



ISSUE №13

Part №1



International periodic scientific journal

—*ONLINE*

www.moderntechno.de

Indexed in
INDEXCOPERNICUS
(ICV: 84.35)



MODERN ENGINEERING AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Heutiges Ingenieurwesen und
innovative Technologien

Issue №13
Part 1
September 2020

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, *candidate of technical sciences*

Editorial board: More than 190 doctors of science. Full list on pages 4

UDC 08
LBC 94
DOI: 10.30890/2567-5273.2020-13-01

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

The publisher is not responsible for the validity of the information or for any outcomes resulting from reliance thereon.

Copyright
© Authors, 2020



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

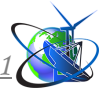
Averchenkov Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Bryansk State Technical University, Russia
 Angelova Polya Georgieva, Doctor of Economic Sciences, Professor, Economic Academy D. A. Tsenova, Svishov, Bulgaria, Bulgaria
 Animacya Evgenij Georgievich, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Ural State University of Economics, Russia
 Antonov Valerij Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Ukraine
 Antrapeva Nadezhda Mihajlovna, Doctor of Chemical Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine
 Ahmadiev Gabbulhat 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
 Batyrgareeva Vladislava Stanislavovna, Doctor of Law, Research Institute for the Study of Crime Problems named after academician V. V. Stashisa, NAPRN of Ukraine, Ukraine
 Bezdenzhnyh 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
 Grebneva Nadezhda Nikolaevna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Russia
 Grizodub Aleksandr Ivanovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, SE "Ukrainian Scientific Center for the Quality of Medicines", Ukraine
 Grichenko 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
 Dorofina 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
 Kirillova 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. Toraygrovya, Kazakhstan
 Kurmaev Petr Yurevich, Doctor of Economic Sciences, Professor, Uman State Pedagogical University named after Pavel Tychna, 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
 Latiyina 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
 Lomoto 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
 Majdanuk 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
 Maksin 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 Vasilevna, 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
 Moisejina Lyudmila Guchaeвна, 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 Vasilevich, 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, Izhevsk State Technical University, Russia
 Starodubcev Vladimir Mihajlovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine
 Stegnij Vasilij Nikolaevich, Doctor of Sociology, Professor, Perm National Research Polytechnic University, Russia
 Stepenko Valerij Efremovich, Doctor of Law, assistant professor, Pacific State University, Russia
 Stoypec Olesandr Vasilovich, Doctor of Philosophy, assistant professor, Odessa National Maritime University, Ukraine
 Stoypec Vasil Grigorovich, 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 Yurij 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 Yurij 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
 Fatyhova Alevtina Leontevna, Doctor of Education, assistant professor, Bashkir State University (Sterlitamak branch), Russia
 Fedorishin Dmitro 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
 Chervonyj Ivan Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Ukraine
 Chigirinskaya 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 Vasilevna, 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 Vasylivna, PhD in pedagogical sciences, docent, Vasil 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 Olesandr 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
 Katerynchuk 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 Olesandr-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 Vasylivna, 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 Kremenets, Ukraine
 Demyanenko Natalia, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Taras Shevchenko Regional Humanitarian-Pedagogical Academy of Kremenets, 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
 Kalabska 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



УДК 533.6.3.01:534.1

SIMULATION THE FLOW AROUND A CYLINDER TO DETERMINE THE COEFFICIENT OF INDUCTIVE RESISTANCE

Medvid A. M.

postgraduate

ORCID: 0000-0002-6781-5816

Panchenko V. O.

c.t.s.

ORCID: 0000-0001-9228-4888

Sumy State University, 2 Rymskogo-Korsakova St., 40007 Sumy, Ukraine

Annotation The article deals with the simulation of cylinder flow for selected air velocities 1-7 m/s, which corresponds to the average air velocity range for the territory of Ukraine. ICFM CFD grid generator was used to obtain high quality currents around the cylinder. The obtained pictures of currents and pressure fields at different air flow rates make it possible to determine the flow separation zones from the solid wall by using the ANSYS CFX calculation software. On the basis of flow visualization, a description of the physical process is given in the area of the boundary layer on the body of the object under study. A function «force ()» was used to calculate the inductive drag coefficient, which would track the change in force along the specified z axis, which is postponed perpendicular to the flow direction. Graphs for the coefficient of force encompassing the cylinder are constructed, and the complexity of changing the magnitude of the given coefficient is analyzed. Define the maximum value of the amplitude of the coefficient of inductive resistance. The influence of the coefficient of the inductive resistance force from the initial moment of flow to the formation of a stable Karman path is analyzed. The comparative analysis of the obtained results and the values of the inductive resistance of the cylinder in the design region is performed.

Keywords: Strouhal number, Reynolds number, Karman street

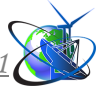
Introduction.

The development of the world energy sector is one of the key issues in the concept of sustainable development of society. Current global energy trends are characterized by a deepening of the integration of energy systems, an increase in the share of renewable energy sources in the energy balances of the countries of the world and the objects of distributed generation. The widespread use of RES technologies in the electricity sector and the achievement of the Paris Climate Agreement are nearing the end of a period of widespread use of coal.

For wind turbines with horizontal axis of rotation, the estimated wind speeds are in the range of 12-15 m/s, at which the coefficient of use of wind energy is maximum and is $C_p = 0,48$. Wind turbines with a vertical axis of rotation require slightly lower estimated wind speeds of 5-8 m/s and a wind energy utilization factor of $C_p = 0.4$. But these windmills have a number of disadvantages: due to the change in wind direction and speed, the coefficient of wind energy utilization of the horizontal axial installations decreases; vertically axial wind motors cannot self-start.

Traditional wind turbines require complex production and operation processes, which increases the cost and payback time. The relatively high cost of a wind turbine (\$ 2-3 per 1W of installed power depending on equipment) sharply narrows the range of consumers. Therefore, the use of traditional wind turbines in Ukraine is little effective.

Therefore, the task is to develop a new windmill, which will require minimal



production and operating costs, will meet maximum efficiency requirements and have a minimum cost and payback time, and will also operate efficiently at low wind speeds of 1-5m/s. Due to its size, Ukraine has great potential for the development of wind energy resources that can be developed to generate electricity.

Setting objectives

To create a new type of wind turbines, a working body selected cylinder. It is necessary to investigate in more detail the process the flow around cylinder, using the ANSYS CFX software for this task. Simulation of the flow of the cylinder by the air flow will allow to evaluate in more detail the coefficient of inductive resistance acting on the surface of the cylinder, to get a picture of the flow and pressure distribution. Using the ICEM CFD grid generator, we get a high quality computational flow grid that will help to calculate as accurately as possible.

As is known, theoretical studies of a street based on the assumption of a perfect fluid cannot reveal the effect of the Re number on the current picture. At the same time, taking into accounting for friction is fraught with great mathematical difficulties. Since the vortex path is formed at Reynolds numbers lying in the range $40 \leq Re \leq 10^5$, then let us consider the process at an air velocity of 1,3,5 and 7 m/s, which corresponds to the range of average air velocities in Ukraine. At $Re > 10^5$, the separation point moves to the rear of the cylinder and the vortex track changes to the companion track [1].

For the given initial conditions, the cylinder is selected geometric dimensions: diameter - 250 mm, height 50 mm, corresponding to the given Reynolds numbers. The simulation uses the Shear Stress Transport (SST) turbulence model. The use of this model meets the requirements when modeling vortex flows.

