред. Л. Н. Добровольської]; Луц. нац. техн. ун-т. - Луцьк: РВВ Луц. НТУ, 2016. – 351 с. ISBN 978–617-672–1472–0
- 7 Solar Thermochemical Water–Splitting Ferrite–Cycle Heat Engines / [R. Diver, J. Miller, M. Allendorf та ін.]. // Journal Of Solar Energy Engineering. – 2008. – №130(4), 041001. doi:10.1115/1.2969781
8. Harvesting Energy from CO₂ Emissions / [H. Hamelers, O. Schaetzle, J. Paz-García та ін.]. // Environmental Science and Technology Letters. – 2014. – №1. – С. 31–35. doi: 10.1021/ez4000059.
9. Патент РФ . RU2253938с2, МПК H02K 44/08. Способ и устройство для получения электрического тока / В.И. Роговик. З-ка №: 2001135893/09 от 26.12.2001; Опубл. 10.06.2005, Бюл. №16
10. Патент РФ WO2010128877A1/ru, НКИ H02K 44/08. Устройство для получения энергии с дымовых газов / В.А. Матвеев, А.А. Звонов. З-ка № PCT/RU 2009/000216 от 05.05.2009.
11. Boute A. Promoting renewable energy through capacity markets: An analysis of the Russian support scheme / A. Boute. // Energy Policy. – 2012. – №46. – С. 68–77. doi: 10.1016/j.enpol.2012.03.026
12. A partially interpenetrated metal–organic framework for selective hysteretic sorption of carbon dioxide. / [S. Yang, X. Lin, W. Lewis та ін.]. // Nature Materials. – 2012. – №1. – С. 710–716. doi: 10.1038/nmat3343



13. Methanation plant in Falkenhagen opens – important step for a successful energy transition [Електронний ресурс] // Uniper SE. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: https://www.storeandgo.info/fileadmin/press_releases/20181018_Press_Release_Political-Dinner.pdf.

14. Энергоблок теплоэлектростанций: А.с. 1824510, SU. МПК: F23L15/00, F01K7/40 / Л.У. Липец, Л.В. Дирина, Д.М. Будняцкий, Е.И. Бененсон, А.В. Усов и др. – № 4914200/06; Заявл. 26.02.91; Опубл. 30.06.93, Бюл. №24.

15. Патент РФ WO2012138260A1, НКИ C01B 13/10. Устройство для получения озона / Д.А. Васюков, М.А. Гусейнов, Т.А. Коннова, Л.Н. Солодилов. З-ка № РСТ/RU 2012/000263 от 04.08.2011.

16. Патент на корисну модель 145534 Україна, МПК H02K 44/08 (2006.01). Установка для одержання енергії з вуглекислого газу / В.А. Шабайкович, Н.С. Григор'єва, Л.О. Гуменюк, П.О. Гуменюк, Добровольська Л.Н., Собчук Д.С. заявник і патентовласник Луцький НТУ. – № u201911430; заявл. 24.11.19; опубл. 28.12.20, Бюл. № 24.

17. Шабайкович В. А. Сучасне виробництво продукції / В. А. Шабайкович. – Львів, 2014. – 330 с. – (СПДФО «Марусевич»).

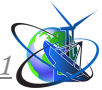
18. Mathematical modeling of operation quality of electric grid with renewable sources of electric energy / P. Lezhnyuk, V. Komar, S. Kravchuk, D. Sobchuk. // Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017. – 2018. – С. 324–327. doi: 10.1109/MEES.2017.8248923

Abstract. The aim of the work is to increase the efficiency of developing of innovative equipment for renewable energy from carbon dioxide by using a matrix design database. To ensure the goal, the methodology of the process of designing such innovative equipment has been improved. The necessity to take into account the main technical indicators during the design by establishing the relationships of the equipment, consideration of the set of necessary functions, implementing elements, selected criteria is substantiated. The essence of iterative-recurrent development of obtaining structures that ensure efficient operation of varieties of such equipment is shown. A method for designing innovative renewable energy equipment with CO₂ using a classification matrix database of arbitrary expansion is proposed. The method of determining the optimal technical indicators has been improved, which allows to increase the efficiency of the development process. The practical significance lies in increasing the volume and accelerating the production of carbon dioxide with the simultaneous purification of the Earth's atmosphere from the greenhouse effect.

Keywords: recovery, energy, carbon dioxide, efficiency, fuel, database, capture, matrix, design, indicator.

Стаття відправлена: 07.04.2021 г.

© Григор'єва Н.С., Шабайкович В.А., Гуменюк Л.О., Гуменюк П.О.



UDK 658.264

ESTIMATION OF BUILDING INSULATION EFFICIENCY UNDER THE CONDITIONS OF CENTRALIZED HEAT SUPPLY WITH BRANCHED HEAT NETWORKS

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ УТЕПЛЕННЯ БУДИНКІВ В УМОВАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ПРИ РОЗГАЛУЖЕННИХ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖАХ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Aleksahin O. O. / Алексахін О. О.*s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-2253-8501

*V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022**Харківський державний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків, 61022***Bilovol H. V. / Біловол Г. В.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-6168-521

*Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feierbakh Sq., Kharkiv, 61050**Український державний університет залізничного транспорту, пл. Феєрбаха, 7, Харків 61050***Boblovskii O. V. / Бобловський О. В.**

ORCID: 0000-0002-3128-5788

*O. M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, 17 Marshal**Bazhanov St., Kharkiv, 61002**Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,**ул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002***Vasylenko O. V. / Василенко О. В.***s.t.s. / к.т.н.*

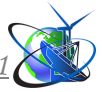
ORCID: 0000-0002-6770-0955

*Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feierbakh Sq., Kharkiv, 61050**Український державний університет залізничного транспорту, пл. Феєрбаха, 7, Харків 61050***Panchuk O.V. / Панчук О.В.**

ORCID: 0000-0002-0852-1543

*Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feierbakh Sq., Kharkiv, 61050**Український державний університет залізничного транспорту, пл. Феєрбаха, 7, Харків 61050*

Abstract. The paper considers the influence of building insulation on the thermal state of distribution pipelines of a centralized heating network for some characteristic laws of changing the flow rate of the heat carrying agent along the length of a heat pipe. Formulas are proposed for determining changes in heat losses by the supply pipelines of a multibranch network serving a group of buildings in the conditions of winterization. The formulas were obtained under the assumption that the heat pipe diameter varies along the length of the network not discretely from site to site, but monotonously from the maximum value at the beginning of the network to the minimum value at the connection to the system of the farthest consumer on a branch. The change in heat carrying agent flow rate along the length of network branches is also assumed to be monotonous. The formulas are obtained provided that the level of decrease in the calculated heating load of all buildings is the same. A comparison of the calculations results by the proposed formulas with the results of calculations obtained with the methods used in the practice of designing heating networks is performed. With a decrease in the design heating load due to building insulation by 60%, the maximum discrepancy in the results does not exceed 5%. The obtained formulas can be used in the development of algorithms for evaluating the effectiveness of alternatives upon thermal modernization of district heating systems.



Keywords: *Centralized heat supply of a group of buildings · Building insulation · Heating system · Multibranch heat network · heat losses in pipelines of a heat supply network.*

Introduction

A feature of the existing heat supply systems in large cities of Ukraine is a high degree of centralization with the availability of a significant number of various heat sources and a complex system of main and distribution heat pipelines. It has now become apparent that despite the shortcomings of centralized heat supply systems, it is impossible to abandon them and move to other forms of organizing the production and distribution of thermal energy in a short time. This is due, first of all, to the need for significant investment in the reconstruction of the system. Therefore, most likely, the transition to heat supply from local heat sources will take place in stages, under the conditions of functioning of the reformed centralized systems. An element of the centralized heat supply systems of cities, where their problems are most concentrated, is the micro-district system. Distribution heat networks of a residential micro-district are characterized by branching and a large total length which significantly exceeds the length of the mains sections.

Most of the buildings that formed the development of micro-districts in Ukraine were commissioned from the middle to the end of the last century. The construction of buildings according to the normative requirements that existed at that time for the thermal resistance of external fences, which were significantly lower than the requirements in Western Europe [1, 2], caused the fact that the rate of thermal energy consumption per 1 m² of heated area in Ukraine exceeds several times the similar indicator in other countries with similar climatic conditions. Therefore, the main reserve of energy saving in the construction sector and municipal heating is to increase the thermal resistance of the elements in the building structures of buildings. For the buildings which are commissioned, this problem can be solved by applying an additional layer of thermal insulation to them. According to various estimates, provided that the actual heat transfer resistance of a building envelope of the commissioned buildings is enhanced up to the level of modern requirements, the heat loss by the building premises can be reduced by 20-40%. Under the conditions of centralized heat supply, when assessing the effectiveness of building insulation measures, it is also necessary to take into account the change in the thermal state of the pipelines of the heating network that supplies heat energy to the insulated buildings. This is explained as follows. It is most likely advisable to carry out a decrease in the supply of heat for heated premises of insulated buildings by decreasing the heat carrying agent temperature before supplying it to the heating system of the building. A decrease in the temperature of the heat carrying agent at the outlet of the heating system and a change in the system water flow for the operation of a heat exchanger lead to a change in the thermal and hydraulic modes of the distribution heat network operation. Reducing the water flow in the sections of the supply and return pipelines of the heat network contributes to more intensive cooling of water and a decrease in heat loss through thermal insulation. The decrease in heat losses in the network sections of the return pipe of the micro-district heating network is due to both a decrease in the heat carrying agent flow rate and a decrease in its temperature at the outlet of the building heating system.



The aim of the work is to obtain analytical dependencies that allow us to carry out preliminary estimates of changes in heat loss through the thermal insulation of the heating network pipelines, taking into account the possible installation of building insulation. It is assumed that all buildings connected to the considered branch of the heating network are insulated.

Literature review

Heat losses from a section of an insulated pipeline with length l_i into the environment are determined by the heat transfer equation [3], which, as applied to the pipelines of heating networks, is used in the form [4]

$$Q_i = \frac{t_m - t_s}{\sum R} L k, \quad (1)$$

where t_m - average heat carrying agent temperature in the section; $\sum R$ - sum of thermal resistances that determine the heat transfer process for a particular method of laying heat networks; k - coefficient accounting for heat loss by structural elements of the heat network (taken depending on the method of laying the heat pipes [5]).

When installing above ground, the ambient air temperature is taken in the capacity of ambient temperature t_s ; with the use of underground laying methods, the soil temperature at the depth of the pipeline axis is taken.

With known specific heat losses q by a pipeline of the given diameter, the heat loss at the section can be calculated from the temperature difference of the heat carrying agent at the input to the section t_b and ambient temperature according to the formula

$$Q_i = q \cdot l_i \frac{t_b - t_s}{\Delta t} k, \quad (2)$$

where Δt - difference between temperatures of the heat carrying agent and the environment at which the specific heat loss through the insulation q are obtained.

Either permissible (normative), or actual losses determined, for example, during thermal tests of networks may be used in the capacity of value q . Using the heat carrying agent temperature at the inlet to the design pipeline section and its cooling within the section, the outlet temperature is determined from the heat balance equation (3); this temperature is the input value for the next calculation section, etc. up to the most distant section of the flow line on the network branch.

$$Q_i = C \cdot G_i (t_b - t_c), \quad (3)$$

where C - the specific heat of the heat carrying agent; t_c - temperature at the outlet of the design pipeline section.

When determining heat losses by pipelines of the return line of the heating network, the calculation begins from the most remote on the branch of the object. The temperature at the end of the design pipeline section is found taking into account heat losses and mixing of the heat carrying agent flow in the main branch pipe and the



heat carrying agent flow from the main pipeline branch. This calculation allows us to get the results with sufficient accuracy, but it is cumbersome and performed for a specific network configuration.

The actual law of heat carrying agent flow rate change along the heat network branch length has a stepwise profile. Within each of the design pipeline sections, the flow rate is constant; the flow rate changes abruptly when the heat carrying agent enters the next section (Fig. 1). A formula suitable for performing estimates of heat carrying agent cooling can be obtained under the assumption that the heat pipe diameter does not vary discretely from section to section, but monotonously from the maximum value at the beginning of the branch (for the supply line) to the minimum at the place where the most distant heat energy consumer is connected to the system. The change in heat carrying agent flow rate along the pipeline length is also assumed to be monotonous.

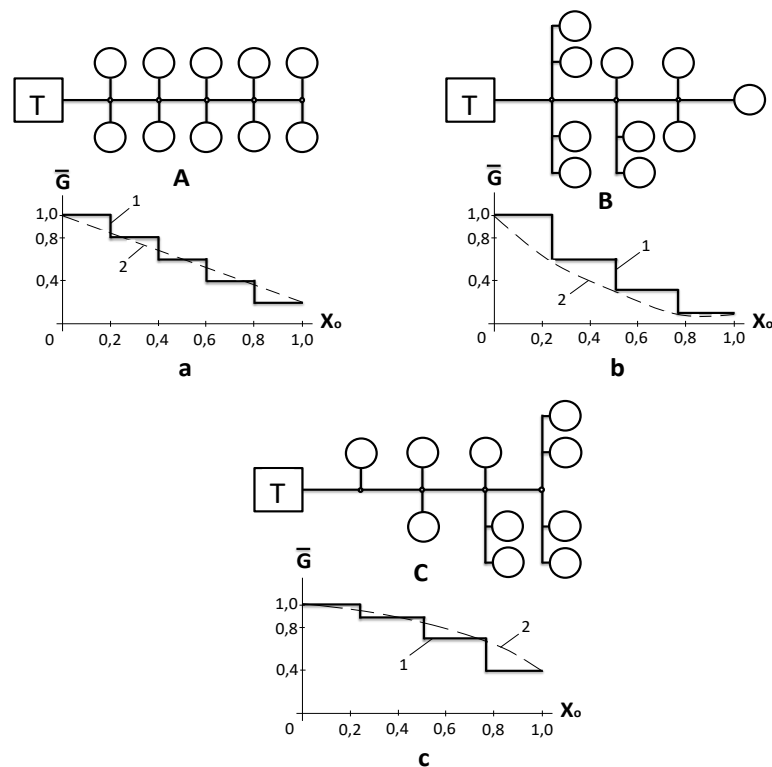


Fig. 1. Heating networks (A, B, C) design schemes and charts for heat carrying agent flow rate change along the length (a, b, c)

A - building; T - central heating station; 1 - the actual flow rate change law; 2 - the accepted law of consumption change.

In the work [6], the results of solving the differential equation describing the heat balance in an elementary section of a network supply pipeline are presented for specified conditions. The results of solving the differential equation for various laws of change in the heat carrying agent flow rate are given in table 1. In the proposed equations $x_0 = x/L$ is a relative current coordinate value counted from the heat carrying agent inlet to the supply pipe, τ_1 is a heat carrying agent temperature at the branch inlet, i.e. at $x_0=0$, G_{max} is heat carrying agent flow rate at $x_0=0$.

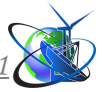


Table 1

Rating dependencies for determining changes in flow rate and temperature of the heat carrying agent along the length of the heating network

Network variant (Figure 1)	The law of heat carrying agent flow rate change along the branch length	Heat carrying agent temperature change
A	$\bar{G} = 1 + ax_0, \quad (4)$ $\bar{G} = G(x_0)/G_{max}$	$t(x_0) = \tau_1 - A_1 \ln(1+ax_0)/a, \quad (7)$ $A_1 = qLk/(CG_{max})$
B	$\bar{G} = (1+bx_0^2)^{-1} \quad (5)$	$t(x_0) = \tau_1 - A_1 (\bar{x}+bx_0^3/3) \quad (8)$
C	$\bar{G} = (1+cx_0)^{-1} \quad (6)$	$t(x_0) = \tau_1 - A_1 (\bar{x}+cx_0^2/2) \quad (9)$

The influence of measures to reduce heat loss through structural elements of buildings on the thermal state of pipelines of heating networks was considered, for example, in [7]. It is shown by the examples of heating networks calculations for groups of buildings, that when adjusting the heat carrying agent temperature at the input to the heating system of an insulated building, heat losses by pipelines of distribution networks are reduced by about 3-7%.

Research methodology

The building's heating complex performance after application of thermal insulation was determined provided that the heating system is connected according to an independent scheme [8] with the use of a heat exchanger. It is assumed that the hydraulic mode of the heating system of the building before and after the insulation is the same.

To find the water temperature in the heating appliances of an insulated building, the heat transfer equation of the heating device (10) and the balance ratio (11) are used.

$$Q_0 = K_o \cdot \Delta t_h \cdot F_o, \quad (10)$$

$$Q_0 = G \cdot C \cdot (\tau_3 - \tau_2), \quad (11)$$

where Q_0 - the heat flow transmitted from the system water to the indoor air; $\Delta t_h = 0,5(\tau_3 + \tau_2)$ - t_L - the difference between the temperatures of the water in the heating device and the indoor air (t_L); τ_3, τ_2 - system water temperature at the inlet and outlet of the device, respectively; F_o - heat exchange area of the heater; G -water flow through the heater.

The heat transfer coefficient of the heater can be determined from the relation [5]

$$K_o = m \cdot (\Delta t_h)^{n_1} \bar{G}^{n_2}, \quad (12)$$

where m - constant factor depending on the design characteristics of the heating appliances; $\bar{G}$ - the relative consumption of system water through the device.

Exponents n_1 and n_2 are constant values for a specific type of heater. In further



calculations, it is accepted that $n_1 = 0.2$; $n_2 = 0$.

The heater's thermal performance after insulating a building can be written as follows

$$Q_{0,N} = \mu Q_0 = K_{0,N} \cdot m(\Delta t_h)^{0.2} = CG_N(\tau_{3,N} - \tau_{2,N}), \quad (13)$$

where $\mu = Q_{0,N}/Q_0$ – coefficient which takes into account the effectiveness of the application of insulation measures; $Q_0, Q_{0,N}$ – heat consumption for heating the building before and after application of insulation measures, respectively (the “N” index in the above notation characterizes the “new” heat transfer conditions after warming).