Analysis of the flow near the cylinder surface

It is well known that at certain Reynolds numbers two symmetrical vortices occur as a result of the separation of the flow behind the cylinder (fig. 1). As the flow rate increases, their size gradually increases and they are pulled along the flow direction. Further, the flow is unstable and one of the vortices begins to increase rapidly in size, and the other, on the contrary, decreases. Therefore, the flow pattern directly behind the cylinder becomes asymmetrical with respect to the plane that is collinear to the axis and passes through the center of the cylinder. When certain dimensions are reached, the vortex breaks away from the cylinder and begins to drift downstream. After such separation, the second vortex begins to increase rapidly and the whole process described is repeated. Alternatively, coming off one or the other side of the cylinder, the vortices drift downstream and form the Karman's street (fig. 2) [2].

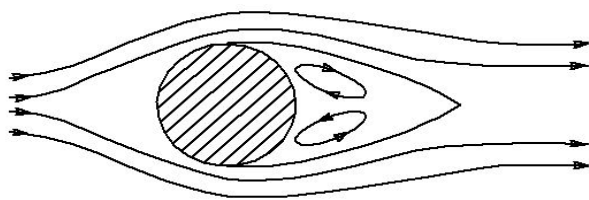


Fig. 1. Formation of two symmetrical vortices behind the cylinder $Re=20$

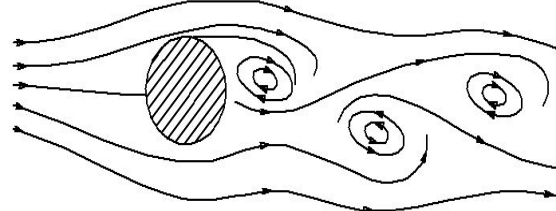
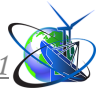


Fig. 2. Karman's vortex street $Re=100$

It is known that the cause of oscillations of circular cylindrical bodies is the detachment of vortices, also known as VIV (vortex induced vibration). In the pre-



crisis modes of flow of the cylinder, this phenomenon is studied in detail, the detachment of vortices is periodic in nature and its frequency satisfies the condition of constancy of the number of Strouhal:

$$Sh = \frac{nd}{v} \approx 0,2 \quad (1)$$

Where n is the frequency of detachment of vortices; d is the diameter of the cylinder; V is the speed of the incoming stream [3].

As a rule, the wind direction is variable. In order to ensure a good orientation of the device in the direction of the wind, it is necessary that it be circular in cross section and free of mechanical shafts. The formation of vortices is easily formed in circular cross-section bodies. The vertical and circular cross-section structure is sufficient to collect wind energy without requiring mechanical shafts.

The mast is the rigid part of the structure that directly interacts with the wind. As shown below, we can achieve synchronized vortex shedding along the entire mast. Thus, the forces are perpendicular to this wind stream, acting in phase, achieving more high productivity.

Simulation of flow near cylinder surface

During the simulation of the flow process, airflow patterns were obtained in the boundary layer zone, which allows to determine the flow separation zones from the solid wall. A detailed analysis of the pressure patterns and the nature of the vortices formed by the cylinder and their dependence on the force acting perpendicular to the flow direction at different air velocities were also performed.

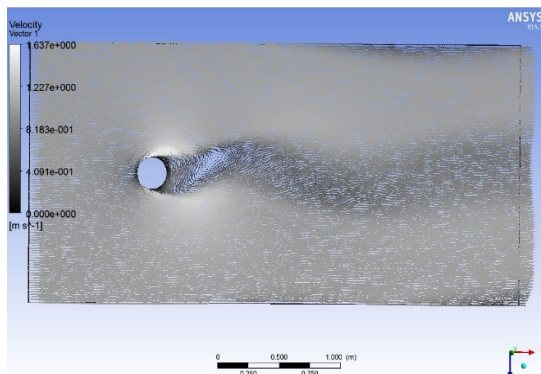


Fig. 3. Flow lines at a speed of 1 m/s

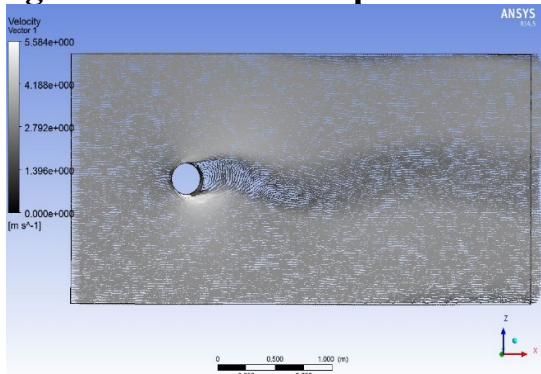


Fig. 4. Flow lines at a speed of 3 m/s

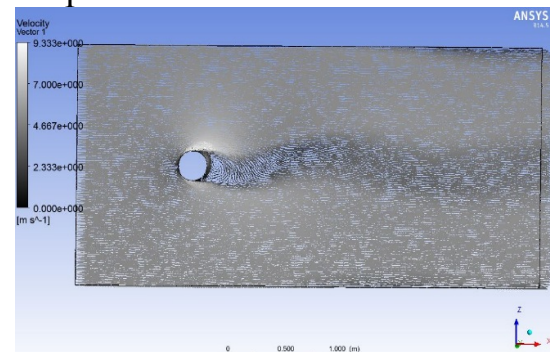


Fig. 5. Flow lines at a speed of 5 m/s

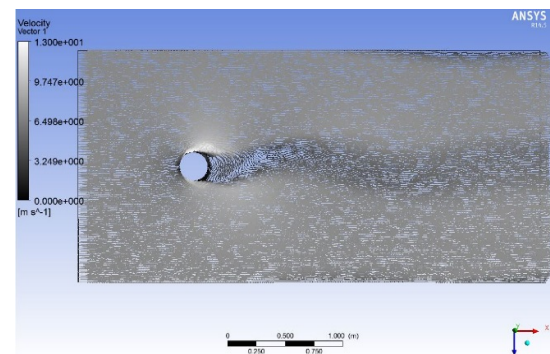


Fig. 6. Flow lines at a speed of 7 m/s

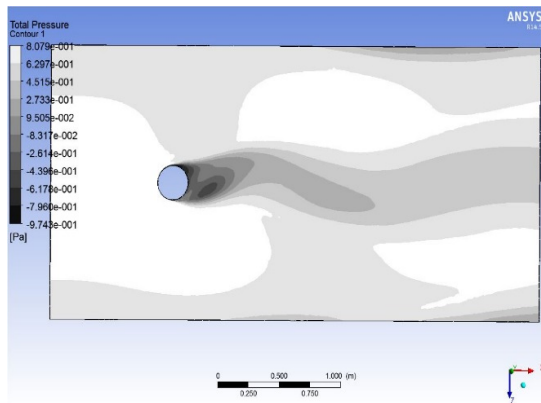


Fig. 7. Pressure fields at a speed of 1 m/s

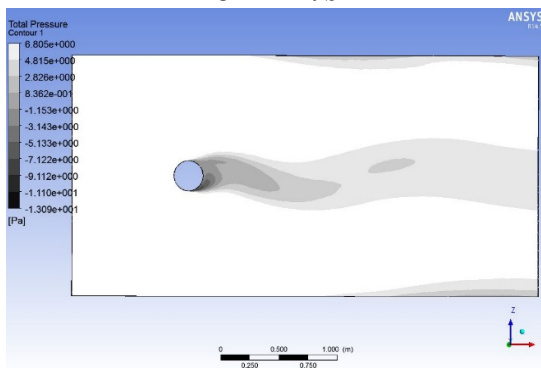


Fig. 8. Pressure fields at a speed of 3 m/s

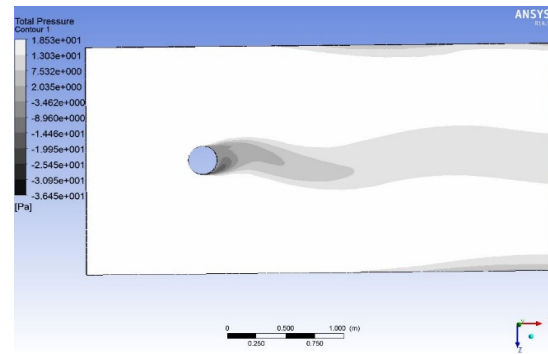


Fig. 9. Pressure fields at a speed of 5 m/s

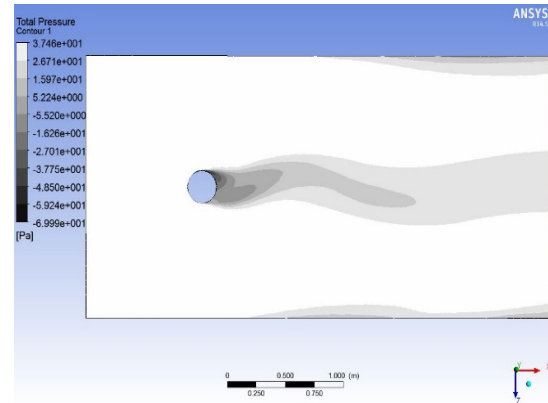


Fig. 10. Pressure fields at a speed of 7 m/s

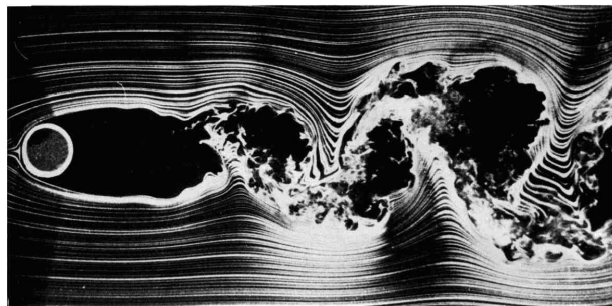


Fig. 11. Circular cylinder flow $Re = 10000$ [4]

A stationary solution to the problem does not allow you to get a vortex trace of the object under study. From Figures 3 - 10 flow lines and full pressure fields when the cylinder is flowing, that the current pattern is asymmetrical and a asymmetrical vortex is formed behind the cylinder. This indicates that a Karman's street is formed when flowing.

Comparison of obtained flow lines with experimental studies (fig. 11), confirm the formation of the Karman's street, the correctness of the chosen boundary conditions and the obtained results of the calculations.

4 The force acting on the cylinder

Suppose that the effect of the active frontal force C_x on the cylinder is independent of time and the change in inductive resistance, and that the inductive resistance of the cylinder C_{xi} is variable over time and affects the cylinder with different magnitudes.

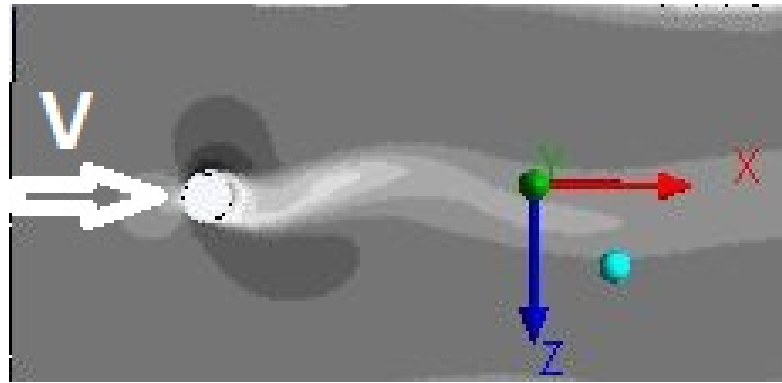
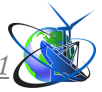


Fig. 12. Coordinate system for cylinder flowing

The force acting on the cylinder is, in fact, the capture coefficient C_x is a dimensionless number equal to the ratio of the force to $\frac{1}{2}\rho V^2 D l$ (d is the diameter, l is the length of the cylinder and ρ is the density of the liquid) [5]:

$$C_x = \frac{F_z}{0,5 \rho v^2 D l} \quad (2)$$

The «force ()» function of the ANSYS CFX software complex will be used to calculate the inductive drag coefficient, which will track the change in force along the specified z axis (fig. 12), which is postponed perpendicular to the air flow direction. The change in the magnitude of the inductive force coefficient causes the oscillations, which are directed perpendicular to the direction of the air flow. Fluctuations in poorly flowing bodies in the gas stream can be interpreted as forced oscillations or as self-oscillations in a delayed system. Experiments show that fluctuations caused by heavy fluid flow are better described as forced fluctuations and fluctuations in gas flow as self-oscillations [6].

Considering the obtained pressure fields (fig. 7-10) we can predict that the force has a direction in the zone of lower pressure, that is, a vortex, which is just beginning to form. In the simulation of the flow of the cylinder by the flow of air, graphs were also constructed for the force acting on the cylinder, which makes it possible to analyze the occurrence and complexity of the change in the magnitude of a given force covering the cylinder.

Figure 13 observed the maximum amplitude value of $C_{xi} = 1.3$. Theoretical calculations indicate that the maximum limit inductive resistance coefficient is $C_{xi} = 1.70$. Experiments on determining the coefficient of inductive resistance when flowing through the air stream of cylinders indicate that the real value of the coefficient of inductive resistance is $C_{xi} = 0,50-1,00$ [6].

The graphs obtained (fig. 13-16) show that the coefficient of inductive resistance begins to operate from the initial moment of flow. Under the given conditions mean: constant - geometric dimensions of the cylinder, variables - velocity of the incoming air flow and, accordingly, Reynolds number Re . The magnitude of the force decreases as the speed of the incoming air stream increases. Comparing the graphs, we can note that the difference in the amplitude of the force at speeds of 1 and 7 m / s is insignificant and is about 15-20%. Assume that the resulting reduction in force will not have a significant impact on the workflow of the windmill.

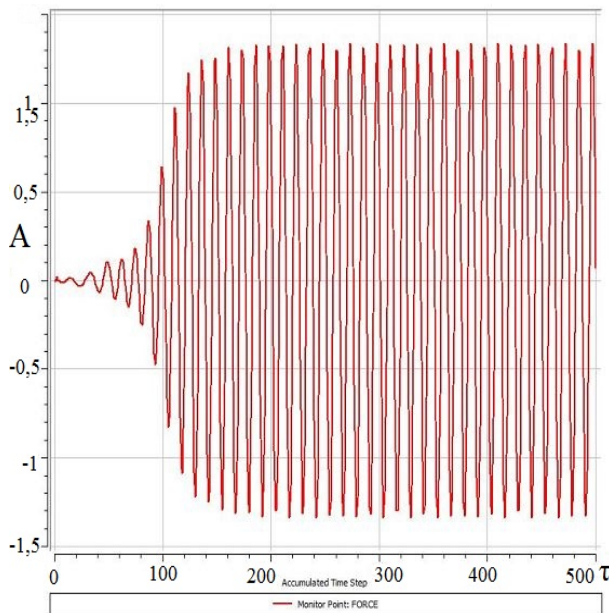
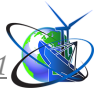