As a result of transformations, taking into account relations (10) - (11), we obtain expressions for the supply water temperature at the inlet and outlet of the heating device, depending on the value of the building insulation efficiency coefficient μ

$$\tau_{3,N} = \tau_{2,N} + \mu \overline{Q_0} \theta_p, \quad (14)$$

$$\tau_{2,N} = (\tau_2 + 0.5 \overline{Q_0} \theta_p - t_L) \mu^{0.8} - 0.5 \mu \overline{Q_0} \theta_p + t_L, \quad (15)$$

where $\overline{Q_0} = (t_L - t)/(t_L - t_{p,o})$ – relative heating load; t is the current outdoor temperature value; $t_{p,o}$ – heating design temperature of outdoor air in a specific territory; $\theta_p = \tau_{3,p} - \tau_{2,p}$ – design heat carrier cooling in the heating device before the building winterization; $\tau_{3,p}, \tau_{2,p}$ – the heat carrying agent temperatures at the inlet and outlet of the building's heating device before the building winterization at the heating design temperature of outdoor air.

The accepted initial values (before winterization) of the system water temperature in the heating appliances at the design outdoor air temperature are $\tau_{3,p} = 95^\circ\text{C}$ (at the input) and $\tau_{2,p} = 70^\circ\text{C}$ (at the output). The values of the temperature of the system water in the heater for the specified initial data, depending on the coefficient μ values are given in table 2.

Table 2

The system water temperature in the heating device of the insulated building

Building insulation coefficient μ	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
Estimated system water temperature:						
heater input $\tau_{3,p}$	95	88.54	81.96	75.24	68.36	61.3
heater output $\tau_{2,p}$	70	66.04	61.96	57.74	53.36	48.8

The water flow from the distribution heat network for heating the heat-insulated building can be found from the heat balance equation (16) for the heat exchanger of the independent building heating system circuit. Heat balance is written for design outside air temperature



$$G_0 C[\tau_{s,p} - (\tau_{2,N,p} + \Delta\tau)] = G_{0,N} C(\tau_{3,N,p} - \tau_{2,N,p}), \quad (16)$$

where $G_{0,N}$ - water flow rate through the heating system of the heat-insulated building; G_0 - water consumption from the heating network; $\tau_{s,p}$ - water temperature in the supply pipe of the heating network at the entry to the building; $\tau_{3,N,p}$, $\tau_{2,N,p}$ - the heat carrying agent temperatures at the inlet and outlet of the heater in the heat insulated building at the heating design temperature of outdoor air; $\Delta\tau$ - the temperature difference between the heating system water at the outlet of the heat exchanger and the water temperature in the return pipe of the building heating system

Provided that the hydraulic mode of the building heating system does not change as a result of winterization, after the transformations we obtain the formula for the coefficient of water flow from external heating networks for heating the insulated building

$$\beta = \frac{G_s(\mu)}{G_s(\mu=1)} = \frac{\mu[\tau_{1,p} - (\tau_{3p} + \Delta\tau)]}{\tau_{1,N} - (\tau_{2,N} + \Delta\tau)}, \quad (17)$$

where $\tau_{1,p}$ - the temperature of the heat carrying agent in the supply pipe of the heating network at the heating design temperature of the outside air; $\tau_{1,N}$ - the design temperature of the system water in the supply pipe at the input to the heating system of the heat-insulated building; $\tau_{2,N}$ - the temperature at the outlet of the heater of the insulated building at the current outdoor air temperature

The change in heat loss from the heating network pipelines after winterization of the buildings connected to it can be estimated by the formula

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{t_{cp} - t_{\text{exp}}}{t_{cp} - t_{\text{exp}}}, \quad (18)$$

The average temperature on a network branch can be calculated as the arithmetic mean of the values at the heat pipeline input $t(0)$ and output $t(1)$

$$t_{cp} = 0,5[t(0) + t(1)]. \quad (19)$$

To determine the temperature of the heat carrying agent at the corresponding points of the network pipeline we use formulas given in table 1.

Changing the flow rate of system water for heating an insulated building will lead to a change in the value of the complex A_1 in equations (7) - (9). The ratio of the values of the specified complex for a network branch after winterization of buildings and before the winterization has the form

$$A'_1 = A_1 / \beta. \quad (20)$$

The final formulas for evaluation of changes in heat losses from the pipelines of the heating network supply line after building winterization are given in Table 3.



Table 3

Dependencies for determining changes in heat loss from supply pipelines in the case of winterization of all buildings connected to a branch of a heat network

The consumption change law	Change in heat loss	Formula number
$\bar{G} = 1 + ax_0$	$\frac{Q'}{Q} = \frac{a}{a'} \cdot \frac{2a'(\tau_1' - \tau_2) - A_1 \ln(1+a')/\beta}{2a(\tau_1 - \tau_2) - A_1 \ln(1+a)/\beta}$	(21)
$\bar{G} = (1 + bx_0^2)^{-1}$	$\frac{Q'}{Q} = \frac{2(\tau_1' - \tau_2) - A_1(1+b'/2)/\beta}{2(\tau_1 - \tau_2) - A_1(1+b/2)/\beta}$	(22)
$\bar{G} = (1 + cx_0)^{-1}$	$\frac{Q'}{Q} = \frac{2(\tau_1' - \tau_2) - A_1(1+0.5c')/\beta}{2a(\tau_1 - \tau_2) - A_1(1+0.5c)/\beta}$	(23)

In formulas (21) - (23) τ_1 , τ_1' are the temperature of the heat carrying agent at the output from the central heating point to the supply pipe of the microdistrict network before and after the buildings are heat-insulated, respectively. In the context of the practical implementation of measures to winterize the buildings of the microdistrict, the heating network of which includes several branches, it is possible that individual buildings are already insulated, and winterizing work in the remaining buildings is still on-going. In this case, the temperature at the output from the unified control centre for thermal and hydraulic regimes of the microdistrict, which is the central heating unit, will be the same at the input to all heating complexes of buildings and equal to the value required for heating buildings without heat insulation. With equal temperatures $\tau_1' = \tau_1$, the calculation formulas given in table 3 are simplified. In addition, when all buildings on the branch of the heating network are heat-insulated, the requirement on equality of coefficients $a' = a$, $b' = b$, $c' = c$ in equations (21) - (23) is satisfied. After completion of the winterization of all buildings in the microdistrict, it is possible to switch the heating system of the microdistrict to a new lower temperature schedule. In this case, the inequality $\tau_1' \neq \tau_1$ is satisfied.

Results

The calculation results according to the proposed formulas were compared with the results of the heat losses calculation according to formulas (2), (3), taking into account the actual flow distribution along the length of the branch and cooling of the system water in the sections of the heating network. The calculations were performed for idealized building groups shown in Fig. 1, consisting of buildings with the same maximum heat consumption for heating $Q = 0.25 \text{ MW}$. The diameters of the network section pipelines were found proceeding from the heat loads of the corresponding sections in the hydraulic calculation, provided that the specific pressure loss due to friction is within $30 \leq R \leq 50 \text{ Pa} / m$. The lengths of design sections for the individual network variant are the same. Their values are found from the condition of equality of the material characteristics of the network as a whole, which for all the considered variants was taken equal to $M = \sum_{i=1}^n (l_i d_i) = 113.2 \text{ m}^2$ (l_i is the length of the



section, d_i – diameter, n - the number of design sections). Specific heat losses through insulation are accepted at the level of normative values for Ukraine during underground installation of heat pipes in crawlways [6]. Heat losses by the structural elements of the heat network are taken into account by the coefficient $k = 1.15$ [7]. The calculations were carried out for the heating design temperature of outdoor air, which is for the climatic conditions of the city of Kharkov is $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. The mains water temperature at the input to the heating network before winterization of buildings is assumed to be $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. The system water temperature in the heating appliances at the design outdoor air temperature before the buildings were heat-insulated is $\tau_{3p} = 95^{\circ}\text{C}$ (input to the heating system) and $\tau_{2p} = 70^{\circ}\text{C}$ (output from the heating system).

Characteristics of the variants considered are given in table 4. The calculations were performed for cases of building heat insulation without changing the heat supply temperature schedule $\tau_1' = \tau_1 = 105^{\circ}\text{C}$ and insulation with adjustment of the temperature schedule $\tau_1' = 78.3^{\circ}\text{C}$. The insulation efficiency coefficient for buildings is taken equal $\mu = 0.6$.

Since the heat carrier flow rate for heating of the building and its cooling are interconnected, the heat pipelines thermal state calculation is performed iteratively, in a few approximations. Initially, the accepted distribution of the flow rate was adjusted taking into account changes in the system water flow rate for heating individual buildings; this change is a consequence of cooling water when moving through the network. As the calculations showed, in order to achieve sufficient accuracy for practical calculations, 2-3 iterations are necessary.

Table 4

Characteristics of the design variants for the heating network

Parameter	Network design variant		
	A	B	C
Maximum heat consumption for heating of a group of buildings, MW	2.5	2.5	2.5
Water consumption at the inlet to the supply pipe of the heating network, kg / s	23.9	23.9	23.9
The design network section length, m	136.6	180	150
Branch length, m	683	720	600
The average diameter of the branch pipeline, mm	166	157.2	189
The law of heat carrying agent flow change	$\bar{G} = 1 - 0.8x_0$	$\bar{G} = (1 + 10x_0^2)^{-1}$	$\bar{G} = (1 + x_0)^{-1}$
The average relative flow rate of the heat carrying agent on the branch before heat-insulating of buildings	0.6	0.46	0.7

The building insulation effect on the system water flow rate through a heat exchanger is shown in Fig. 2. It represents the results of calculations using the formula and taking into account the heat carrying agent cooling within each of the



sections. As can be seen from Fig. 2, the provision of the necessary thermal performance of the heating system in insulated buildings at the same heat carrier temperature in the supply pipe of the heating network as it was before the winterization causes more than half decrease in water consumption from the heating network. The transition to a new, lower temperature schedule of the distribution heating network occurs almost at the same flow rate of the heating heat carrying agent through the heating heat exchanger as it was before the buildings were insulated.

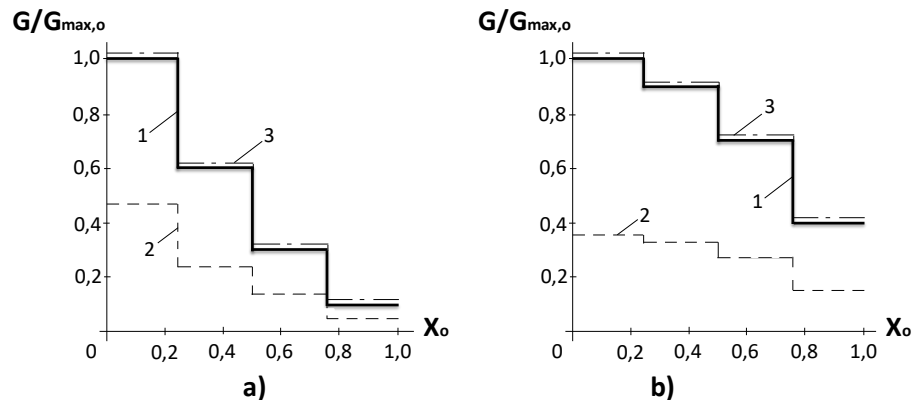


Fig. 2 - Change in the Relative System Water Flow Rate Along the Length of the Heating Network Branch;

a, b - design schemes B and C, respectively. 1- initial version (before insulation of buildings); 2 - $\mu = 0,6$; $\tau_1 = 105^\circ\text{C}$; 3 - $\mu = 0,6$; $\tau_1 = 78.36^\circ\text{C}$.

The results of calculations of the change in heat loss by the supply pipes of the heating network according to formulas (20) - (22) are given in Table 5. It also presents the results of calculating the thermal state using formulas (2), (3) and taking into account the actual changes in the flow rate and temperature of the heat carrying agent in the heat conduit sections. Comparison of the data obtained showed that with a maximum discrepancy of the results does not exceed 5%, which may be acceptable for estimates at the initial stages of the feasibility study of energy saving measures in micro-district heating systems.

Table 5
Reduction of heat losses from the supply pipes of the heating network in the case of building heat insulation

Terms of calculation	Method of determining	Values Q'/Q for the design scheme					
		A (Fig. 1)		B (fig. 1)		C (Fig. 1)	
		Q'/Q	$\Delta, \%$	Q'/Q	$\Delta, \%$	Q'/Q	$\Delta, \%$
$\mu=0,6$ $\tau_1' = \tau_1 = 10$ 5°C	Calculation of cooling in sections, taking into account the actual change in flow	0.994	0.9	0.994	2,3	0.995	0.3
	Formulas (17) - (19)	0.985		0.971		0.991	
$\mu=0,6$ $\tau_1' = 78,36$ $^\circ\text{C}$	Calculation of cooling in sections, taking into account the actual change in flow	0.734	0.4	0.734	4.6	0.734	0.3
	Formulas (17) - (19)	0.731		0.7		0.732	



Table 6

The ratio of heat losses from branches and total heat losses from heating network pipelines

Design scheme	Characteristics of variants		
	The original variant, before winterization ($\mu=1$) $\tau_1=105\text{ }^{\circ}\text{C}$	insulation of all buildings connected to the branch ($\mu=0.6$) $\tau_1' = \tau_1=105\text{ }^{\circ}\text{C}$	insulation of all buildings connected to the branch ($\mu=0.6$) $\tau_1' = 78,36\text{ }^{\circ}\text{C}$
A	$Q_d/Q_{sum} = 0.18$	$Q_d/Q_{sum} = 0.18$	$Q_d/Q_{sum} = 0.18$
B	$Q_d/Q_{sum} = 0.20$	$Q_d/Q_{sum} = 0.20$	$Q_d/Q_{sum} = 0.20$
C	$Q_d/Q_{sum} = 0.22$	$Q_d/Q_{sum} = 0.22$	$Q_d/Q_{sum} = 0.22$

The data given in Table 6 characterize the thermal state of the network without taking into account heat losses from branches laid from the main branch to the buildings. The impact of branch losses on the total heat loss in a network serving a group of buildings was assessed using formulas (2), (3) and taking into account the actual change in the heat carrying agent parameters in the sections. The calculations were performed provided that the material characteristics of the branches $M_d = \sum_{i=1}^n (l_i d_i)$ for all considered variants of the heating network are the same and equal to 17.8 m^2 , which is 13.6% of the total material characteristics. According to the data given in Table 6, the share of heat losses from branch pipelines in the total losses from the heating network pipelines is 18-22%. Moreover, the value of the specified ratio of heat loss for a specific network configuration remains unchanged for all accepted variants of the functioning of the heating system.

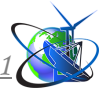
Conclusions

1. Design formulas for a number of characteristic laws of changing the heat carrying agent flow rate along the length of a branch in a multibranch heat network are proposed to determine the change in heat loss from the supply pipelines of the heat network in a case if building insulation was installed.

2. Using the examples of idealized heating networks, it is shown that the proposed dependencies make it possible, with sufficient accuracy for engineering calculations, to evaluate the effect of building insulation efficiency on the thermal state of heating networks of centralized heat supply systems. With the effectiveness of building insulation $\mu = 0.6$, the maximum discrepancy does not exceed 5 %.

3. Heat networks having a lower average heat carrier flow are characterized by lower heat losses from pipelines. The differences for the laws of heat carrying agent flow rate distribution along the length are about 2%, provided that the temperature schedule for regulating the heat supply for insulated buildings is the same as before the buildings were insulated and about 9% when adjusting the temperature schedule.

4. The calculation results indicate that the insulation of buildings practically does not affect the ratio of heat loss from branch pipelines to the total heat loss from the pipelines of the microdistrict heating network, which is approximately 18-22%.



References

1. International Code Council. International Energy Conservation Code. Falls Church, VA, 2018.
2. Patrick Mitchell: Central Heating, Installation, Maintenance and Repair. Writers Print Shop, 196 (2008).
3. Wong, H.Y.: Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer for Engineers. Longman, London and New York (1977).
4. Erlach, K., Schuh, G., Neugebauer, R., Uhlmann, E.: Energy Value Stream: Increasing Energy Efficiency in Production. In: (eds) Future Trends in Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 343-349 (2013).
5. Aleksakhin, O.O., Ena, S.V., Hordienko, E.P.: Calculation of heat losses from the supply pipelines of branched heat networks. Integrated technologies and energy saving. No. 1, 45-50 (2016). (in Russian)
6. Aleksakhin, O.O.: Analysis of heat losses from the supply pipelines of branched heat networks, taking into account potential decrease of design heat loads of buildings. Energy saving. Energy industry. Energoaudit. No. 8 (114), 2-7 (2013). (in Ukrainian)
7. 2012 ASHRAE Handbook: Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Systems and Equipment (2012).
8. Domestic Water Heating Design Manual (2nd Edition), American Society of Plumbing Engineers (ASPE) (2003).

Анотація. У роботі розглянуто вплив утеплення будівель на тепловий стан розподільних трубопроводів централізованої опалювальної мережі для деяких характерних законів зміни витрати теплоносія по довжині теплопроводу. Запропоновано залежності для визначення зміни теплових втрат подавальних трубопроводів розгалуженої мережі, яка обслуговує групу будинків, при утепленні будинків. Залежності отримані в припущенні, що діаметр теплопроводу змінюється по довжині мережі не дискретно від дільниці до дільниці, а монотонно від максимального значення на початку мережі до мінімального значення на вводі в систему найбільш віддаленого на гілці споживача. Зміна витрати теплоносія по довжині гілки мережі також при цьому передбачається монотонним. Залежності отримані за умови, що рівень зниження розрахункового опалювального навантаження всіх будівель однаковий. Виконано порівняння результатів розрахунків за запропонованими формулами з результатами розрахунків, отриманих з використанням методик, що застосовуються в практиці проектування теплових мереж. При зменшенні розрахункового опалювального навантаження за рахунок утеплення будинків на 60% максимальна розбіжність результатів не перевищує 5%. Виконано також оцінку зміни втрат теплоти трубопроводами мережі при застосуванні зниженого температурного графіка регулювання відпустки теплоти. Отримані залежності можуть бути використані при розробці алгоритмів оцінок ефективності варіантів термомодернізації систем централізованого теплопостачання.

Ключові слова: централізоване теплопостачання групи будинків, утеплення будинків, система опалення, розгалужена тепла мережа, теплові втрати трубопроводами теплової мережі.

Стаття відправлена: 06.04.2021 г.

© Біловол Г. В.



SECONDARY POWER SUPPLY WITH STORAGE DEVICE ELECTRICAL ENERGY

ВТОРИЧНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ С НАКОПИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Uskov D.S. / Усков Д. С.

Student / студент

Naumenko A.A. / Наumenко А. А.

Student / студент

Valyanov D.P. / Вальянов Д. П.