Fig. 13. Amplitude of the inductive resistance at 1 m/s

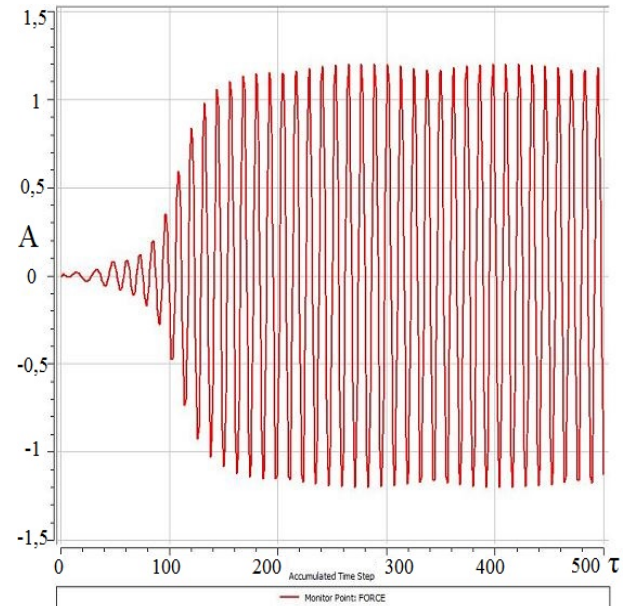


Fig. 14. Amplitude of the inductive resistance at 3 m/s

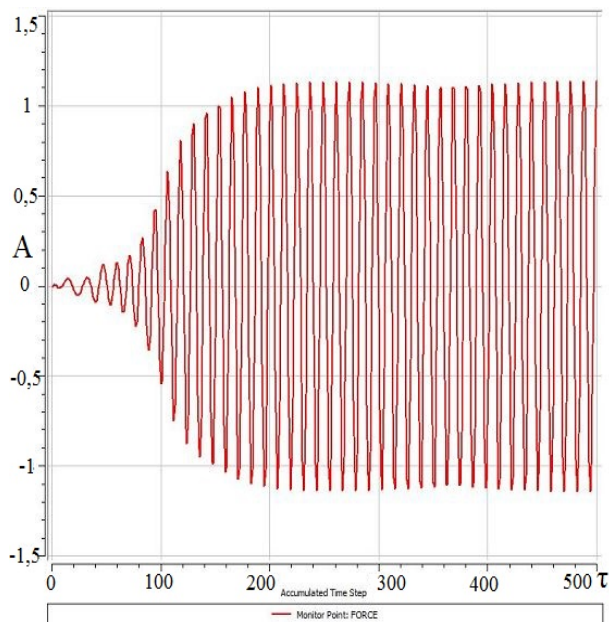


Fig. 15. Amplitude of the inductive resistance at 5 m/s

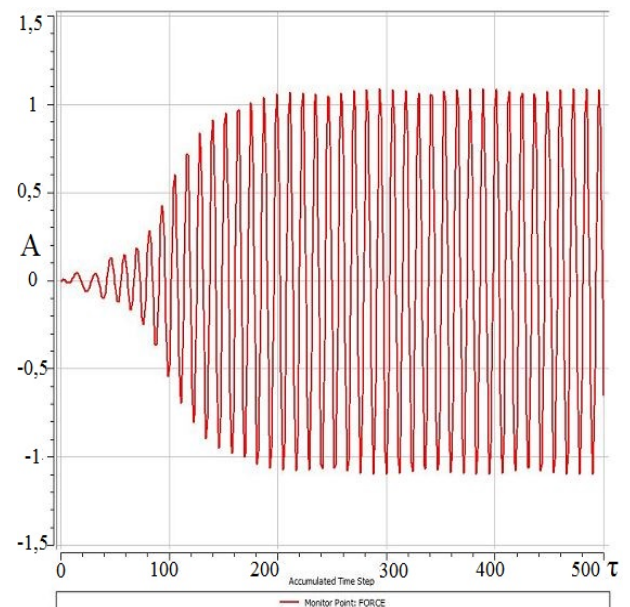
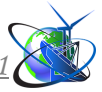


Fig. 16. Amplitude of the inductive resistance at 7 m/s

Conclusions

By comparing the flow lines and the pressure fields, we can conclude that the calculation of the problem using the ANSYS CFX software is correct and true. This calculation makes it possible to predict the behavior of the fluid in the boundary layer, as well as the magnitude of the forces acting directly on the cylinder surface. In the future it will be possible to simulate the reaction of the cylinder surface and the force, acting on the side of the incoming air stream.

In the simulation, the force acting on the cylinder surface is determined and the coefficient of inductive resistance is calculated. If we compare it with known values, then the obtained coefficient is $C_{xi}=1.30$, and theoretically calculated is about $C_{xi}=1.70$. The calculated value of the coefficient is close enough to practically



obtained values, which indicate that the experimentally obtained coefficient of inductive resistance is within $0,50 \leq C_{xi} \leq 1.00$.

The values of the inductive resistance coefficient obtained by numerical simulation are quite close to practical received. In further studies, this will approximate the calculation of the resultant force acting on the cylinder, as well as help in modeling the trajectory of motion of the cylinder in the air flow.

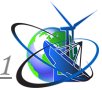
References

- 1 Karintsev I. B. Hydroaeroelasticity. Sumy: Sumy Publishing House of Sumy State University, 2000. 180p.
- 2 Vovk I. V. Physical view of the nature of aeolian tones ISSN 1028-7507 // Acoustic Bulletin. 2007. Vol. 10, N 2. pp. 22-32
- 3 Feadyaevsky K. K., Blumina L. H., Hydro-aerodynamics of detachable flow of bodies. M.: "Mechanical Engineering", 1977. 200p.
- 4 Van Dyke M. Liquid and Gas Flow Album. M.: Mir Publishing House. 1986. 184 p.
- 5 Feynman R., Layton R., Sands M. Feynman Lectures on Physics book in 9 volumes of volume 7., Physics of Continuous Environments, M.: Mir Publishing House 1977. 273p.
- 6 Birger I. A., Panovko J. G. Strength, Stability, Fluctuations a reference book in 3 volumes of volume 3. M.: Mechanical Engineering Publishing House. 1908. 568p.

Анотація. У статті наведено моделювання обтікання циліндра для обраних швидкостей повітря 1-7 м/с що відповідає діапазону середніх швидкостей повітря для території України. Для отримання якісних картин току навколо циліндра, використано сітковий генератор ICEM CFD. Отримані картини течій та полів тиску при різних швидкостях потоку повітря, дають змогу визначити зони відриву потоку від твердої стінки за допомогою використання розрахункового програмного комплексу ANSYS CFX. На основі візуалізації потоку приведено опис фізичного процесу в зоні пограничного шару на тілі досліджуваного об'єкта. Для розрахунку коефіцієнта індуктивного опору використана функція «force()», що відслідковуватиме зміну сили за вказаною віссю z, яка відкладена перпендикулярно до напрямку потоку. Побудовані графіки для коефіцієнта сили, що охоплює циліндр, та проаналізовано складність зміни величини даного коефіцієнта. Визначено максимальне значення амплітуди коефіцієнта індуктивного опору. Проаналізовано вплив коефіцієнта сили індуктивного опору від початкового моменту обтікання, до моменту утворення стабільної доріжки Кармана. Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів, та значень індуктивного опору циліндра в розрахунковій області.

Ключові слова: число Струхала, число Рейнольдса, доріжка Кармана

Стаття надіслана: 29.09.2020 р.
© Медвідь А. М., Панченко В. О.



УДК 621.793.7

MATHEMATICAL MODEL OF THE DISSOLUTION OF THE CORE IN THE CLADDING LAYER OF PARTICLES DURING PLASMA SPRAYING OF COMPOSITE POWDERS**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ ЯДРА У ПЛАКУВАЛЬНІЙ ОБОЛОНЦІ ЧАСТОК ПРИ ПЛАЗМОВОМУ НАПИЛЮВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКІВ****Shevchenko O.V. / Шевченко О.В.***k.t.n., dots. / к.т.н., доц.**Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Central Avenue 59-a, 93400**Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєвєродонецьк,**проспект Центральний 59-а, 93400*

Анотація. Розроблено математичну модель процесу дифузійного розчинення ядра у плакувальній оболонці часток при плазмовому напилюванні плакованих композиційних порошків. Запропонована математична модель є універсальною у тому сенсі, що вона може бути використана без будь-яких змін для будь-якого процесу газо-термічного напилювання покриттів з використанням композиційних порошків. Математична модель дозволяє прогнозувати ступінь розчинення ядра у плакувальній оболонці частки залежно від агрегатного стану, в якому знаходяться компоненти частки. Це має важливе значення для прогнозування структури та міцності покриттів. Запропоновано комп'ютерний варіант реалізації розробленої математичної моделі.

Ключові слова: плазмове напилювання, газо-термічне напилювання, композиційний порошок, плакований порошок, плакувальна оболонка, ядро, дифузія, розчинення, структура, міцність зчеплення.

Вступ.

У сучасній техніці для нанесення функціональних покриттів найчастіше застосовують композиційні порошки, і в першу чергу – плаковані порошки [1-3]. У процесі руху часток порошків у високотемпературному газовому струмені між компонентами часток може протікати дифузійна та хімічна взаємодія. Ступінь протікання такої взаємодії дуже часто визначає міцність зчеплення, когезійну міцність, зносостійкість та інші властивості покриттів [4]. Аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури показує, що до сьогодні не розроблені надійні розрахункові методики, що дозволяють оперативно оцінювати ступінь дифузійної взаємодії між компонентами композиційних плакованих порошків залежно від температура та агрегатного стану часток [1 - 4]. Метою цієї роботи є розробка математичної моделі, що дозволяє оцінювати швидкість та ступінь розчинення матеріалу ядра у плакувальній оболонці часток при газо-термічному напилюванні композиційних плакованих порошків з подальшою інтеграцією розробленої моделі у сучасні системи автоматизованого проектування технологічних процесів нанесення газо-термічних покриттів.

Основний текст

Кінетика розчинення матеріалу ядра у розплавленій плакувальній оболонці відноситься до умов зовнішньої задачі. Сумарна швидкість процесу розчинення ядра у плакувальній оболонці у цьому випадку може бути визначена за допомогою модифікованого рівняння Нернста - Шукарева [1]:



$$\frac{dc_{\text{я}}}{d\tau} = \frac{S_{\text{я}} \cdot D}{V_{\text{об}} \cdot \delta_{\text{п}}} \cdot (c_{\text{к}} - c_{\text{я}}), \quad (1)$$

де $c_{\text{я}}$ – концентрація матеріалу ядра у розплавленій плакувальній оболонці; у початковий момент ($\tau = 0$) $c_{\text{я}} = 0$;

τ – час розчинення;

$S_{\text{я}}$ – площа зовнішньої поверхні ядра;

$V_{\text{я}}$ – об'єм розплавленої оболонки;

D – коефіцієнт дифузії;

$\delta_{\text{п}}$ – товщина пограничного шару;

$c_{\text{к}}$ – кінцева концентрація матеріалу ядра у розплавленій оболонці.

При розчиненні ядра у плакувальній оболонці його діаметр зменшується; відповідно, зменшується і площа його зовнішньої поверхні $S_{\text{я}}$. Об'єм розплавленої оболонки зростає і досягає максимального значення після повного розчинення ядра ($c_{\text{к}} = c_{\text{я}}$).

Запишемо рівняння (1) у наступному виді:

$$\frac{m_{\text{об}} \cdot \delta_{\text{п}}}{\rho_{\text{об}} S_{\text{я}} \cdot D \cdot (c_{\text{к}} - c_{\text{я}})} \cdot dc_{\text{я}} = d\tau, \quad (2)$$

де $m_{\text{об}}$ – маса розплавленої оболонки;

$\rho_{\text{об}}$ – густина матеріалу оболонки.

Концентрація матеріалу ядра у розплавленій плакувальній оболонці визначається як

$$c_{\text{я}} = \frac{m_{\text{яр}}}{m_{\text{яр}} + m_{\text{об}(0)}}, \quad (3)$$

де $m_{\text{яр}}$ – маса матеріалу ядра, розчинена в оболонці;

$m_{\text{об}(0)}$ – маса розплавленої оболонки до початку процесу розчинення в неї ядра.

З рівняння (3) можна виразити масу матеріалу ядра, розчинену у розплавленій плакувальній оболонці, через концентрацію матеріалу ядра в оболонці:

$$m_{\text{яр}} = \frac{c_{\text{я}} \cdot m_{\text{об}(0)}}{1 - c_{\text{я}}}. \quad (4)$$

Вочевидь, маса розплавленої оболонки зростатиме на величину $m_{\text{яр}}$:

$$m_{\text{об}} = m_{\text{об}(0)} + \frac{c_{\text{я}} \cdot m_{\text{об}(0)}}{1 - c_{\text{я}}}, \quad (5)$$

а маса ядра зменшуватиметься на величину $m_{\text{яр}}$:

$$m_{\text{я}} = m_{\text{я}(0)} - \frac{c_{\text{я}} \cdot m_{\text{об}(0)}}{1 - c_{\text{я}}}, \quad (6)$$

де $m_{\text{я}0}$ – маса матеріалу ядра до початку процесу його розчинення у плакувальній оболонці.

Площа зовнішньої поверхні ядра визначається як $S_{\text{я}} = 4\pi \cdot r_{\text{я}}^2$, де $r_{\text{я}}$ – радіус ядра.



Виразимо зміну радіуса ядра через зміну його маси ($m_{\text{я}}$): $r_{\text{я}} = \sqrt[3]{\frac{3m_{\text{я}}}{4\pi}}$. Маса ядра змінюється наступним чином: $m_{\text{я}} = m_{\text{я}0} - m_{\text{об}}$, де $m_{\text{я}0}$ – маса ядра до початку процесу розчинення. З урахуванням виразу (6) радіус ядра змінюється у процесі розчинення по рівнянню:

$$r_{\text{я}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \left(m_{\text{я}0} - \frac{c_{\text{я}} \cdot m_{\text{об}(0)}}{1 - c_{\text{я}}} \right)}{4\pi}}, \quad (7)$$

а площа зовнішньої поверхні ядра – по рівнянню:

$$S_{\text{я}} = 4\pi \cdot \left[\frac{3 \cdot \left(m_{\text{я}0} - \frac{c_{\text{я}} \cdot m_{\text{об}(0)}}{1 - c_{\text{я}}} \right)}{4\pi} \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (8)$$

Підставляючи рівняння (5) та (8) у рівняння (2), отримаємо диференціальне рівняння розчинення ядра у розплавленій плакувальній оболонці:

$$\frac{\left(m_{\text{об}(0)} + \frac{c_{\text{я}} \cdot m_{\text{об}(0)}}{1 - c_{\text{я}}} \right) \cdot \delta_{\text{п}}}{4\pi \cdot \left[\frac{3 \cdot \left(m_{\text{я}0} - \frac{c_{\text{я}} \cdot m_{\text{об}(0)}}{1 - c_{\text{я}}} \right)}{4\pi} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \rho_{\text{об}} \cdot D \cdot (c_{\text{к}} - c_{\text{я}})} \cdot dc_{\text{я}} = d\tau. \quad (9)$$

Отримане рівняння враховує зміну розмірів ядра у процесі його розчинення в плакувальній оболонці і зміну площі поверхні дифузійної взаємодії між ядром та плакувальною оболонкою. Замість постійного коефіцієнта дифузії D в рівнянні (9) можна задати залежність коефіцієнта дифузії від температури $D(T)$. Крім того, у рівнянні (9) може бути введена залежність коефіцієнта дифузії від різниці концентрацій $(c_{\text{к}} - c_{\text{я}})$.