Student / студент

Krasnoyarsk Railway Transport Institute,
branch of Irkutsk State Railway Engineering University
(KRIZHT IrGUPS), Krasnoyarsk
КрИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск

Аннотация. В данной статье приведены основные показатели качества электроэнергии и способы повышения её качества. Были описаны негативные воздействия высших гармоник, что ведёт к увеличению потерь на трансформаторах, линиях электропередач, а также к ускоренному старению изоляции электрооборудования и ложного срабатывания устройств релейной защиты. Рассмотрены статические и динамические накопители электрической энергии, принцип действия, область их применения, основные достоинства и недостатки. Приведена схема питания, основанная на действии двух диодов и двух накопителей. Указаны преимущества данной схемы.

Ключевые слова. Накопители, гармоники, электроэнергия, энергосбережение.

Качество электроэнергии

Качество электрической энергии - степень соответствия параметров электрической энергии их установленным значениям. К параметрам электрической энергии относят напряжение, частоту, форму кривой электрического тока.

Качество электрической энергии имеет переменный характер в течение суток, который может зависеть от изменения нагрузки энергосистемы, возникновения аварийных режимов, загрязнения сети гармониками, быстрых изменений напряжения, неравномерности нагрузки и т.д.

Основные показатели качества электроэнергии

- 1 Отклонение напряжения
- 2 Колебания напряжения
- 3 Отклонение частоты
- 4 Доза фликера
- 5 Коэффициент временного перенапряжения
- 6 Провал напряжения
- 7 Импульсное напряжение
- 8 Несимметрия напряжений в трёхфазной системе
- 9 Несинусоидальность формы кривой напряжения

Способы повышения качества электроэнергии

- Использование конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности;



- Использование синхронных машин для регулирования величины реактивной мощности;
- Использование вентильных преобразователей для преобразования напряжения и частоты электрического тока с помощью электронных и ионных вентиляей;
- Использование фильтров гармоник (активных, пассивных и комбинированных) для борьбы с высшими гармониками.

Гармоники

Широкое применение устройств с нелинейными вольтамперными характеристиками (ВАХ) приводит к увеличению уровня высших гармоник токов и напряжений в электрических сетях и, следовательно, является одной из причин ухудшения качества электроэнергии. Такими нагрузками являются импульсные источники питания, приводы электродвигателей с регулируемой скоростью вращения и т.д.

Токи и напряжения несинусоидальной формы можно представить в виде суммы гармоник. Частоты, которых кратны основной частоте питающей сети.

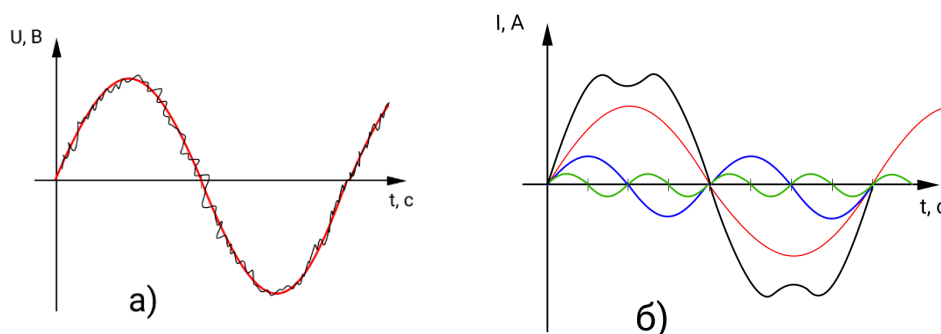


Рисунок 1- Графики искажений

а) Напряжения; б) Тока

Результатом воздействия высших гармоник на систему электроснабжения является увеличение потерь на трансформаторах, линиях электропередач (ЛЭП), во вращающихся машинах, а также ускоренное старение изоляции электрооборудования и ложные срабатывания устройств релейной защиты и автоматики.

Формы негативного влияния высших гармоник на системы электроснабжения:

- Увеличение токов и напряжений высших гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов;
- Снижение эффективности процессов генерации, передачи, использования электроэнергии;
- Старение изоляции электрооборудования и сокращение срока его службы;
- Ложное срабатывание оборудования.

Накопители электроэнергии

Статические (Ёмкостные) накопители



В ёмкостных накопителях (ЕН) энергия накапливается и хранится в виде энергии электрического поля, создаваемого в изоляционной среде между обкладками конденсатора. Основным недостатком таких накопителей является то, что плотность накопленной в них энергии на несколько порядков меньше, чем в индуктивных. Низкое рабочее напряжение и малое время хранения энергии тоже относится к недостаткам

В ёмкостных накопителях возможно получение разрядного тока значительно больше, чем зарядный. Это делает возможным увеличение мощности при питании нагрузки с малым сопротивлением. Для питания данной нагрузки используются конденсаторные батареи, состоящие из большого числа последовательно и параллельно соединённых конденсаторов. Так же достоинствами является то, что за счет статического электрического поля создаваемого в изоляционной среде между обкладками конденсатора уменьшаются потери и, следовательно, увеличивается длительность хранения накопленной энергии. [4]

Применение ёмкостных накопителей ограничено их недостатками:

- Высокая стоимость
- Необходимость изменения полярности при переходе из режима «заряд» в режим «разряд»
- Устройства управления ЕН на основе тиристорных преобразователей создают большое количество высших гармоник, которые искажают синусоидальный переменный ток

Область применения конденсаторов в электроэнергетике ограничивается кратковременным накоплением электрической энергии, выпрямлением, коррекцией и фильтрацией тока в схемах силовой электротехники

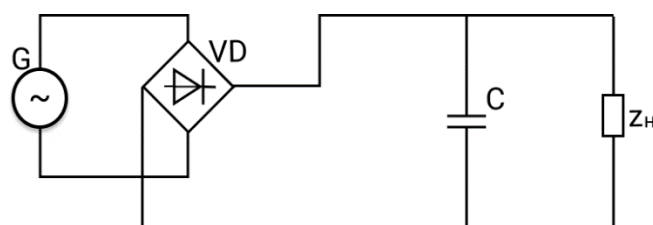


Рисунок 2 – Схема выпрямителя на основе диодного моста и сглаживающего конденсатора

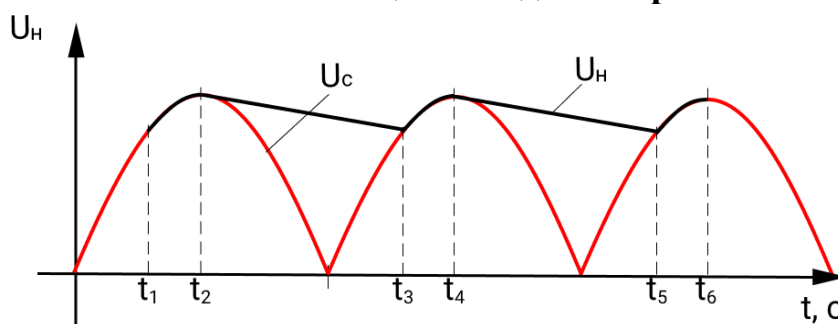


Рисунок 3 – График сглаженного напряжения

В момент времени t_1, t_2 нагрузка питается импульсным напряжением

Динамические (индуктивные) накопители



Индуктивные накопители представляют собой катушки с током. Энергия магнитного поля, созданного в катушке и в пространстве вокруг неё, может быть преобразована в электрическую и передана в нагрузку. Для этого необходимо нагрузку присоединить параллельно катушке, а катушку отсоединить от источника питания. В нагрузке будет развиваться мощность, превышающая мощность источника во столько раз, во сколько сопротивление нагрузки больше суммы сопротивления катушки и внутреннего сопротивления источника питания. [4]

В индуктивном накопителе нельзя хранить долго энергию, т.к. она расходуется на нагрев катушки из-за конечного сопротивления обмотки.

Чем большую мощность требуется получить от индуктивного накопителя, тем выше будет напряжение. Предельные мощности достигают 10^{10} Вт при напряжениях до миллиона вольт.

Отличительной чертой индуктивных накопителей является высокая плотностью накапливаемой энергии (до 10^6 - 10^7 Дж/м³), возможность накопления больших энергий. Главным же недостатком является ограниченная скорость вывода накопленной энергии из-за проблем обеспечения электрической прочности изоляции катушки и коммутатора тока. [4]

Преимущества индуктивных накопителей

- Запасаемая и используемая энергия имеет один вид – электромагнитный
- Высокие значения КПД (97-98 %) из-за отсутствия необходимости преобразования энергии
- Быстродействие устройства

В настоящее время питание потребителей происходит по схеме с диодным мостом и со сглаживающим конденсатором. Главным недостатком такого выпрямителя является импульсное напряжение. Для устранения пульсаций напряжения применяют сглаживающий конденсатор.

За время полуволны напряжения происходит заряд конденсатора от источника, т.е. диодного выпрямителя, а его разряд на нагрузку во время отсутствия, либо малого по амплитуде напряжения, на выходе выпрямителя. [5]

В качестве альтернативного источника вторичного питания предлагается вариант с использованием двух накопителей. Т.е. положительная полуволна будет накапливаться на первом накопителе, а отрицательная на втором и в момент, когда происходит разрядка одного накопителя второй будет заряжаться. Накопители энергии в течение полупериода накапливают энергию. В требуемый момент времени накопитель подключается к нагрузке и отдает ей запасенную энергию. Предлагаемая схема позволит снизить влияние высших гармоник на питающую сеть.

Заключение

Предлагаемый алгоритм работы вторичного источника питания позволит изолировать нелинейную нагрузку от внешней сети в момент энергопотребления. Это позволит защитить чувствительное оборудование от высших гармоник, которые присутствуют в общей сети питания, а также снизит влияние нелинейной нагрузки на питающую сеть.

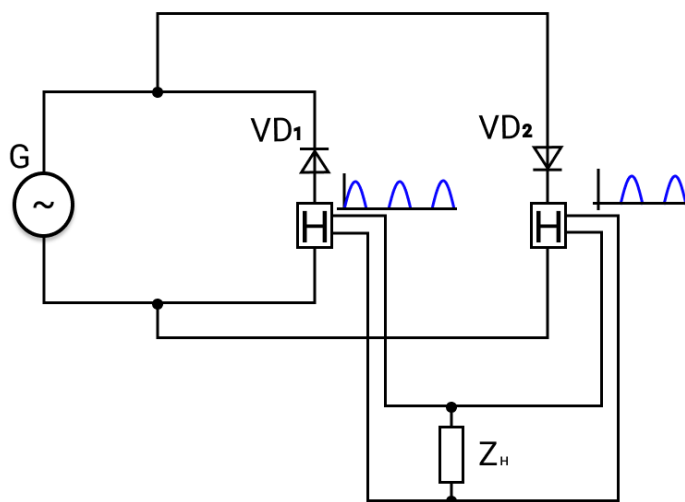


Рисунок 4 – Схема питания нагрузки через накопители

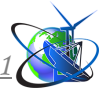
Библиографический список

1. Заметки электрика//основные показатели качества электроэнергии [сайт]URL:<https://yandex.ru/turbo/asutpp.ru/s/kachestvo-jelektroenergii.html> (Дата обращения 12.03.2021)
2. Школа электрика//воздействие высших гармоник [сайт]URL: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/260-vlijanie-vysshikh-garmonik.html> (Дата обращения 13.03.2021)
3. Электрические сети//влияние высших гармоник [сайт] URL: <https://leg.co.ua/knigi/raznoe/vysshie-garmoniki-v-nizkovoltnyh-elektricheskikh-setyah-4.html>
4. Авруцкий В.А.[и др.]. Накопители энергии и их применение: учебное пособие по курсу Испытательные и электрофизические установки, техника эксперимента. Москва, МЭИ, 1982г.- 78 с.
5. В. Н. Авруцкий [и др.]. Москва : УМЦ ЖДТ, 1982. 77 с. Сглаживающие фильтры питания [сайт] URL: https://overclockers.ru/blog/OQtagooi/amp/17694/Likbez_KO_Lekciya_4_Sglazhivajusche_filtry_pitaniya (Дата обращения 15.03.2021)

Abstract. This article presents the main indicators of the electricity quality and the ways to improve its quality. The negative effects of higher harmonics were described, which leads to the increase in losses on transformers, power lines, as well as to accelerated aging of the electrical equipment insulation and false triggering of the relay protection devices. The static and dynamic electric energy storage devices, the principle of operation, the scope of their application, the main advantages and disadvantages are considered. The power supply circuit based on the action of two diodes and two storage devices is shown. The advantages of this scheme are indicated.

Keywords. Storage devices, harmonics, electricity, energy saving.

Научный руководитель: О.В. Колмаков,
к.т.н, доцент, КрИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск



EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF VIBRATION ON THE MICROSTRUCTURE OF THE WELD OF A PIPE BILLET

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЇ НА МІКРОСТРУКТУРУ ЗВАРНОГО ШВА ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ

Balakin V.F.

*Doctor of Science, Professor. ORCID: 0000-0003-0876-7516.
National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine.*

Kadylnykova T.M.

*Doctor of Science, Professor. ORCID: 0000-0003-0817-9466.
Dnipropetrovsk State University of Internal Affairs, Dnipro, Ukraine.*

Savkin S.V.

*PhD student. ORCID: 0000-0003-0254-6544.
National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine.*

Kadylnykova A.V.

*PhD student. ORCID: 0000-0003-2516-9825.
E.O. Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine.*

Abstract. The article discusses the results of an experimental study of the microstructure of the weld metal of pipe billets subjected to vibration processing during the welding process. The experimental study was divided into the following stages: welding of longitudinal preformed pipe blanks using vibration action; production of thin sections and study of their microstructure in the zones of the welded seam; processing of the data obtained during the experiment. When studying the microstructure, special attention was paid to the areas of overheating and normalization, as the areas of the heat-affected zone most characterizing the quality of the weld.

The tendency of change in the grain size of the weld metal at various frequencies of vibration used in the welding process, as well as in its absence, has been investigated. An important place in the study was given to the study of the degree of graininess of the studied structure.

Key words: vibration treatment, welded seam, heat-affected zone, microstructure, uneven grain size, pipe billet.

Introduction. Analysis of the state of the pipe market over the past decades has shown that the requirements for the quality and reliability of products are constantly increasing on the part of world consumers of welded pipes. Particular attention in this matter is given to obtaining welded pipes with improved strength characteristics, which is achieved by improving the quality of the weld structure.

Formulation of the problem. The coarse-grained structure of the metal in the area of the weld joint, together with the heterogeneity of the structure, negatively affects the physical and mechanical properties of the tubular product as a whole. Annealing after welding of electric-welded pipes in the current technological process is required not only to remove residual stresses, but also to refine the structure and increase its uniformity.

However, any thermal components of the technological process are associated with large material costs for the enterprise, the duration of the heating process in time, and in some cases, with the non-environmental friendliness of certain operations.

Analysis of publications on the topic of research. Known scientific works [1, 2], which provide reliable information about the positive effect of vibration on the refinement of the crystal structure of ingots from steel and alloys, reduction or



complete elimination of the transcrystallization zone due to the growth of equiaxed crystals, reduction of zonal and dendritic heterogeneity, increase in mechanical and special properties of metals and alloys.

Also, according to well-known studies [3], vibration treatment of welded samples made of low-carbon steel in modes that ensure the flow of elastic-plastic deformations makes it possible to reduce stresses of the first kind, measured by the tensothermal method, by 50 - 60%, and during heat treatment, the decrease occurs by 70 % and more. The stresses of the second kind in the fusion zone, determined by the X-ray method, after vibration treatment are reduced by 45%, and after heat treatment - by 65%.

However, in the works described above, vibration treatment was used in relation to the crystallized metal of the weld, in which the formation of total residual stresses has already been completed, while in works [4-11], the positive effect of vibration on the molten metal during crystallization was proved.

These studies create real prerequisites for an experimental study of the effect of vibration processing in the process of welding a pipe billet on the microstructure of the weld metal.

The purpose of this study is to identify patterns of change in the size and uniformity of weld metal grains in the heat-affected zone (HAZ) at various frequencies of vibration used in the welding process, as well as in its absence.

Presentation of the main material. To study the microstructure, 5 samples of welded pipes were presented, presented in Table 1. The chemical composition and manufacturing technology of the initial hot-rolled strip are the same, the differences were only in the conditions of welding, namely in the frequency of vibration applied to the samples.

Tab. 1.

Samples for the study of the microstructure.

Sample number	1	2	3	4	5
Vibration frequency, Hz	0	25	50	125	200

The initial billet was obtained at the enterprise of PrJSC "DMZ KOMINMET", the molding was carried out in the electric pipe shop No. 2 using the pipe profile electric welding unit TPESA 20-114. As an initial billet for the experiment, a formed pipe billet without applying a weld seam was selected, produced according to TU 14-236-15-93 "Electric-welded steel pipes for domestic needs". The main characteristics of the blank for the experiment are presented in Table 2.

Table 2.

Characteristics of the original workpiece

Parameter	Value
Outside diameter, mm	89
Wall thickness, mm	4
steel grade	3PS (GOST)
Swim number	1010610



It should be noted that the quality of welds made in laboratory conditions, in the total mass, did not correspond to international standards for welded joints, however, this fact did not affect the results of the study. However, it will not be correct to compare the obtained data with experimental welding modes.

To assess the effect of welding modes on the quality and changes in the microstructure, transverse sections were made. The study of the microstructure of thin sections was carried out after etching in a 4% alcoholic solution of nitric acid (nital).

For the welded joint, the classification was carried out by zones: the deposited metal zone, the heat-affected zone and the base metal zone. The deposited metal zone is represented by columnar crystallites formed from the deposited metal (melt of the base metal and filler wire or electrode), while the direction of crystal growth always coincides with the direction of heat removal. This is followed by a heat-affected zone, consisting of areas of incomplete melting, overheating and normalization.

The study of the effect of welding modes on the microstructure was carried out by assessing the morphology and quantitative characteristics of the structural components of the most sensitive and characteristic zones - deposited metal, overheating and normalization.

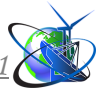
The sizes of the deposited metal crystallites in all samples have a similar grain size, therefore, they will not be considered in detail in the future. The base metal has the classic ferrite-pearlite structure of hot-rolled metal (Fig. 1). The average grain size of ferrite is 17 microns.



Fig. 1 - The structure of a hot-rolled billet for the manufacture of welded pipes, steel grade 3PS

Research results. Next, each of the samples presented for analysis will be analyzed. **Sample #1** was obtained without vibration treatment. The welded joint zones of this sample are clearly shown in Figure 2.