Рівняння (9) можна вирішити безпосереднім інтегруванням його правої та лівої частини.

Час, необхідний для повного розчинення алюмінієвого ядра у нікелевому розплаві визначиться як:

$$\tau = \int_0^{c_{\text{к}}} \frac{\left(m_{\text{об}(0)} + \frac{c_{\text{я}} \cdot m_{\text{об}(0)}}{1 - c_{\text{я}}} \right) \cdot \delta_{\text{п}}}{4\pi \cdot \left[\frac{3 \cdot \left(m_{\text{я}0} - \frac{c_{\text{я}} \cdot m_{\text{об}(0)}}{1 - c_{\text{я}}} \right)}{4\pi} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \rho_{\text{Ni}} \cdot D \cdot (c_{\text{к}} - c_{\text{я}})} \cdot dc_{\text{я}}. \quad (10)$$



Величини початкової маси ядра $m_{я0}$ та початкової маси плакувальної оболонки $m_{об(0)}$ визначаються згідно геометричних параметрів часток:

$$m_{я0} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho_z (r_{я0})^3. \quad (11)$$

$$m_{об(0)} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho_{об} (r_p^3 - r_{я0}^3), \quad (12)$$

де r_p – радіус частки.

Масовий вміст ядра у вихідній частці до моменту початку його розчинення у плакувальній оболонці визначається як

$$c_k = \frac{m_{я(0)}}{m_{я0} + c_{я}}. \quad (13)$$

Для вирішення рівняння (10) слід використовувати чисельні методи інтегрування, оскільки отримати його рішення в аналітичному вигляді дуже складно, а у випадку, коли коефіцієнт дифузії D є змінною величиною – неможливо.

Для чисельного рішення рівняння (10) з використанням типового програмного забезпечення (наприклад, “Mathcad”), його більш доцільно представити у наступному вигляді:

$$\tau_i = \int_0^{c_i} \frac{\left(m_{об(0)} + \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) \cdot \delta_{п}}{4\pi \cdot \left[\frac{3 \cdot \left(m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right)}{4\pi} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \rho_{об} D \cdot (c_k - c_{я})} \cdot dc_{я}, \quad (14)$$

де i – номери елементів у масивах τ_i ; c_i (нумерація елементів масивів починається з нуля);

$c_i = c_{i-1} + \Delta c$, Δc – крок зміни концентрації алюмінію у нікелевому розплаві.

Кількість елементів масивів τ_i ; c_i визначалась в залежності від кроку зміни концентрації алюмінію (Δc) у нікелевому розплаві. Із зменшенням Δc пропорційно зростає число елементів у масивах τ_i ; c_i .

Початкові умови для чисельного інтегрування рівняння (4.35): $\tau_0 = 0$; $c_0 = 0$.

На основі отриманого масиву даних (τ_i ; c_i) можна побудувати залежність $c_i/c_k(\tau_i)$. При $c_i/c_k = 1$ матеріал ядра повністю розчинюється у плакувальній оболонці.

Висновки.

Розроблено математичну модель, що дозволяє оцінювати швидкість та ступінь розчинення матеріалу ядра у плакувальній оболонці часток при газотермічному напилюванні композиційних плакованих порошків. Розроблена математична модель може бути інтегрована у сучасні системи



автоматизованого проектування технологічних процесів нанесення газо-термічних покриттів, а також у спеціалізовані програмні продукти для імітування процесів нагрівання та руху часток при газо-термічному напилюванні (Caspс тощо).

Література:

1. Газо-термическое напыление покрытий с использованием композиционных порошков / А.Н. Боровинский, В.Л. Кудрин, Т.Н. Медняева, К.Р. Сомов. – Л.: Машиностроение, 1991. – 206с.
2. Харламов Ю.А., Полонский Л.Г. Газотермическое напыление. Современное состояние и перспективы развития // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 2 (226). – 2016. – С. 5-19. – ISSN 1998-7927.
3. Шевченко А.В. Математическая модель процесса синтеза интерметаллидов при напылении конгломератных никель-алюминиевых порошков // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 5 (222). – 2015. – С. 131-134. – ISSN 1998-7927.
4. Архипов О.Г., Борисенко В.А., Хома М.С., Любимова-Зінченко О.В. Деградація сталей в агресивних середовищах, залишковий ресурс обладнання і корозійний моніторинг: Монографія – Луганськ: Вид-во Східноукраїнського національного ун-ту ім. В. Даля, 2014 – 204с. – ISBN 978-617-11-0053-4.

Abstract. The author of the article has developed a mathematical model of diffusion dissolution of the core in the cladding shell of particles during the plasma spraying of composite powders. The proposed mathematical model is universal, since this mathematical model can be used for any process of thermal spraying of coatings using composite powders. The mathematical model makes it possible to predict the degree of dissolution of the core in the cladding shell depending on the state of aggregation of the components of the particles. This is important for predicting the structure and strength of coatings. The author of the article proposed an algorithm for the realization of computations using computer technology.

Key words: plasma spraying, thermal spraying, composite powder, coated powder, cladding shell, core, diffusion, dissolution, structure, adhesion strength.

Статья отправлена: 29.09.2020 г.

© Шевченко О.В.



УДК 536.6

METHODS OF REDUCING THE DURATION OF PULSE HEAT MEASUREMENT**МЕТОДИ СКОРОЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ІМПУЛЬСУ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ****Vorobiov L.Y. / Воробйов Л.Й***d.s., s.s. / д.т.н., с.н.с.*

ORCID: 0000-0001-7958-6996

SPIN: 6154-2069

Dekusha L.V. / Декуша Л.В.*d.s., s.s. / д.т.н., с.н.с.*

ORCID: 0000-0003-1881-0880

Dekusha O.L. / Декуша О.Л.*Ph.d. / к.т.н.*

ORCID: 0000-0003-3836-0485

Ivanov S.O. / Іванов С.О.*Ph.d. / к.т.н.*

ORCID: 0000-0002-2722-7323

Kovtun S.I. / Ковтун С.І.*d.s. / д.т.н.*

ORCID: 0000-0002-6596-3460

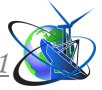
*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, M Kapnist Str., 2a, Kyiv, 03057**Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. М. Канніст, 2а, 03057*

Анотація. Представлено метод динамічного вимірювання імпульсного тепловиділення зі скороченням тривалості експерименту шляхом екстраполяції вихідного сигналу калориметра в регулярному режимі на підставі регресійного аналізу результатів вимірювань. Повне тепловиділення розраховується як сума інтегрального значення сигналу в іррегулярному режимі та обчисленої за результатами екстраполяції складової тепловиділення у регулярному режимі, що дає можливість зменшити тривалість вимірювання. Проведене імітаційне моделювання динамічного способу вимірювань, яке показало, що він дає можливість зменшити тривалість підготовки та вимірювання у 2...2,5 рази у порівнянні з традиційним інтегральним методом.

Ключові слова: імпульс тепловиділення, динамічні методи вимірювання, регулярний режим, калориметрія.