The structure of the joint has a characteristic appearance of a welded seam, however, attention is drawn to the presence in the area corresponding to the zone of incomplete melting of an extremely fine-grained structure (the grain size of ferrite does not exceed 8 μm , while the average grain size is 3.2 μm), closes its framing



from large grains of ferrite, elongated in the direction of heat removal. The presence of ferritic framing in the structure of the weld, as a rule, is characteristic of medium- and low-carbon steels when welding is performed correctly. It should be noted that a similar feature of the weld was found only in the first sample; in the remaining samples, there is no ultrafine grain section under the molten metal layer.

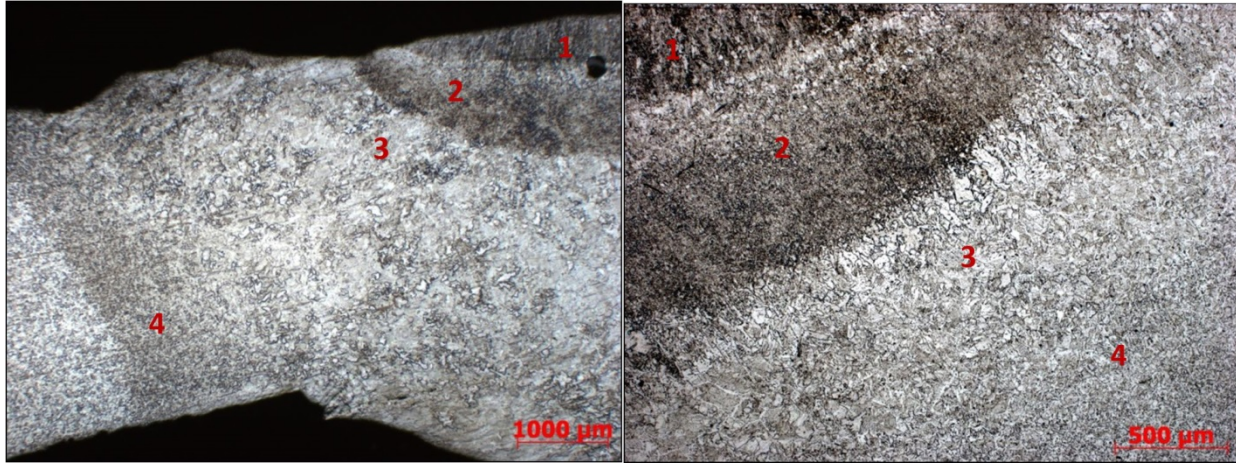


Fig. 2 - Structure of the weld, Sample #1: 1 - deposited metal zone, 2 - area with ultrafine grain, 3 - overheating area, 4 - normalization area

After the ferrite framing, an overheating section follows, which looks like a needle-like structure, which passes into a normalization section. The average size of Widmanstätt bags is 93 µm. The score of the Widmanstätt structure in the overheating section of the heat-affected zone of the weld: 2-3.

The average size of the normalized grains is 8 µm. According to well-known literature data, the normalization section is characterized by the smallest ferrite grain when welding low-carbon steels, but here the structure is noticeably larger than the fine-grained structure discussed above. The degree of unevenness in the section of normalization of the heat-affected zone of the weld is 0.44. Typical photos of the microstructure of overheating and normalization areas are shown in Figure 3.

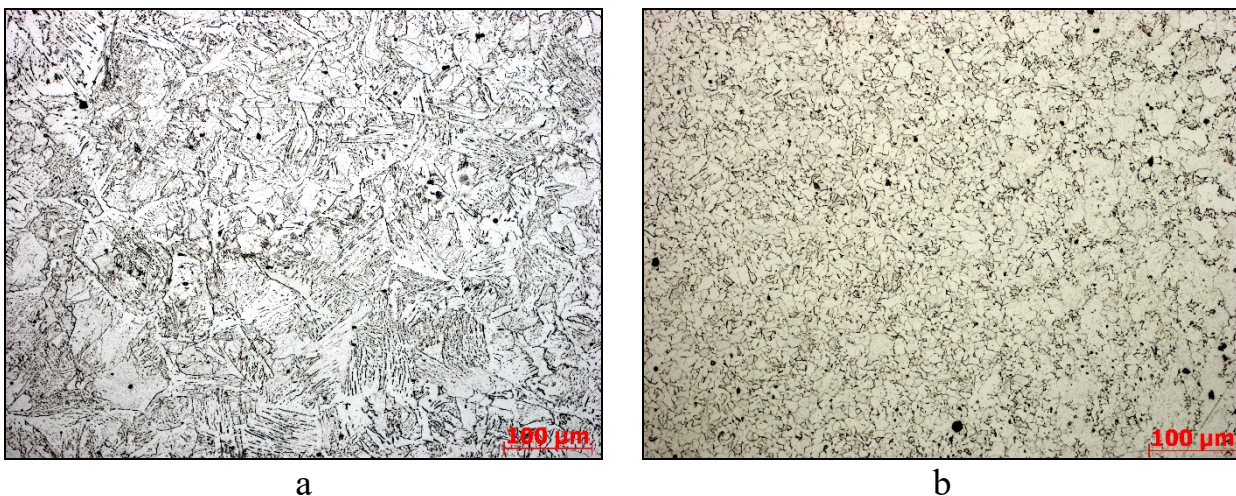


Fig. 3 - Structure of the weld, Sample #1: a - overheating section, b - normalization section



Sample #2 was obtained using vibration treatment with a frequency of 25 Hz. Structural zones typical for the structure of this weld are shown in Figure 4. The structure of the weld zones is characterized by the smallest extent of the heat-affected zone in comparison with all other samples presented for analysis.

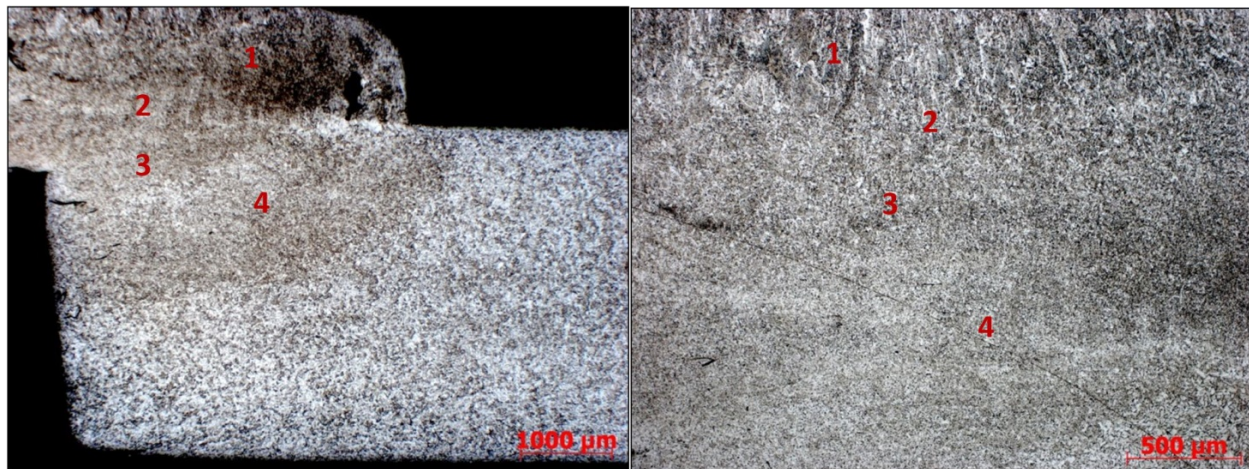


Fig. 4 - Structure of the weld, Sample #2: 1 - deposited metal zone, 2 - fusion section, 3 - overheating section, 4 - normalization section.

Crystallites have a size corresponding to the size of the entire weld metal. In the overheating area, a Widmanstätt structure is observed, the grain size is 40 µm, the maximum size does not exceed 57 µm. The score of the Widmanstätt structure in the overheating section of the heat-affected zone of the weld: 1-2.

In the normalized section, the hot-rolled grain structure was refined (the average grain size is 6 µm). The degree of unevenness in the area of normalization of the heat-affected zone of the weld is 0.41. Typical photos of the microstructure of overheating and normalization areas are shown in Figure 5.

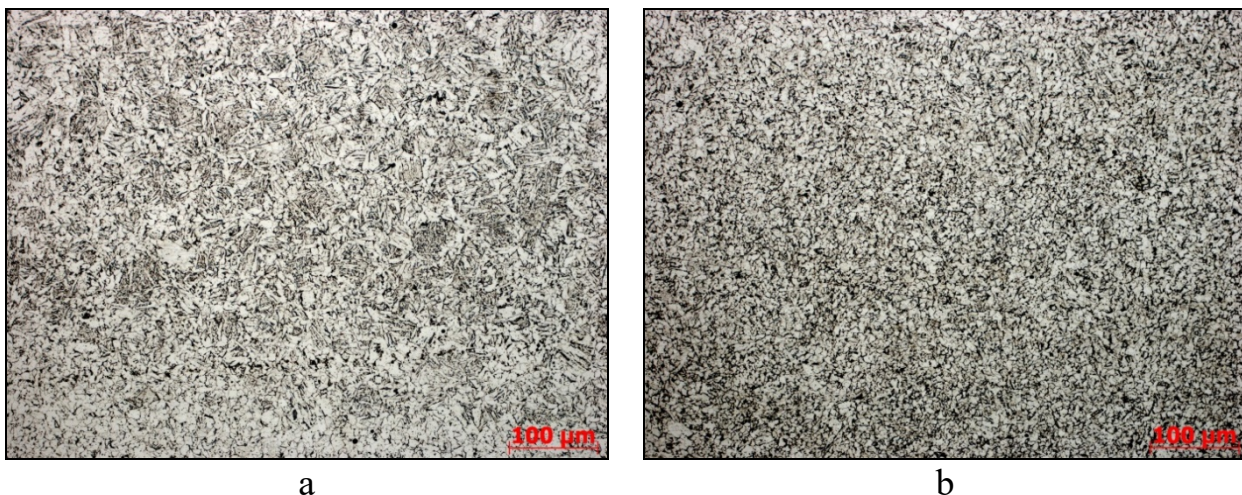


Fig. 5 - Structure of the welded seam, Sample #2: a - overheating section, b - normalization section

Sample #3 was obtained using vibration treatment with a frequency of 50 Hz. Typical microstructure in general is shown in Figure 6. The structure of the welded



seam is similar in characteristics to the joint of Sample #2, but differs in a slightly larger length of the heat-affected zone.

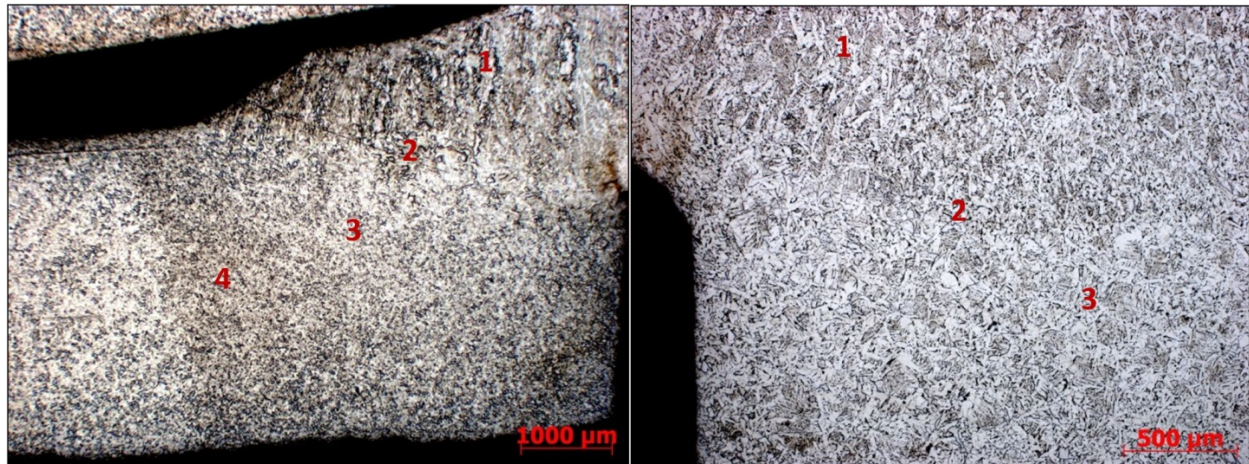


Fig. 6 - Structure of the weld, Sample #3: 1 - deposited metal zone, 2 - fusion section, 3 - overheating section, 4 - normalization section.

The Widmanstätt grains are larger in comparison with the grains of Sample #2. The average grain size in the area is 68.5 µm. The point of the Widmanstätt structure in the overheating section of the heat-affected zone of the weld: 2.

In the normalization section, the average ferrite grain size is 11 µm. Although the average grain size increased slightly, the structure became more uniform. The degree of unevenness in the area of normalization of the heat-affected zone of the weld is 0.37. Typical photos of the microstructure of overheating and normalization areas are shown in Figure 7.

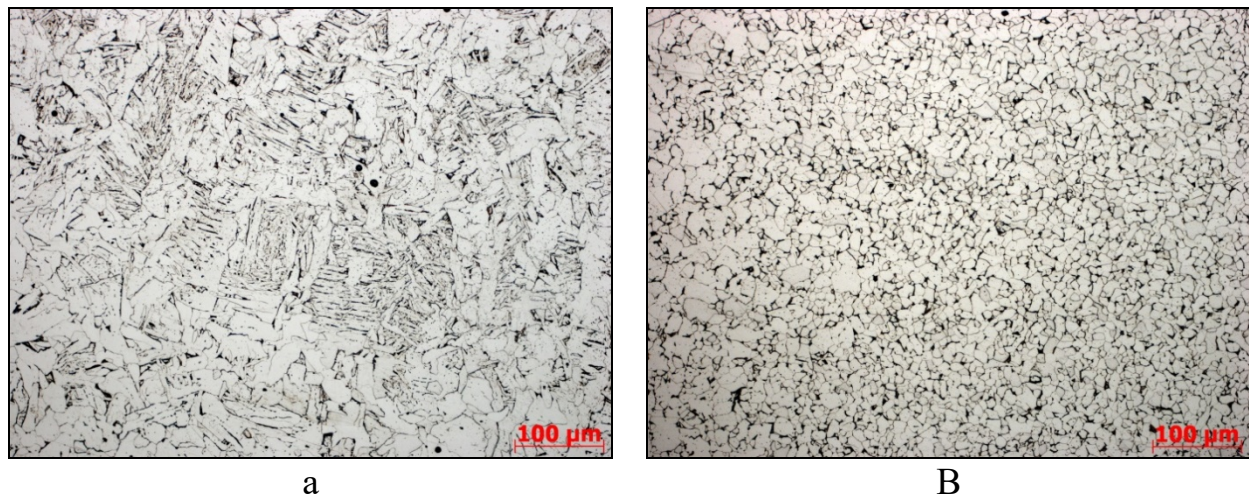


Fig. 7 - Structure of the welded seam, Sample #3: a - overheating section, b - normalization section

Sample #4 was obtained using vibration treatment with a frequency of 125 Hz. Sample 4 was also interesting in terms of research. The welded seam is characterized by a short length. The part of incomplete melting practically merges with the overheating part. There are huge grains with a Widmanstätt structure. The grains are



surrounded by a clear ferritic frame. Their size is extremely uneven and reaches 395 μm (the average size is 125 μm). In this case, the Widmanstätt needles have a smaller structure in comparison with other samples. The score of the Widmanstätt structure in the overheating section of the heat-affected zone of the weld: 4.

A fine-grained structure is located directly under the abnormally large grains. The normalization zone is short, the average ferrite grain size is 10 μm . The degree of unevenness in the area of normalization of the heat-affected zone of the weld is 0.43. Typical photos of the general view of the weld are shown in Figure 8. Photos of the microstructure of the overheating and normalization areas are shown in Figure 9.

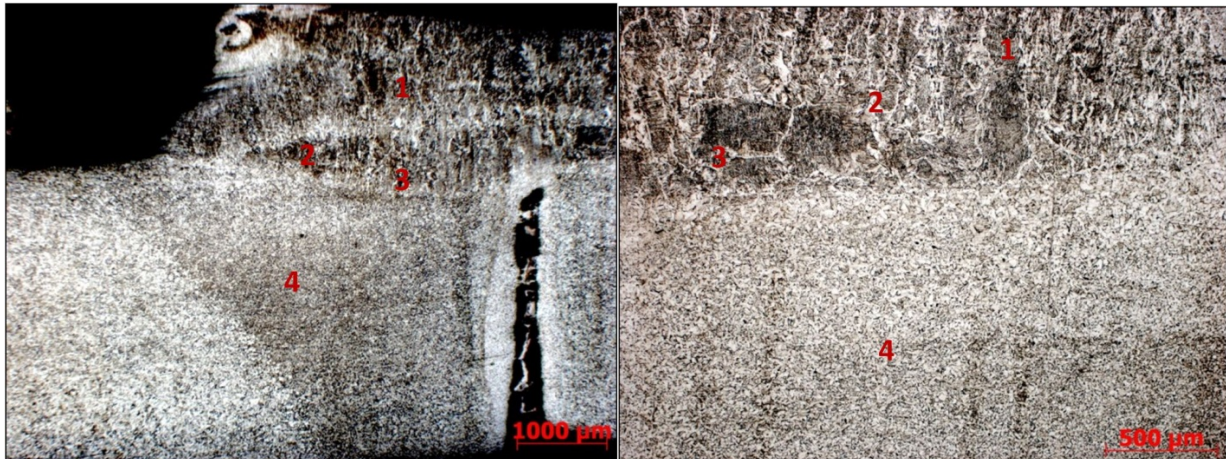


Fig. 8 - Structure of the weld, Sample #4: 1 - deposited metal zone, 2 - fusion section, 3 - overheating section, 4 - normalization section

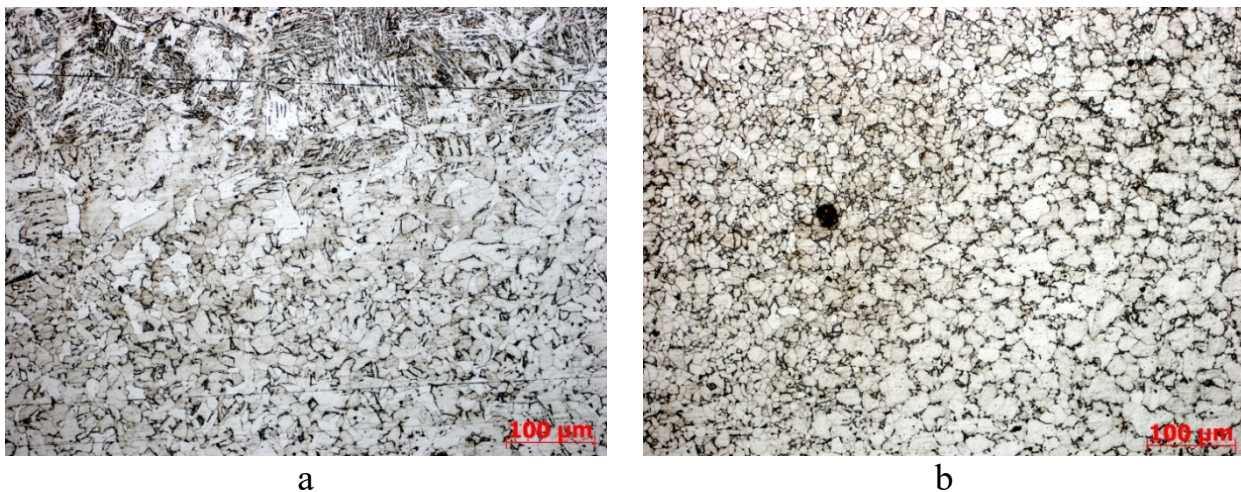


Fig. 9 - The structure of the weld, Sample #4: a - transition from the overheating area to the normalization zone, b - the transition of the normalized structure to the base metal

Sample #5 was obtained using vibration treatment with a frequency of 200 Hz. The weld is continuous, columnar crystals fill the entire section of the deposited metal zone. The structure of the weld is shown in Figure 10.