Вступ

Найбільш поширеними приладами для вимірювання теплоти, що виділяється або поглинається у фізико-хімічних процесах є ентальпійні калориметри та кондуктивні калориметри (теплового потоку) [1...4]. У ентальпійних калориметрах енергія, що виділилася у реакційній посудині, передається робочому тілу з відомою теплоємністю, а значення цієї енергії визначають за зміною температури робочого тіла. У кондуктивних приладах реакційна посудина розміщена у калориметричній комірці, яка охоплена перетворювачем, сигнал якого пропорційний до потужності (сумарного теплового потоку), що йде від комірки до зовнішнього блоку-термостату. Значення повної енергії, що виділилася у реакційній посудині визначають інтегруванням сигналу перетворювача. Зазвичай власна стала часу приладів теплового потоку значна менша ніж у ентальпійних і дозволяє досліджувати



зміну тепловиділення у досліджуваному процесі, тому іноді калориметри теплового потоку називають «калориметрами-осцилографами», а ентальпійні – «калориметрами-інтеграторами» [1, 4]. В той же час при визначенні енергії, що виділяється у швидкоплинних процесах (згоряння речовин у кисневій атмосфері, імпульс випромінювання лазера, тощо), ентальпійні прилади виявляються більш швидкодіючими, оскільки в них для отримання результату достатньо досягти закінчення передавання енергії робочому тілу, а у калориметрах теплового потоку необхідне завершення процесу передавання енергії крізь перетворювач (батарею термопар) до блоку-термостату. Для підвищення швидкодії калориметрів теплового потоку запропоновано декілька методів, які базуються на припущенні, що після закінчення дії імпульсу тепловиділення, сигнал перетворювача теплового потоку залежить тільки від властивостей самого калориметра. Кальве запропонував [4] так званий балістичний метод вимірювань, відповідно до якого визначають максимальне значення сигналу перетворювача теплового потоку, а загальну енергію імпульсу тепловиділення вважають пропорційною цьому значенню. Більш детальне дослідження цього методу показало, що залежність повної енергії від максимального сигналу може бути нелінійною, а похибка вимірювань має значну випадкову складову [5]. Запропоновані також методи вимірювань, в яких використовують додатковий електричний нагрівник або інше джерело для створення допоміжного імпульсу енергії, що дозволяє створити такі умови для динаміки теплових процесів, при яких достатньо провести обмежену кількість вимірювань та розрахувати повну енергію імпульсу [6...8].

Більшість із запропонованих методів базується на використанні залежності зміни температури і теплового потоку у регулярному режимі через деякий інтервал часу після закінчення дії імпульсу тепловиділення. Відомо, що за умови стабільності температури оточуючого середовища і відсутності внутрішніх збурень у тепловій системі, в ній настає регулярний режим першого роду. Ознака регуляризації режиму 1-го роду полягає в тому, що зміна температури в кожній точці системи відбувається по експоненті, однаковій для всіх точок [9].

Так, у [6] для підвищення швидкодії пропонується реакційну посудину (бомбу) з речовиною перегріти відносно робочої температури калориметру, після чого на спаді теплового потоку у зоні регулярного режиму ініціювати досліджуваний процес і одночасно включити інтегратор, виключивши його на тому ж рівні спаду теплового потоку від досліджуваного процесу. Таким чином, вимірювання та інтегрування сигналу проводять тільки на ділянці нерегулярного режиму, на якій тепловий потік змінюється за складним законом, а на ділянці регулярного режиму вимірювання не проводять, що скорочує тривалість дослідів.

Недоліками даного способу є:

- можливість дослідження тільки екзотермічних процесів; ендотермічні не можливо досліджувати, або потрібно попередньо не нагрівати, а охолоджувати реакційну посудину.
- обмеження динамічного діапазону, тому що теплові процеси, у яких



регулярний режим у комірці наступає при рівні теплового потоку нижчому за «вимірювальний відлік», тобто початку ділянки інтегрування, не досліджуються. Початкова ділянка кожної шкали є зоною нечутливості.

- тривалість режиму підготовки практично не зменшується, тому що необхідно довести сам калориметр до робочої температури і визначити значення експериментального «нульового» сигналу.

Для усунення деяких з вказаних недоліків, запропонована низка інших динамічних методів вимірювань, які продовжують розвиватися та удосконалюватися [7, 8, 10].

Метою статті є удосконалення динамічних методів калориметричних вимірювань для зменшення тривалості режиму підготовки, урахування «зміщення нуля», та зменшення впливу похибки одноразових вимірювань на кінцевий результат.

Основний текст.

Запропоновано вдосконалені методи динамічних вимірювань у кондуктивних калориметрах, які засновані на тому, що настання регулярного режиму надійніше контролювати не за рівнем теплового потоку, а за проміжком часу, який пройшов після закінчення дії теплового збурення, що призвело до нерегулярного теплового режиму.

Динамічний метод із початковим перегрівом реакційної посудини.

Перший із запропонованих методів передбачає початковий перегрів реакційної посудини та ілюструється часовою діаграмою (рис. 1).

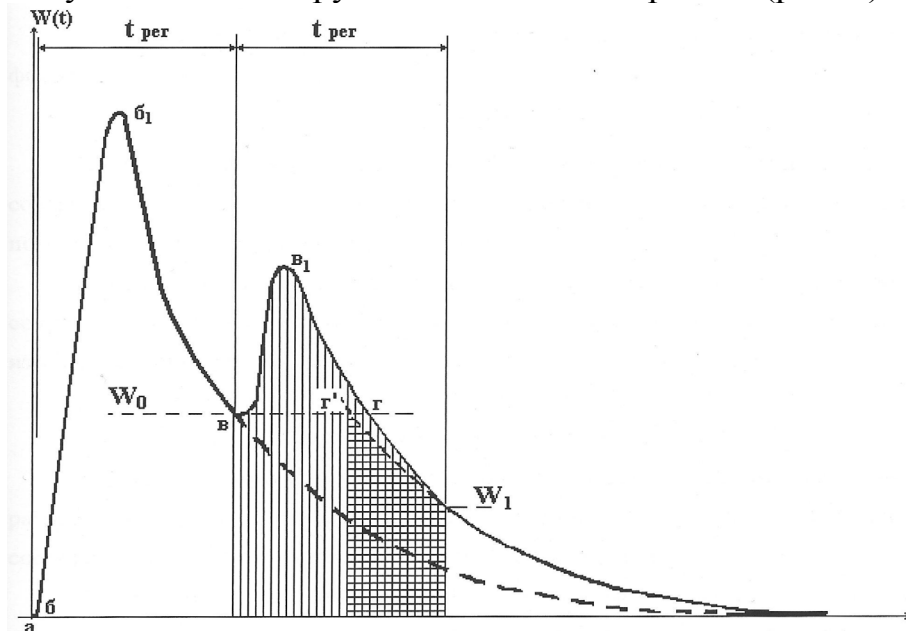
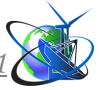


Рис. 1. Діаграма зміни сигналу теплового потоку $W(t)$ у калориметричній комірці, відповідно до запропонованого методу.

У момент часу **б** у калориметр, розігрітий до робочої температури, вставляють заправлену реакційну посудину, попередньо перегріту на декілька градусів відносно температури термостабілізації калориметру. Одночасно включають таймер. По закінченню заздалегідь визначеного інтервалу часу t_{per} ,



достатнього для регуляризації теплового процесу, вимірюють та запам'ятовують поточне значення теплового потоку W_0 , проводять ініціацію (підпал проби) і починають вимірювання та інтегрування сигналу ПТП, а також новий відлік часу регуляризації. На другому спаді сигналу перетворювача за точкою W_1 вимірювання та інтегрування продовжують до закінчення другого інтервалу регуляризації $t_{\text{рег}}$.