The size of large packages of Widmanstätt is 120-240 μm . The score of the Widmanstätt structure in the overheating section of the heat-affected zone of the weld: 4.

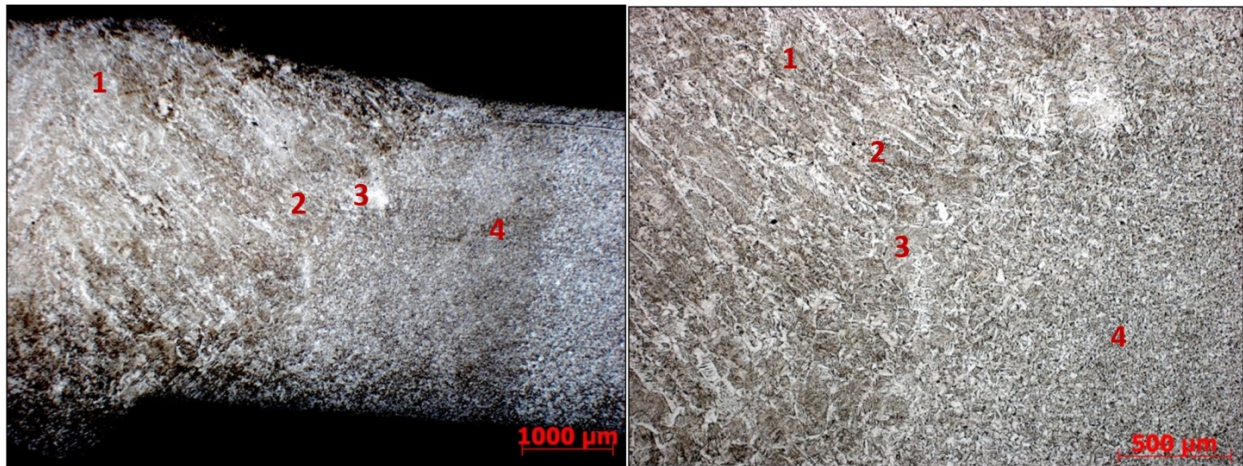
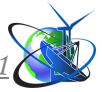


Fig. 10 - Structure of the welded joint, Sample #5: 1 - deposited metal zone, 2 - fusion section, 3 - overheating section, 4 - normalization section

In the normalization section, the ferrite grain size is $10.5\ \mu\text{m}$. The degree of unevenness in the area of normalization of the heat-affected zone of the weld is 0.49. Typical photos of the microstructure of overheating and normalization areas are shown in Figure 11.

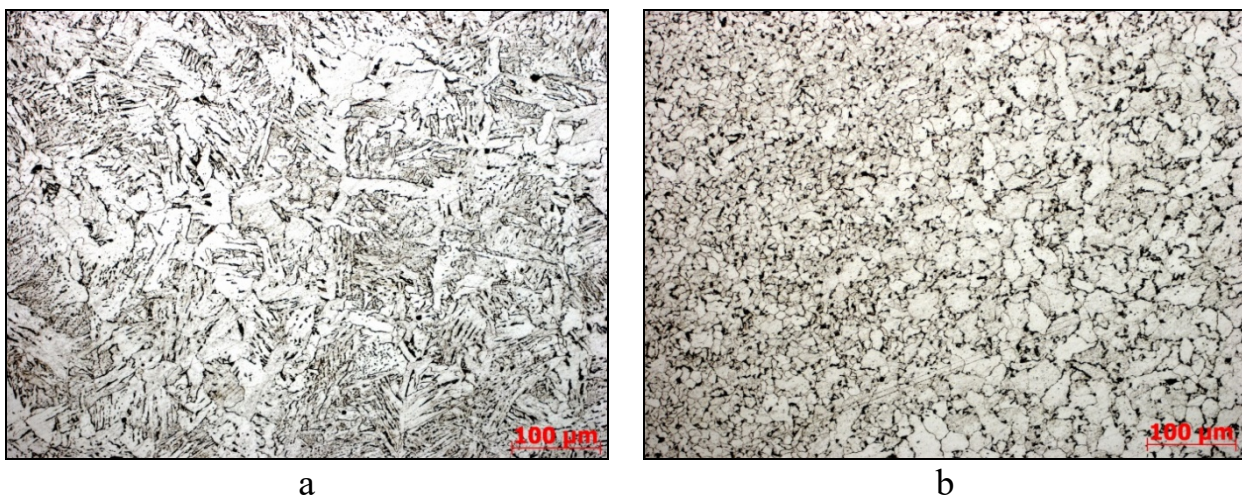


Fig. 11 - Structure of the welded joint, Sample #5: a - areas of incomplete melting and overheating, b - transition of the normalized structure to the base metal

More clearly, the quantitative differences in the structural components of the experimental samples are shown in Figure 12.

As can be seen in the diagrams, Sample #3 is characterized by the smallest metal grain size both in the overheating area and in the normalization area. This fact is consistent with research in the field of vibration application during crystallization of ingots from steel and alloys given above.

Table 3 shows data on the degree of development of the Widmanstätt structure (according to GOST 5640 Steel. Metallographic method for assessing the microstructure of sheets and strips) of the overheating section of welded joints of the samples under study and the degree of grain variation in the normalization section.

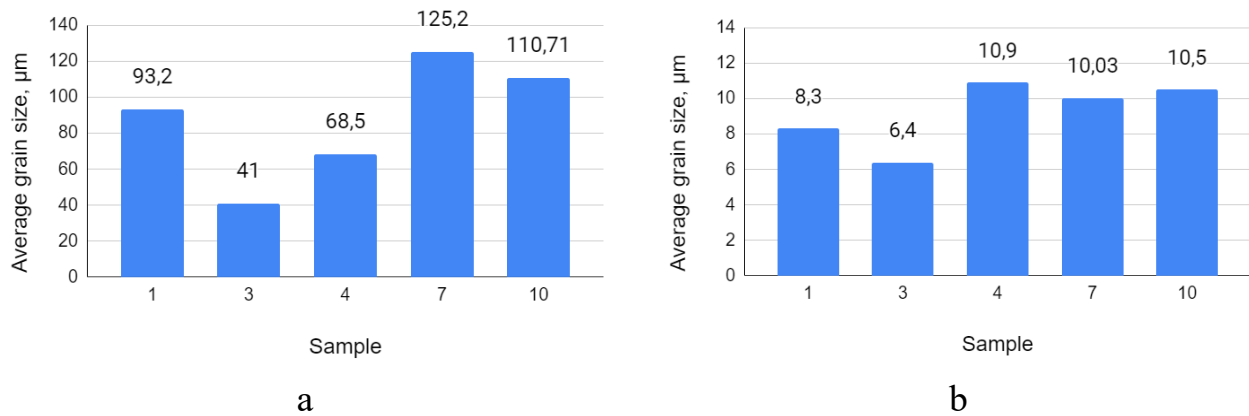
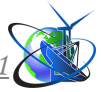


Fig. 12 - Average grain size of characteristic sections of the heat-affected zone in the analyzed samples: a - overheating section (Widmanstätt structure), b - normalization section (ferrite-pearlite structure)

The degree of graininess was estimated using the coefficient of variation (proposed by S.A. Saltykov), which is calculated as the ratio of the standard deviation to the average grain diameter. The higher the coefficient, the higher the heterogeneity and unevenness of the grains.

Table 3.

Data on the structure variability.

Sample	Vibration frequency, Hz	Widmanstätt structure score in the HAZ overheating section of the weld	The degree of grain variation in the HAZ normalization section of the weld
1	0	2-3	0,44
2	25	1-2	0,41
3	50	2	0,37
4	125	4	0,43
5	200	3	0,49

The main fracture-sensitive zone of the weld is the heat-affected zone, namely, the overheating area due to the appearance of needle-like structures in it.

Annealing after welding of electric-welded pipes in the current technological process is required not only to remove residual stresses, but also to refine the structure and increase its uniformity.

The coarser the structure (in this case, the higher the development score of the Widmanstätt structure), the more difficult it is to be eliminated during subsequent heat treatment. Recrystallization annealing often does not completely eliminate the coarse Widmanstätt structure. And in the case of elimination of directionality (acicularity), in the places of overheating after annealing, a significant difference in grain size can be observed, which negatively affects the strength and operational properties of the welded product. Figure 13 shows the graph of the dependence of the level of graininess of the structure in the normalization section on the vibration frequency used in the welding process.

Analyzing Figure 13, it is obvious that the most homogeneous and uniform-grained structure both in the overheating area and in the normalization area was



found in Sample #3, welded with vibration at a frequency of 50 Hz. According to data from parallel studies of residual stresses, Sample #3 is also characterized by the highest percentage of reduction in residual stresses relative to the sample welded without the use of vibration - 71.41%.

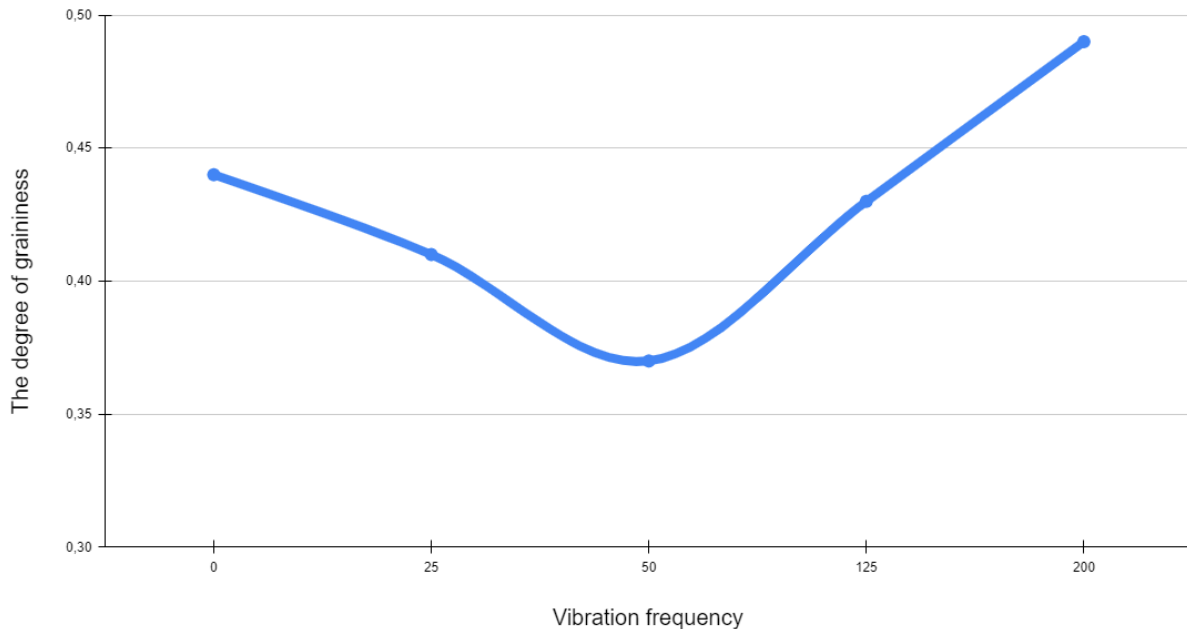


Fig. 13. Graph of the dependence of the level of graininess of the structure on the vibration frequency used in the welding process.

Thus, it can be concluded that the use of 50 Hz vibration in the welding process has a positive effect both on the level of residual stresses and on the uniformity of the metal structure. It should be noted that at a vibration frequency of 25 Hz (Sample No. 3), in spite of a more intensive grinding of grains, a large grain size difference and a high level of residual stresses were recorded.

Conclusions.

1. The conducted analytical studies of the effect of vibration on the microstructure of the welded seam showed the need for experimental studies aimed at changing the microstructure of the weld metal directly during the welding process.

2. As a result of an experimental study of the welding process on preformed tubular billets with the use of vibration exposure, the regularity of the change in the size of grains and grain size differences in the areas of overheating and normalization relative to the vibration frequency was established.

3. Investigation of the microstructure of the welded seams showed that the smallest grain size was recorded in the sample welded using vibration at a frequency of 25 Hz. The grain size in this sample was 41 μm in the overheating area and 6.4 μm in the normalization area.

4. The most homogeneous and uniform-grained microstructure was found in a specimen welded using vibration at a frequency of 50 Hz. The score of the Widmanstätt structure in the HAZ overheating section of the weld was 2 points. The degree of graininess in the normalization area is 0.37.



References.

1. Moroz LS. *Mechanics and Physics of Deformations and Fracture of Materials*. Leningrad: Mashinostroenie, 1984, p. 223.
2. Gorenko VG, Rusakov PV. Static and dynamic methods of reducing the level of residual stresses and stabilizing the size of olives. In : *Improving the reliability and durability of cast parts: collection of scientific works of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Institute of Casting Problems*, 1987, pp. 23-39.
3. Skakovskiy VD. *Development of technology for vibration treatment of frame-type welded structures*. For a job. learned Degree, K.: Publishing house E.O. Patona IES, 1987.
4. Mezhdov VKh., Askhabov KhI., Eldarkhanov AS. and et al. *Vibration influence on crystallization of organic ingot. Influence of external influences on liquid and crystallizing metal*. For a job. learned Degree, Kiev: IPL of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1983.
5. Taranov ED., Nuradinov AS., Kondratyuk SE. et al. Crystallization and structure formation of steel ingots under vibration impact. *Casting processes*, 1998; 3-4: 84-90.
6. Balakin YuA., Gladkov MI. Energy intensity of external influence on solidifying metal from the standpoint of thermodynamics. *Izv. universities. Black metallurgy*, 2001; 6: 44-46.
7. Gladkov MI, Balakin YuA, Goncharevich IF. Thermodynamic analysis of the conditions of nucleation and growth of crystals during vibration treatment of metal. *Izv. universities. Black. Metallurgy* 1989; 9: 27-29.
8. Efimov VA., Eldarkhanov AS. *Technologies of modern metallurgy*. M.: New technologies, 2004, p. 784.
9. Servetnik VM, Solyanikov BG, Nosov VA. Improvement of the quality of steel ShKh15 by vibro-processing of ingots. *Steel* 1987; 4: 48-49.
10. Eldarkhanov AS. *Application of physical methods of modeling to study the effect of vibration on the solidification of alloys*. Dis. Dr. tech. sciences, Kiev, Ukraine, 1996.
11. Balakin YuA., Gladkov MI. Calculation of the parameters of vibration treatment of crystallizing metals. *Izv. universities. Black. Metallurgy* 2003; 9: 56-60.



УДК 621.791.011

**METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF THE STRUCTURAL STATE OF
LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS AFTER AUTOMATIC
SUBMERGED-ARC WELDING****МЕТАЛОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРНОГО СТАНУ НИЗЬКОВУГЛИЦЕВИХ
НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПІД
ШАРОМ ФЛЮСУ****Laukhin D.V. / Лаухін Д.В.***Dr. Sc. (Tech.), Prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-9842-499X

Beketov O.V., Бекетов О.В.*Ph. D., Assos. prof. / к.т.н., доц.,*

ORCID: 0000-0003-0664-0327

Tyuterev I.A. / Тютєрев І.А.*Ph. D., Assos. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-1224-3355

Slupska Yu.S. / Слупська Ю. С.*Ph.D. student / аспір.,*

ORCID: 0000-0002-7983-1602

*Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture,**24A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49005**Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,**вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49005***Rott N.O. / Ротт Н.О.***Ph. D., Assos. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-3839-6405

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,**пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005**National Technical University «Dnipro Polytechnic»**19, ave. D. Yavornytsky, Dnipro, Ukraine, 49005***Chashyn D.Yu. / Чашин Д.Ю.***Ph. D., Assos. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-0986-9349

Toropchenov H. O. / Торопченко Г. О.*master of engineering / маг.*

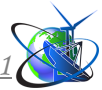
ORCID: 0000-0003-0954-9844

Ryko M. O. / Рыко М. О.*master of engineering / маг.*

ORCID: 0000-0002-3867-5391

*Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture,**24A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49005**Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,**вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49005*

Анотація. Постановка проблеми. В даний час зварювання частіше всього використовується в сучасному будівництві для отримання жорстких нероз'ємних з'єднань, так як цей тип з'єднання достатньо швидкий та простий у застосуванні. Цей технологічний процес є також економічно вигідним, тому що можна зібрати на місці складну конструкцію, а не виплавляти її на виробництві. Економія металу при заміні клепаних конструкцій може досягати майже 20%, тоді як при заміні литих деталей –



близько половини. Зварні деталі, мають міцність, рівну міцності основного металу. Технологічна схема процесу зварювання забезпечує структурний стан самого з'єднання, і як наслідок, відповідний комплекс властивостей. Таким чином, металографічне дослідження структурного стану зварного з'єднання є актуальною задачею з точки зору визначення потенційних місць зародження руйнування під дією зовнішнього навантаження. **Мета.** Дослідження структурного стану зварного з'єднання низьковуглецевих низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після зварювання під шаром флюсу. **Висновок.** В роботі досліджено структурний стан зварного з'єднання низьковуглецевих низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після автоматичного зварювання під шаром флюсу.

Ключові слова: зварювання під шаром флюсу, автоматичне дугове зварювання, мікроструктура зварного шва, кристалізація зварної ванни, структурний стан.

Вступлення.

У даний час зварювання частіше всього використовується в сучасному будівництві для отримання жорстких нероз'ємних з'єднань, так як цей тип з'єднання достатньо швидкий та простий у застосуванні [1]. Цей технологічний процес є також економічно вигідним, тому що можна зібрати на місці складну конструкцію, а не виплавляти її на виробництві. Економія металу при заміні клепаних конструкцій може досягати майже 20%, тоді як при заміні литих деталей – близько половини. Зварні деталі, мають міцність, рівну міцності основного металу [2]. Останні світові тенденції досліджень направлені на оптимізацію технологічних параметрів зварювання та створення нового обладнання, що дозволило створювати високотехнологічні продукти у більшості видах промисловості [3, 4].

При цьому технологічна схема процесу зварювання забезпечує структурний стан самого з'єднання, і як наслідок, відповідний комплекс властивостей [5-8]. Таким чином, металографічне дослідження структурного стану зварного з'єднання є актуальною задачею з точки зору визначення потенційних місць зародження руйнування під дією зовнішнього навантаження. Виходячи з цього, метою даної роботи є дослідження структурного стану зварного з'єднання низьковуглецевих низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після автоматичного зварювання під шаром флюсу.

Матеріал та методика

В якості матеріалу для даного дослідження були обрані низьковуглецеві низьколеговані сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ. Хімічний склад досліджуваних марок представлений у табл.1.

Таблиця 1.

Хімічний склад сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ

Сталь	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	Fe
09Г2С	до 0,12	0,5-0,8	1,3-1,7	до 0,3	до 0,035	до 0,03	до 0,3	до 0,12	до 0,008	до 0,3	залишок
10ХСНД	до 0,12	0,8 - 1,1	0,5 - 0,8	0,5 - 0,8	до 0,04	до 0,035	0,6 - 0,9	-	до 0,008	0,4 - 0,6	-
10Г2ФБ	0,08... 0,13	0,15-0,35	1,6-1,8	до 0,3	до 0,035	до 0,03	до 0,3	0,05-0,12	-	-	-

Низьковуглецеві низьколеговані сталі 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ, виготовлялися за технологічною схемою безперервної контрольованої прокатки (рис.1) по прикладу [9].

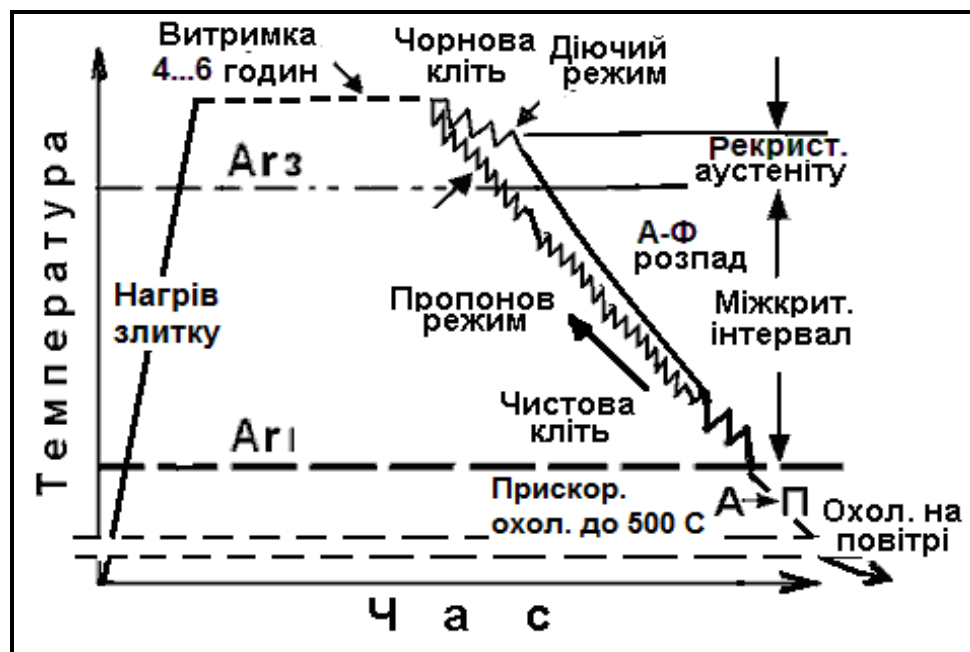


Рис. 1. Схема безперервної контрольованої прокатки [9].

Експериментальне автоматичне дугове зварювання під шаром флюсу було здійснено на обладнанні Інституту електрозварювання ім. Е.О.Патона НАН України. Зварювання виконувалося: під флюсом АНКС-28; проволокою Св-10Г1НМА1. Шов на режимах: 1 шов (вузький) – 600А-28В-19м/ч; 2 шов (широкий) – 750А-33В-19м/ч.

Експериментальна частина

Дослідження морфологічної будови зварного з'єднання здійснювали на підставі літературних джерел [10-13], та згідно принципу розділення зон зварного з'єднання. Схематичне зображення місць контролю структури наведено на рис. 2 [14].

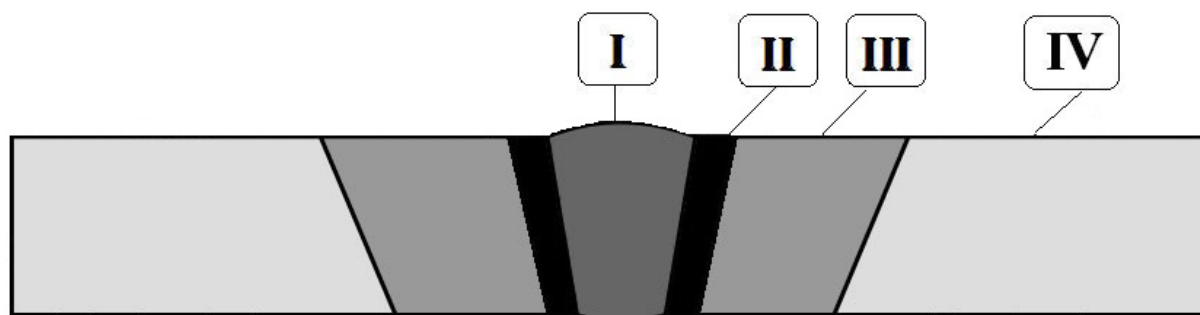


Рис. 2. Зони зварного з'єднання (за даними роботи [14]):

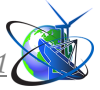
Зона I – зварний шов.

Зона II – границя зварний шов – зона термічного впливу.

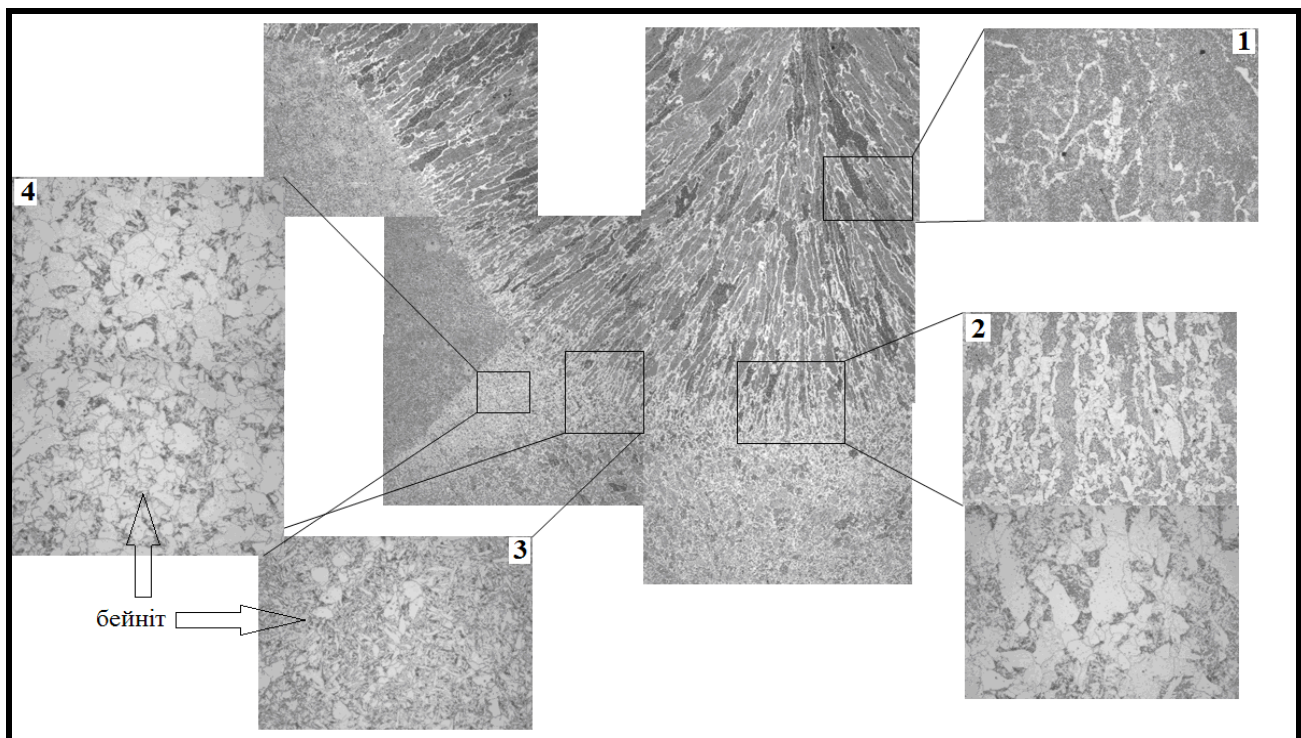
Зона III – зона термічного впливу.

Зона IV – границя зони термічного впливу-основний метал [10 – 14].

З метою узагальнення отриманих даних мікроструктурних досліджень було побудовано загальні картини (монтажі) зварного з'єднання після зварювання під шаром флюсу для всіх досліджуваних марок сталей, які представлено на рис. 3 ,4, 5.



Проведений комплекс металографічних досліджень показує, в центрі зварного шва присутня дендритна структура, що характерна для литого металу (рис.5). Поява дендритної структури пояснюється тим, що саме у даній зоні відбувається нагрів до температури плавлення, як основного металу, так і флюсу. В наслідок цього, наступне охолодження призводить до неповної сегрегації домішок, які потрапляють до розплаву з флюсу. Як наслідок, домішки залишаються між кристалами α - фази, яка зростає, що призводить до появи міждендритної ліквіації. При наближенні до границі зони 1, швидкість кристалізації змінюється, як наслідок, $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення відбувається при більш низьких температурах, ніж в середині зони. Як наслідок, в зоні 2 кристалізація відбувається при більш низьких температурах. Таким чином, спостерігаються пластинки фериту, що виділились під кутом 120° – структура відманштеттового ферриту [15] (рис.4). В наслідок появи α - фази відбувається перерозподіл вуглецю в γ -фазі, що призводить до утворення аустенітних областей, які будуть збагачені вуглецем майже до концентрації $\approx 0,8\% \text{C}$, і при наступному охолодженні вони перетворюються з формуванням перліту. Згідно літературних джерел [16], перлітна складова, яка формується за таких умов, має назву квазієвтектоїду. Через порівняно високу швидкість охолодження, аустеніт який залишається зазнає перетворення за проміжним механізмом, тобто, формується бейнітна складова (рис.3).



**Рис. 3. Загальний вид та будова структури зварного з'єднання після зварювання під шаром флюсу: сталь 09Г2С:
1– зона І; 2,3 – зони ІІ; 4– зона ІІІ.**

В наслідок структурних перетворень, які відбуваються під впливом температури зварювання та хімічного складу електричного дроту, перлітна



складова зазнає процеси сфероїдезації, що призводять до появи в зоні 3 сфероїдезованого перліту (рис. 4).

Структурний стан зони IV відповідає структурі металу, що був нагрітий в міжкритичному інтервалі температур. Відповідно, в структурі присутні великі зерна фериту, та дрібних колоній квазієвтектоїду, які є наслідком часткової рекристалізації аустеніту.

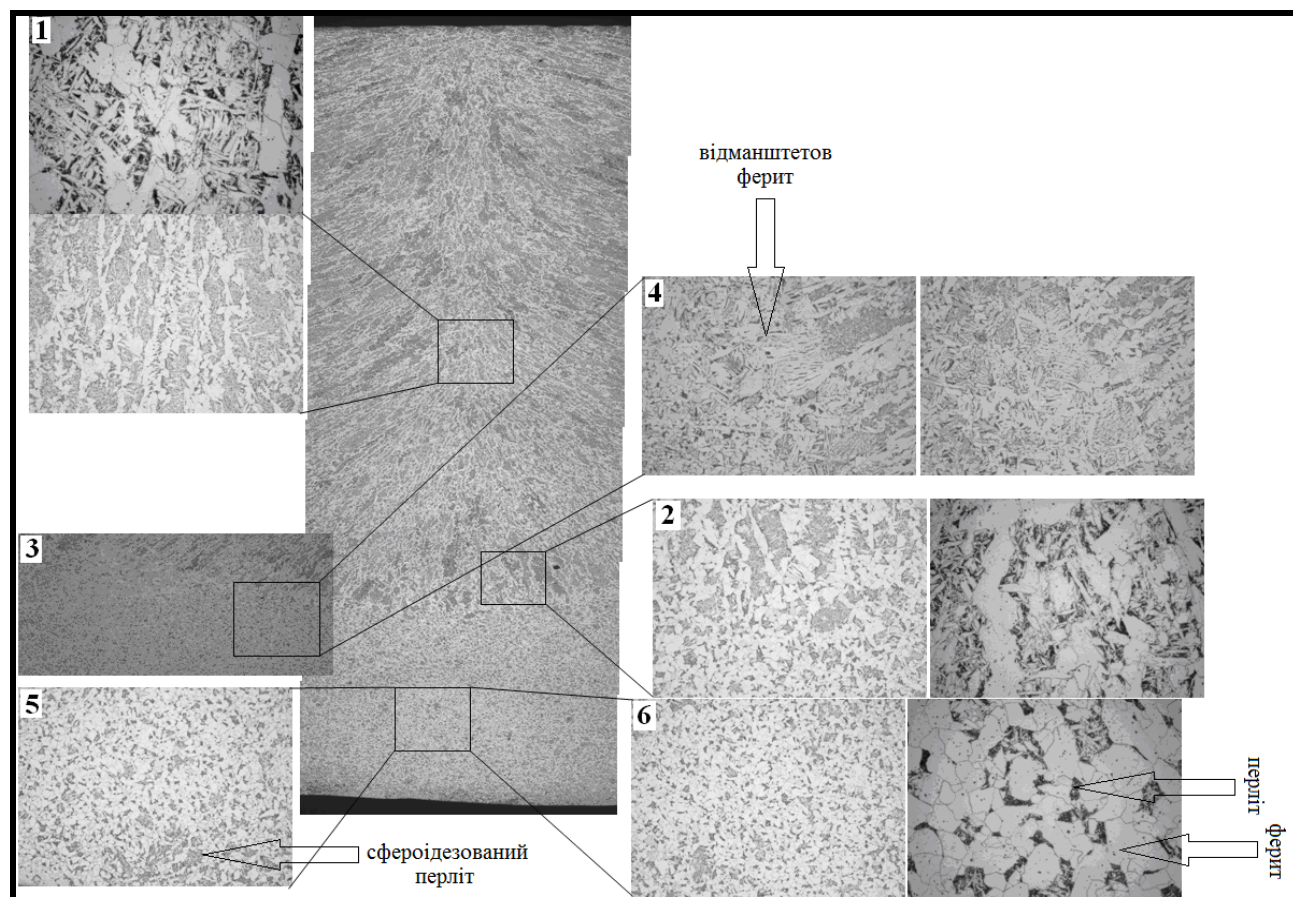


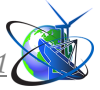
Рис. 4. Загальний вид та будова структури зварного з'єднання після зварювання під шаром флюсу: сталь 10ХСНД: 1,2 – зона I; 3,4– зона II; 5,6 – зона III.

Таблиця 2.

Відсоткове співвідношення структурних складових сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ.

Марка сталі	Зона 2		Зона 3			Зона 4	
	Ферит	Перліт	Ферит	Перліт	Бейніт	Ферит	Перліт
09Г2С	60	40	50	40	10	55	45
10ХСНД	45	55	40	60	-	40	60
10Г2ФБ	40	60	35	50	15	45	55

Для виконання кількісного аналізу отриманих даних було здійснено експериментальне вимірювання відсоткового співвідношення структурних складових по зонах зварного з'єднання досліджувальних марок сталі.



Результати приведенного комплексу досліджень наведено на рис. 6, 7.

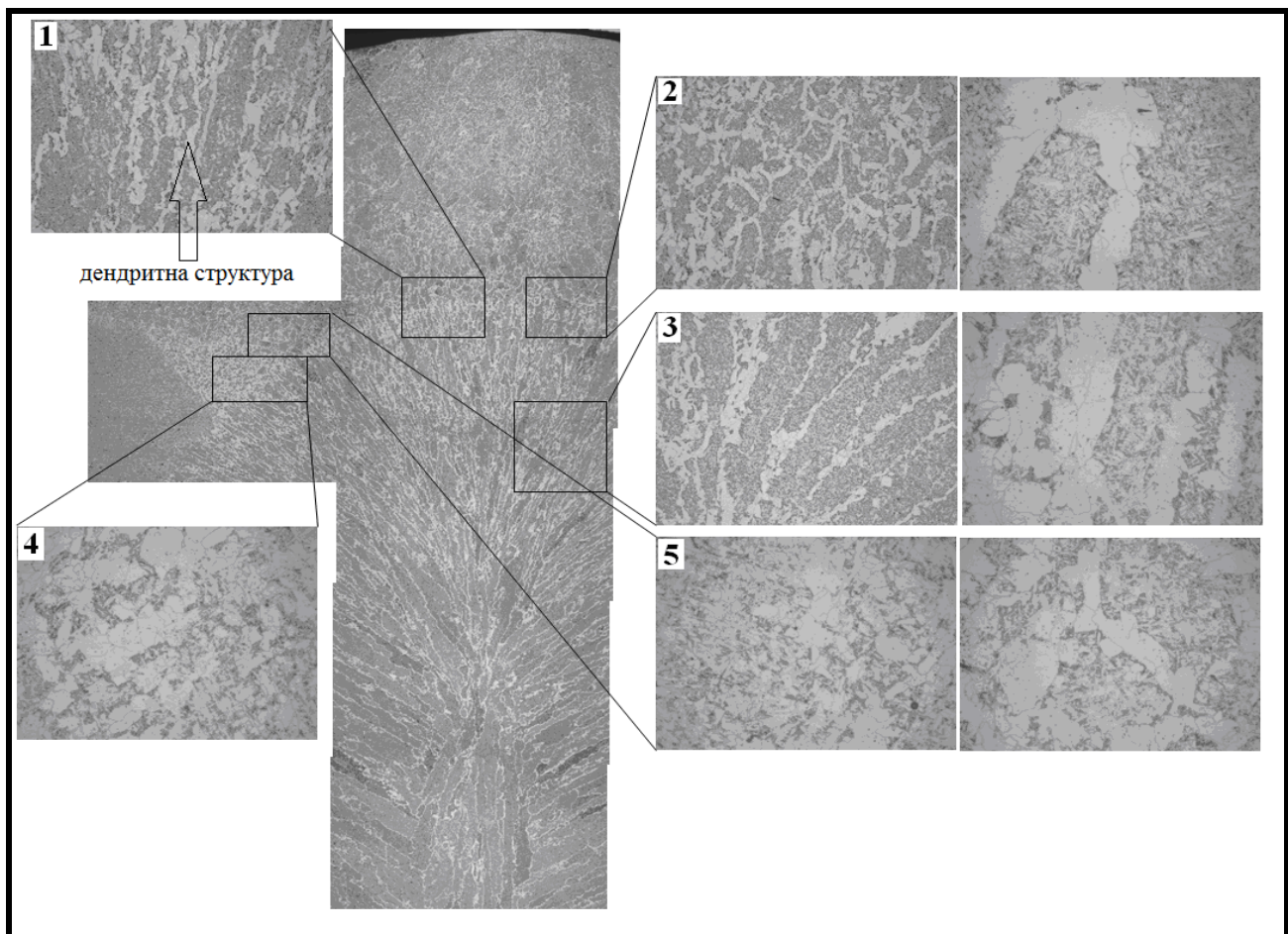


Рис. 5. Загальний вид та будова структури зварного з'єднання після зварювання під шаром флюсу: сталь 10Г2ФБ: 1,2,3 – зона І; 4,5 – зона ІІ.

Сумісний аналіз даних наведених на в таблиці 2 та на рис. 6, 7 вказує, що відсотковий вміст феритної складової для сталі 09Г2С та 10Г2ФБ зменшується зі збільшенням відстані від зони І. Цей факт пояснюється формуванням бейнітної складової, яка відбувається в наслідок перерозподілу вуглецю в аустеніті та порівняно високої швидкості охолодження. Для сталі 10ХСНД відсотковий вміст феритної складової по зонам зварювального з'єднання майже не змінюється (зміни знаходяться в межах похибки). При цьому, на відміну від сталі 09Г2С та 10Г2ФБ в сталі 10ХСНД спостерігається часткова зміна морфологічної будови фериту (з'являється відменштетов ферит). (рис. 4).

Аналіз зміни відсоткового вмісту квазієвтектоїду показує, що для сталі 09Г2С та 10ХСНД відбувається незначне підвищення вмісту перлітної складової в зоні ІІ та ІІІ. Цей факт пояснюється збільшенням локальних областей з концентрацією вуглецю $\approx 0,78\%$.

Для сталі 10Г2ФБ спостерігається зменшення квазієвтектоїду в зоні ІІ, що пояснюється перерозподілом вуглецю, в наслідок якого відбувається формування бейнітної складової.

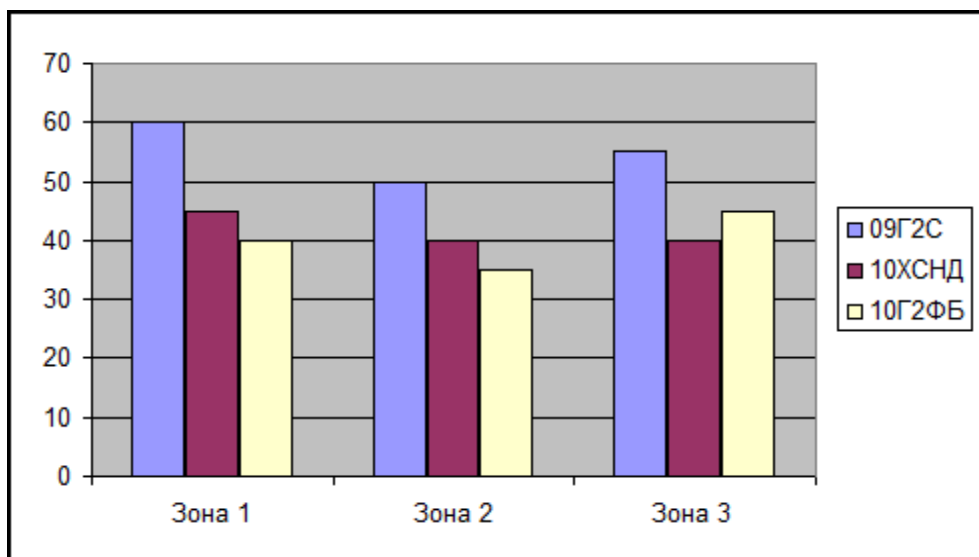


Рис. 6. Відсоткове співвідношення вмісту структурних складових фериту для сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ

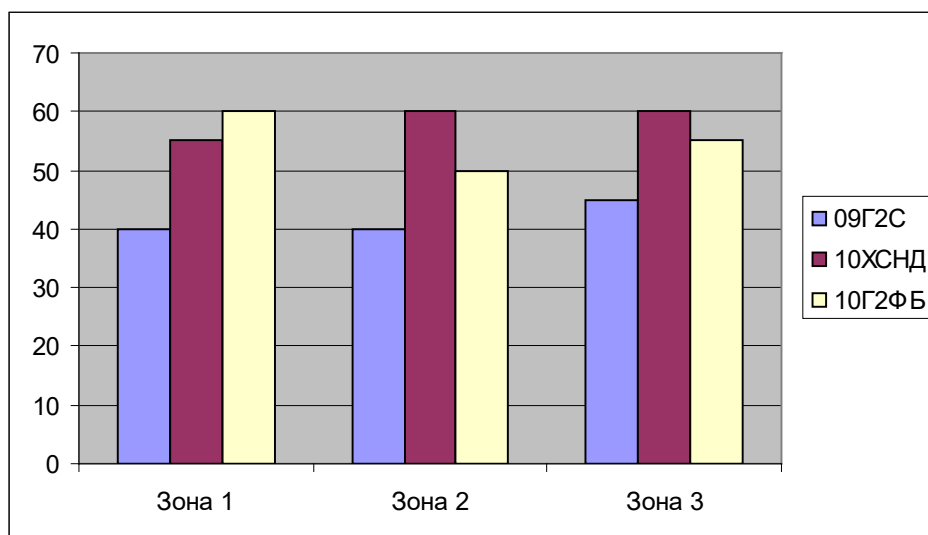


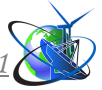
Рис.7. Відсоткове співвідношення вмісту структурних складових перліту для сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ

Висновки

1. У роботі досліджено структурний стан зварного з'єднання низьковуглецевих низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2ФБ після автоматичного зварювання під шаром флюсу.

2. Проведений комплекс металографічних досліджень показав, що для всіх досліджувальних марок сталей в структурі шва, в структурі зварного з'єднання можливо теоретично відокремити зони, які відрізняються морфологічною будовою: зварний шов, границя зварний шов-зона термічного впливу, зона термічного впливу, границя зона термічного впливу-основний метал.

3. Для зони зварного шва характерна дендритна структура, яка формується в наслідок неповної сегрегації домішок, які потрапляють до розплаву з флюсу.



4. Для зони II та III для сталей 10ХСНД спостерігається поява відменштетового фериту та дрібних колоній квазієвтектоїду, що є наслідком підвищеної швидкості охолодження. Для сталей 09Г2С та 10Г2ФБ спостерігається поява бейнітної складової, що є наслідком перерозподілу вуглецю, і появи збіднених вуглецем локальних областей аустеніту.

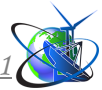
5. Зона IV для всіх досліджувальних марок сталі характеризується появою порівняно (з іншими зонами) зерен фериту та дрібних колоній квазієвтектоїду. Формування такого структурного стану обумовлено частковою рекристалізацією вихідного зерна аустеніту.

6. Кількісний аналіз отриманих даних показує, що відсотковий вміст доевтектоїдного фериту для сталей 09Г2С та 10Г2ФБ змінюється зі збільшенням відстані від зони сплавлення, що пояснюється формуванням бейнітної складової. При цьому, для сталі 10ХСНД в зонах зварного з'єднання спостерігається поява Відманшететового фериту, що є наслідком підвищеної швидкості охолодження.

7. Підвищення вмісту колоній квазієвтектоїду свідчить про перерозподіл вуглецю під час охолодження після зварювання і, як наслідок, формування областей з концентрацією вуглецю $\sim 0,78\%C$.

Література

1. Santha Rao D., Ramanaiah N. Process parameters optimization for producing AA6061/TiB₂ composites by friction stir processing. *Journal of Mechanical Engineering - Strojnícky časopis*. 2017. Vol. 67, №1, P. 101-118.
2. Банников Е. А., Ковалев Н. А. Сварка : учеб. пособ. Москва : АСТ, 2014. 256 с.
3. Эрикссон Л. Г., Ларссон Р. Ротационная сварка трением — научные исследования и новые области применения. *Технология машиностроения*. 2003. № 6. С. 81–84.
4. Григоренко Г. М., Костин В. А. Свариваемость сталей и критерии ее оценки. *Сварочное производство*. 2012, Т. 10 № 935, С. 3–10.
5. Евсеев Р.Е., Евсеев В.Р. Сварка при производстве монтажных работ. Ленинград: Энергия, 1978. 296 с.
6. Яковлев Д.С., Шахматов М.В. Сварка трубных сталей высокой прочности с применением порошковых проволок. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2013. Т. 13. №1. С. 218-221.
7. Васильев В.И., Ильященко Д.П., Павлов Н.В. Введение в основы сварки. Юргинский технологический институт. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 317 с.
8. Трекин Г.Е., Шевченко О.И. Влияние алюминиевого электроискрового технологического подслоя и температуры отпуска на структуру и свойства низкоуглеродистого, низколегированного сварного шва. *Вестник ПНИПУ. Серия «Машиностроение, материаловедение»*. 2015. Т.17. №1. С.22-30.
9. Laukhin D., Beketov O., Rott N., Schudro A. The Elaboration of Modernized Technology of Controlled Rolling Directed at the Formation of High Strengthening and Viscous Qualities in HSLA Steel / *Solid State Phenomena*, 2019. Vol. 291,



pp 13-19.

10. Волченко В.Н. (ред) - Сварка и свариваемые материалы. Справочник. т.1 (1991)

11. Глизманенко Д.Л. Сварка и резка металлов: учеб. пособ. Изд. 5-е переработанное. Москва : Металлургия, 1984. 448 с.

12. Алексеев Е. К., Алексеев К.Е., Мельник В.И. Сварочное дело. М.: Госстройиздат, 1959. 326 с.

13. Соколов Е. В. Справочник по сварке. М.: Машгиз, 1962. 556 с.

14. Винокуров В. А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности: учеб. Пособ. / под ред.: Б. Е. Патона. - Москва: Машиностроение, 1996. 576 с.: ил.

15. Гуляев А.П. Металловедение: учеб. пособ. Изд. 5-е переработанное. Москва: Металлургия, 1978. 643 с.

16. Бекетов А.В., Большаков В.И., Куксенко В.И., Сухомлин Г.Д., Лаухин Д.В., Семенов Т.В. Образование и рост перлитных колоний. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. Дніпро. 2010. №1. С.29-35.

Abstract. Formulation of the problem. Nowadays, welding is most often used in modern construction to obtain rigid permanent joints, as this type of connection is quite fast and easy to use. This technological process is also cost-effective, because you can assemble a complex structure on site, rather than smelting it in production. Metal savings when replacing riveted structures can reach almost 20%, while when replacing cast parts - about half. Welded parts have a strength equal to the strength of the base metal. The technological scheme of the welding process provides the structural state of the joint, and as a consequence, the corresponding set of properties. Thus, metallographic study of the structural state of the welded joint is an urgent task in terms of determining the potential sites of failure under the action of external loads. **Goal.** Investigation of the structural condition of the welded joint of low-carbon low-alloy steels 09G2S, 10HSND, 10G2FB after submerged arc welding. **Conclusion.** The structural state of the welded joint of low-carbon low-alloy steels 09G2S, 10HSND, 10G2FB after automatic welding under the flux layer is investigated.

Key words: submerged arc welding, automatic arc welding, weld microstructure, weld bath crystallization, structural state.

Стаття відправлена: 10.04.2021 г.

© Лаухін Д.В.



УДК 631.8

STUDY OF THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE MORPHOLOGICAL STRUCTURE OF CRYSTALS DURING ISOTHERMAL CRYSTALLIZATION

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА МОРФОЛОГІЧНУ СТРУКТУРУ КРИСТАЛІВ ПРИ ІЗОТЕРМІЧНІЙ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

Iatsiuk I.O. / Яцюк І.О.

master /magistp

ORCID: 0000-0002-4925-1906

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Peremohy avenue, 03056

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ,
проспект Перемоги, 37, 03056

Анотація. Розглянуто ізотермічну кристалізацію сульфату амонію. Наведені базові теоретичні засади процесу масової кристалізації, визначено фактори, що впливають на морфологічну структуру кристалів сульфату амонію (температура, рівень пересичення розчину, рівень рН розчину, наявність домішок, тощо) на стадії кристалізації та мають вплив на якість готового продукту. Наведено результати експериментів, які пояснюють вплив температури проведення експерименту на морфологічну структуру кристалів. Обґрунтовано доцільність проведення подальших досліджень процесу кристалізації при підвищеному вмісті цільових домішок.

Ключові слова: кристалізація, випаровування, сульфат амонію, морфологічна структура.

Вступ.

В останні десятиліття родючість ґрунтів України стрімко знижується внаслідок нераціонального землекористування, ерозії ґрунтів, забруднення пестицидами, гербіцидами, залишками мінеральних добрив, несприятливих погодних умов та ущільнення ґрунтів при обробці сільськогосподарською технікою.

Значний негативний вплив на родючість ґрунтів мають зниження балансу поживних речовин, декальцинація, забруднення та фізична деградація. Всі ці негативні процеси є наслідком надмірного використання мінеральних добрив, недотриманням сівозмін, та надто інтенсивного обробітку земель.

Інноваційним методом збільшення родючості ґрунтів, а отже і підвищення потенціалу аграрної промисловості є використання гранульованих органіко-мінеральних добрив нового покоління [1] з заданим складом корисних компонентів.

Основним способом виробництва таких добрив є гранулювання в апаратах з псевдозрідженим шаром методом ізотермічної кристалізації [2]. Саме процес кристалізації сульфату амонію в присутності домішок поживних речовин не є повністю вивченим, тому в цій роботі буде розглянуто основні принципи процесу масової кристалізації та визначено фактори, які суттєво впливають на процес.

Основний текст

При проведенні процесу масової кристалізації гетерогенних рідких систем з високим вмістом сухих речовин (понад 40%), досить вагомий вплив на



структуру, форму та впорядкованість кристалів і характер їх впорядкованості мають такі параметри, як об'єм розчину, характер взаємодії розчину з поверхнею, спосіб кристалізації та наявність розчинних і нерозчинних домішок. Всі ці параметри можуть суттєво змінити якісні параметри отриманого композитного матеріалу.

При ізотермічній масовій кристалізації на нагрітій твердій поверхні важливим параметром є швидкість випаровування розчинника [3], яка насамперед залежить від вологості та температури газової фази. Температура поверхні за якої проводиться масова кристалізація характеризує інтенсивність випаровування розчинника з крапліни чи плівки.

При проведенні процесу масової кристалізації на поверхні нагрітих до високих температур можлива термічна деструкція компонентів, які проходять фазовий перехід чи компонентів, які є в складі рідкої суміші. Іншим небажаним явищем є ефект Ляйденфроста [4], у результаті якого відбувається зниження коефіцієнтів теплопередачі за рахунок формування парового простору між нагрітою поверхнею та краплиною. Іншим фізичним явищем, яке також може суттєво впливати на процес кристалізації є потік Марангоні [5], який виникає в крапліні за рахунок виникнення градієнту поверхневого натягу.

В роботі досліджується вплив наявних суспендованих домішок та температури поверхні на кінетику процесу масової кристалізації сульфату амонію. Умови проведення експерименту наступні: температура газового середовища $T_{\text{пов}} = 20^{\circ}\text{C}$, відносна вологість повітря $h_{\text{пов}} = 30\%$.

В досліді використовувався 40% водний розчин сульфату амонію без додавання сторонніх домішок, причому кристалізація круглої крапліни відбувається при температурі поверхні $T_{\text{пл}} = 90^{\circ}\text{C}$ на якій розміщено предметне скельце з краплиною. Перший фотознімок поверхні крапліни в момент часу $\tau = 100\text{с}$ від початку експерименту вказує на початок процесу утворення центрів кристалізації (рисунок 1).

Аналізуючи кожен наступний момент динаміки процесу масової кристалізації з $\Delta\tau = 100\text{с}$, по всьому об'ємі крапліни відбувається рівномірний ріст вже сформованих центрів кристалізації та їх об'єднання в стійкий каркас за допомогою кристалічних містків. При цьому процес масообміну пари в газову фазу стає менш інтенсивним внаслідок збільшення дифузійного опору на зовнішній поверхні крапліни. Дане явище також пояснює формування сплюснутих до центру кристалізованих крапліни, з межами у вигляді щільних агломератів (рисунок 1).

Ріст кристалів при кристалізації на горизонтальній поверхні (фронт кристалізації) відбувається в трьох напрямках, та в момент часу $\tau = 400\text{с}$ формується стійкий каркас з мікрокристалів сульфату амонію. Після цього починається процес видалення вологи з внутрішніх областей крапліни, внаслідок чого бульбашки пари, які досягли максимального розміру утворюють порожнини. Форма мікрокристалів має чітку зернисту структуру з видимими межами, розміри мікрокристалів варіюються від 10 до 100 мкм.

Аналіз структури кристалізованої крапліни 39,2% водного розчину сульфату амонію з 0,8 % вмістом гуматів на предметному скельці розміщеному



на нагрітій поверхні з температурою $T_{пл} = 90^{\circ}\text{C}$ в момент часу $\tau = 1200\text{с}$ вказує на формування друз та дендритів [6], які знаходяться за межами початкового розміщення краплини. Дане явище пояснюється збільшенням дифузійного опору в центрі краплини, внаслідок чого органічні компоненти частково закривають поверхню мікрокристалів.

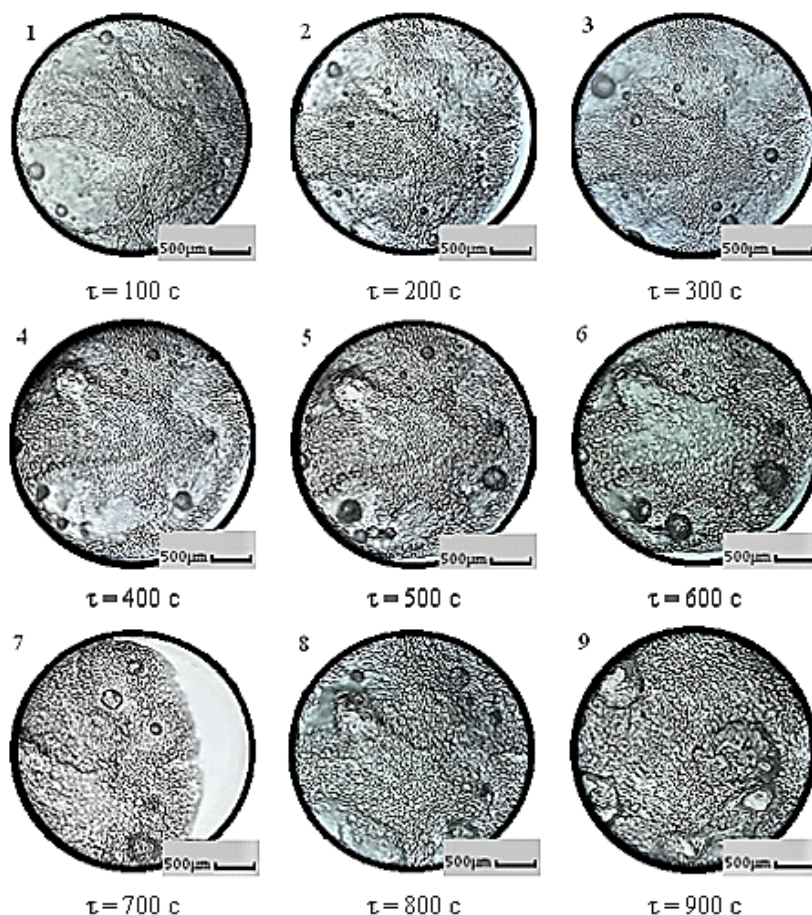


Рисунок 1 - Мікрофотознімки динаміки процесу масової кристалізації краплини 40% розчину СА на скляній поверхні між інтервалами 100с, збільшення $\times 36$

Авторська розробка

Тому центри кристалізації утворюються за межами краплини та відбувається формування розвиненої кристалічної структури за межами початкового розміщення краплини на поверхні. Дане явище дозволяє створити передумови для формування нових активних центрів кристалізації для проведення процесу пошарової масової кристалізації.

Висновки.

В даній роботі було розглянуто теоретичні основи кристалоутворення та процесу кристалізації, було сформовано основні параметри, що впливають на процес. Також було приведено фотознімки результатів експериментів, в яких зображено як саме ті чи інші фактори впливали на морфологічну структуру кристалів.

Проведені експерименти показали, що наявність суспендованих чи емульсованих домішок у складі розчину сульфату амонію при масовій



кристалізації за температури $T_{пл} = 90^{\circ}\text{C}$, суттєво впливає на морфологічну структуру мікрокристалів. Так, наявність гуматів з відносною масовою концентрацією 0,8% у складі 40% водного розчину сульфату амонію сприяє формуванню кристалів з більшим приведеними розмірами і більшою кількістю дислокацій, та сприяє більш інтенсивному формуванню агломератів. Гумінові речовини розміщуються у кристалічному каркасі як ендосегрегації у дрібних мікрокристалах сульфату амонію.

Також експериментально підтверджено, що збільшення дифузійного опору в центрі краплини, через збільшення концентрації домішок органічного походження призводить до формування друз та дендритів за межами початкового розміру краплини, що сприяє утворенню робочих структур для формування в подальшому каркасу із кристалів сульфату амонію.

Література

1. Корнієнко Я. М., Степанюк А. Р. Створення гуміново-мінеральних добрив для забезпечення екологічної рівноваги // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження – 2008. – № 2, с. 48 – 52.
2. Корнієнко Я. М., Мельник М. П., Мартинюк О. В. – Струменевопульсаційний режим псевдозрідження. / Монографія [Електронний ресурс]. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 235 с.
3. Острога, Р. А., Юхименко, Н. П., Михайловский, Я. Э., & Литвиненко, А. В. (2016). Технология получения гранулированных удобрений на органической основе. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, (1 (6)), с. 19-26.
4. Kornienko Y.M., Hayday S.S., Liubeka A.M., Martynyuk O.V. (2016), Kinetic laws of the process of obtaining complex humic-organic-mineral fertilizers in the fluidized bed granulator, Ukrainian Food Journal, 5(1), pp. 144 – 154.
5. J.W.Mullin, Crystallization, 4th edition, Butterworth Heinemann, London, 2001.
6. Alberto Baldelli, Rory M. Power, Rachael E. H. Miles, Jonathan P. Reid & Reinhard Vehring (2016) Effect of crystallization kinetics on the properties of spray dried microparticles, Aerosol Science and Technology, 50:7, 693-704, DOI: 10.1080/02786826.2016.1177163.

References

1. Kornienko Y. M. & Stepaniuk A. R. (2008). Creation of humic and mineral fertilizers to ensure ecological balance. Chemical Engineering, Ecology and Resource Conservation, 2nd ser., 48-52.
2. Kornienko Y.M. & Melnyk M.P. & Martyniuk O.V. (2013) - Jet-pulsation mode of fluidization, p. 235.
3. Ostroga R.A. & Litvinenkko A.V. (2016). Technology of obtaining granular fertilizers on an organic basis. Eastern European Journal of Advanced Technology, 19-26.
4. Kornienko Y.M. & Hayday S.S. (2016), Kinetic laws of the process of obtaining complex humic-organic-mineral fertilizers in the fluidized bed granulator, Ukrainian Food Journal, 144 – 154.
5. J.W.Mullin (2011) Crystallization. Butterworth Heinemann, London.
6. Alberto Baldelli & Reinhard Vehring (2016) Effect of crystallization kinetics on the



properties of spray dried microparticles, Aerosol Science and Technology, 50:7, 693-704, DOI: 10.1080/02786826.2016.1177163.

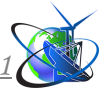
Abstract. *Isothermal crystallization of ammonium sulfate is considered. The basic theoretical principles of the mass crystallization process are given, factors influencing the morphological structure of ammonium sulfate crystals (temperature, level of saturation of the solution, the level of the solution of the solution, the presence of impurities, etc.) at the stage of crystallization and have an effect on the quality of the finished product. The results of experiments that explain the influence of the temperature of the experiment on the morphological structure of crystals are presented. It is substantiated the expediency of conducting further studies of the crystallization process with increased content of target impurities.*

Key words: *crystallization, evaporation, ammonium sulfate, morphological structure.*

Стаття відправлена: 11.04.2021 р.
© Яцюк І.О.

**Expert-Peer Review Board of the journal**
Экспертно-рецензионный Совет журнала

Abdulveleva Rauza Rashitovna, Orenburg State University, Russia
Antoshkina Elizaveta Grigorevna, South Ural State University, Russia
Artyuhina Marina Vladimirovna, Slavic State Pedagogical University, Ukraine
Afinskaya Zoya Nikolaevna, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Russia
Bashlaj Sergej Viktorovich, Ukrainian Academy of Banking, Ukraine
Belous Tatyana Mihajlovna, Bukovinian State Medical Academy, Ukraine
Bondarenko Yuliya Sergeevna, PSU named after T.G. Shevcheckko Department of Psychology, Ukraine
Butyrskij Aleksandr Gennadevich, Medical Academy named after S.I. Georgievsky, Russia
Vasilishin Vitalij Yaroslavovich, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine
Vojcehovskij Vladimir Ivanovich, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine
Gavrilova Irina Viktorovna, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Russia
Ginis Larisa Aleksandrovna, South Federal University, Russia
Gutova Svetlana Georgievna, Nizhnevartovsk State University, Russia
Ivanova Svetlana Yurevna, Kemerovo State University, Russia
Ivlev Anton Vasilevich, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Russia
Idrisova Zemfira Nazipovna, Ufa State Aviation Technical University, Russia
Iliev Veselin, Bulgaria
Kirillova Tatyana Klimentevna, Irkutsk State Transport University, Russia
Kovalenko Tatyana Antolevna, Volga State University of Telecommunications and Informatics, Russia
Kotova Svetlana Sergeevna, Russian State Vocational Pedagogical University, Russia
Krestyanpol Lyubov Yurevna, Lutsk State Technical University, Ukraine
Kuhtenko Galina Pavlovna, National University of Pharmacy of Ukraine, Ukraine
Lobacheva Olga Leonidovna, Mining University, Russia
Lyashenko Dmitrij Alekseevich, National Transport University, Ukraine
Makarenko Andrej Viktorovich, Donbass State Pedagogical University, Ukraine
Melnikov Aleksandr Yurevich, Donbass State Engineering Academy, Ukraine
Moroz Lyudmila Ivanovna, "National University" "Lviv Polytechnic" "", Ukraine
Muzylyov Dmitrij Aleksandrovich, Kharkov National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko, Ukraine
Nadopta Tatyana Anatolievna, Khmelnytsky National University, Ukraine
Napalkov Sergej Vasilevich, Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, Russia
Nikulina Evgeniya Viktorovna, Belgorod State National Research University, Russia
Orlova Anna Viktorovna, Belgorod State National Research University, Russia
Osipov Viktor Avenirovich, Tyumen State University, Russia
Privalov Evgenij Evgrafovich, Stavropol State Agrarian University, Russia
Pyzhyanova Nataliya Vladimirovna, Ukraine
Segin Lyubomir Vasilovich, Slavic State Pedagogical University, Ukraine
Sergienko Aleksandr Alekseevich, Lviv National Medical University named after Daniil of Galitsky, Ukraine
Sochinskaya-Sibirceva Irina Nikolaevna, Kirovograd State Technical University, Ukraine
Sysoeva Vera Aleksandrovna, Belarusian National Technical University, Belarus
Tleuov Ashat Halilovich, Kazakh Agro Technical University, Kazakhstan
Tolbatov Volodimir Aronovich, Sumy State University, Ukraine
Tolbatov Sergij Volodimirovich, Sumy National Agrarian University, Ukraine
Hodzhaeva Gyulnaz Kazym kyzy, Russia
Chigirinskij Yulij Lvovich, Volgograd State Technical University, Russia
Shehmirzova Andzhela Muharbievna, Adygea State University, Russia
Shpinkovskij Aleksandr Anatolevich, Odessa National Polytechnic University, Ukraine



CONTENTS/СОДЕРЖАНИЕ

Mechanical engineering and machinery

Машиностроение и машиноведение

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-007> 6

THE NUMERICAL SIMULATION OF THERMO-ELASTO-PLASTIC STATE OF COMPOSITES

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОПРУЖНОПЛАСТИЧНОГО СТАНУ КОМПОЗИТІВ
Karvatskii A. Ya. / Карвацький А. Я., Mikulionok I. O. / Мікульонюк І. О.,
Leleka S.V. / Лелека С.В., Vytyvyskyi V.M. / Витвицький В.М., Solovei V.V. / Соловей В.В.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-033> 18

THERMAL PROTECTION INSULATION IN THE LINING OF THE ROTARY KILNS

Shvachko D.G., Shcherbina V. Yu., Borshchik S.A.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-046> 24

MEASURING THE VISCOSITY OF LIQUIDS IN A CONICAL VISCOMETER

ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РІДИН В КОНІЧНОМУ ВІСКОЗИМЕТРІ
Andreiev I. A. / Андреев І. А., Koval V. O. / Коваль В. О.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-126> 29

REGENERATIVE HEAT EXCHANGER WITH NOZZLE FROM THE NET OF A CANVAS WEAVING

РЕГЕНЕРАТИВНИЙ ТЕПЛООБМІННИК З НАСАДКОЮ ІЗ СІТКИ ПОЛОТНЯНОГО ПЛЕТІННЯ
Dvoinos Y.H. / Двойнос Я.Г., Yevziutin Pavlo / Євзютін Павло

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-127> 34

COEFFICIENTS OF CRITERION EQUATION OF HEAT RELEASE GAS TO THE CORRUGATED PLATE

КОЕФІЦІЄНТИ КРИТЕРІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ГАЗУ ДО ГОФРОВАНОЇ ПЛАСТИНИ
Dvoinos Y.H. / Двойнос Я.Г., Italiantsev O.I. / Італьянцев О.І.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-128> 39

ESTIMATION OF SENSITIVITY OF DAMPING ABILITY OF STRUCTURES

ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ ДЕМПФУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ

Bovsunovsky A.P. / Бовсуновський А.П., Nosal O.Yu. / Носаль О.Ю.

Electrical engineering

Электротехника

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-035> 44

SIMULATION OF POWER LOSSES IN THE FREQUENCY CONVERTER

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЧАСТОТЫ
Nerubatskyi V. P. / Нерубацький В. П., Plakhtii O. A. / Плахтий А. А.
Hordiienko D. A. / Гордиенко Д. А., Karpenko N. P. / Карпенко Н. П.

**Engineering instruments, meters, etc. Industrial instrumentation****Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы**<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-027>

58

SEMICONDUCTOR TEMPERATURE SENSORS - THERMORESISTORS*НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ – ТЕРМОРЕЗИСТОРИ**Gorbachuk N.T. / Горбачук М.Т., Shybyryn V.S. / Шибырин В.С.***Telecommunication****Радиотехника и связь**<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-112>

62

SELECTION OF EFFICIENT DIGITAL PHASE MODULATION IN TELECOMMUNICATION SYSTEM*ВИБІР ЕФЕКТИВНОЇ ЦИФРОВОЇ ФАЗОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ**Pelishok V.O. / Пелішок В.О., Shestopal Y.O. / Шестопал Є.О., Semenko A.I. / Семенко А.І.***Electrical engineering. Electronics. Nuclear engineering****Энергетика**<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-069>

68

MODELING OF THE MATRIX BASE OF DESIGN OF INNOVATIVE EQUIPMENT FOR OBTAINING RENEWABLE ENERGY FROM CO₂*МОДЕЛЮВАННЯ МАТРИЧНОЇ БАЗИ ПРОЕКТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ З CO₂**Grigorieva N. / Григор'єва Н.С., Shabaykovich V. / Шабайкович В.А.**Gumeniuk L. / Гуменюк Л.О., Humeniuk P. / Гуменюк П.О.*<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-073>

77

ESTIMATION OF BUILDING INSULATION EFFICIENCY UNDER THE CONDITIONS OF CENTRALIZED HEAT SUPPLY WITH BRANCHED HEAT NETWORKS*ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ УТЕПЛЕННЯ БУДИНКІВ В УМОВАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ПРИ РОЗГАЛУЖЕННИХ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖАХ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**Aleksahin O. O. / Алексахін О. О., Bilovol H. V. / Біловол Г. В.,**Boblovskii O. V. / Бобловський О. В., Vasylenko O. V. / Василенко О. В.**Panchuk O.V. / Панчук О.В.*<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-111>

89

SECONDARY POWER SUPPLY WITH STORAGE DEVICE ELECTRICAL ENERGY*ВТОРИЧНИЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ С НАКОПИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**Uskov D.S. / Усков Д. С., Naumenko A.A. / Науменко А. А.**Valyanov D.P. / Вальянов Д. П.*

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-001>**94****EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF VIBRATION ON THE MICROSTRUCTURE OF THE WELD OF A PIPE BILLET***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЇ НА МІКРОСТРУКТУРУ ЗВАРНОГО ШВА ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ**Balakin V.F., Kadylnykova T.M., Savkin S.V., Kadylnykova A.V.*<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-088>**105****METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF THE STRUCTURAL STATE OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS AFTER AUTOMATIC SUBMERGED-ARC WELDING***МЕТАЛОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРНОГО СТАНУ НИЗЬКОВУГЛИЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПІД ШАРОМ ФЛЮСУ**Laukhin D.V. / Лаухін Д.В., Beketov O.V., Бекетов О.В.**Tyuterev I.A. / Тютєрев І.А., Slupska Yu.S. / Слупська Ю. С.**Rott N.O. / Ротт Н.О., Chashyn D.Yu. / Чашин Д.Ю.**Toropchenov H. O. / Торопченко Г. О., Рыко М. О. / Пико М. О.*<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit16-01-098>**114****STUDY OF THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE MORPHOLOGICAL STRUCTURE OF CRYSTALS DURING ISOTHERMAL CRYSTALLIZATION***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА МОРФОЛОГІЧНУ СТРУКТУРУ КРИСТАЛІВ ПРИ ІЗОТЕРМІЧНІЙ КРИСТАЛІЗАЦІЇ**Iatsiuk I.O. / Яцюк І.О.*



International periodic scientific journal

MODERN ENGINEERING AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Heutiges Ingenieurwesen und
innovative Technologien

Indexed in
INDEXCOPERNICUS
high impact factor (ICV: 98.95)

Issue №16
Part 1
April 2021

Development of the original layout - Sergeieva&Co
Articles published in the author's edition

Signed: April 2021

Sergeieva&Co
Lußstr. 13
76227 Karlsruhe
e-mail: editor@moderntechno.de
site: www.moderntechno.de



With the support of International research
project SWorld
www.sworld.education





www.moderntechno.de

e-mail: editor@moderntechno.de