При цьому вимірюють і запам'ятовують значення теплового потоку W_1 , що відповідає кінцю інтервалу інтегрування. По закінченню інтегрування, буде накоплене сумарне значення енергії Q_{Σ} , що відповідає площі на діаграмі (рис.1) з вертикальним штрихуванням. Площа на діаграмі з горизонтальним штрихуванням обмежена зверху експоненційною кривою, що описує регулярний режим та має уявне значення W_0 у точці g' . Ця площа відповідає надлишку енергії, визначеної інтегруванням за різних значень потоку на початку та у кінці інтегрування, і дорівнює $\tau \cdot (W_0 - W_1)$.

Значення енергії, що виділилася у досліджуваному процесі визначають за формулою:

$$Q_{\Pi} = Q_{\Sigma} - \tau \cdot (W_0 - W_1) \quad (1)$$

У випадку, коли імпульс енергії від досліджуваного процесу перевищує імпульс, утворений внесенням у калориметр перегрітої бомби, вимірювання проводять за тим же алгоритмом, але при цьому $W_1 > W_0$.

Цей перший запропонований динамічний метод вимірювань дозволяє скоротити тривалість вимірювань зі збереженням повного діапазону вимірюваних енергій.

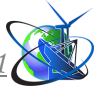
Недоліками цих методів є можливість їх використання лише за умови створення певних додаткових теплових впливів; одноразові вимірювання теплового потоку призводять до збільшення випадкової похибки обчислення кількості теплоти; нехтування «зміщенням нуля» також викликає похибку вимірювань.

Тому при проведенні дисертаційних досліджень була поставлена мета створення динамічного методу вимірювання імпульсу тепловиділення у калориметрі теплового потоку і підвищення точності вимірювань шляхом скорочення режиму підготовки та багаторазових вимірювань теплового потоку в регулярному режимі з їх подальшою екстраполяцією, що дає можливість зменшити вплив випадкової похибки та врахувати вплив «зміщення нуля» на результат вимірювання.

Динамічний метод із скороченням режиму підготовки та екстраполяцією регулярних режимів за трьома вимірюваннями.

Основна ідея запропонованого методу проілюстрована часовою діаграмою (рис. 2.).

Лінія графіку ABCDEFG демонструє зміну теплового потоку у калориметрі за традиційного інтегрального способу вимірювань. У точці А включають калориметр та розміщують у ньому бомбу (реакційну посудину). Ділянка АВ – характеризує процес розігріву калориметра, тепловий вплив не розігрітої бомби і т.п. Після точки В тепловий стан поступово стабілізується і



поблизу точки С процес приймає регулярний характер, а вимірюваний тепловий продовжує зменшуватися до деякого малого значення «зміщення нуля».

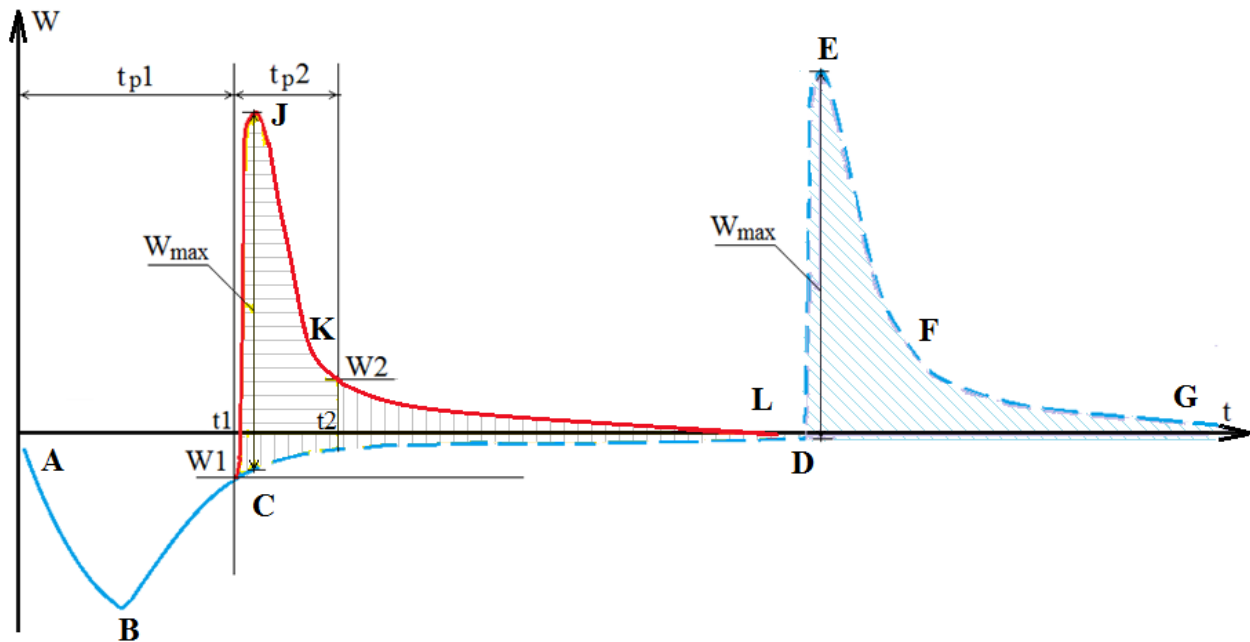


Рис. 2. Часова діаграма, що ілюструє основну ідею динамічного методу вимірювань (другий запропонований метод).

Після умовного досягнення стабілізації у точці D проводять підпал проби речовини, тобто ініціацію реакції, після чого тепловий потік швидко збільшується, досягає у точці E максимального значення, після чого починає зменшуватися. У точці F знову настає регулярний режим і тепловий потік продовжує зменшуватися за експоненціальним законом до точки G, в якій умовно прийнято вважати закінченим тепловий процес. Площа під кривою DEFG, яка позначена на рис. 2 косим штрихуванням, відповідає енергії, що виділилася після ініціації досліджуваного процесу.

Суть запропонованого методу полягає в тому, ініціацію процесу проводять не в стаціонарному тепловому режимі, а поблизу точки С у регулярному режимі після витримки часу t_{p1} , достатнього для регуляризації режиму після останнього збурення [9]. Якщо би ініціація не відбулася, значення теплового потоку продовжували би змінюватися відповідно до передбачуваної кривої CD. Коли ж ініціація проведена, зміна теплового потоку буде проходити відповідно до кривої CJKL. При цьому енергії, що виділяється у реакції відповідає площі між кривими CJKL та CD, причому відрізки кривих KL та CD є передбачуваними експонентами. Тому частину площі під кривою CJK з горизонтальним штрихуванням визначають прямим вимірюванням та інтегруванням, а частину площі між відрізками кривих KL та CD з вертикальним штрихуванням визначають розрахунковим методом по екстраполяційним рівнянням цих кривих:

$$W_{CD}^{pez} = A1 \cdot \exp \frac{-(t-tl)}{\tau1} + A01 \quad , \quad t \geq tl; \quad (2)$$



$$W_{KL}^{peg} = A2 \cdot \exp \frac{-(t-t_2)}{\tau_2} + A02, \quad t \geq t_2; \quad (3)$$

де W_{CD}^{peg} і W_{KL}^{peg} - значення теплового потоку у регулярних режимах на кривих CD та KL;

$A1, A2, A01, A02$ - коефіцієнти екстраполяційних функцій;

τ_1, τ_2 - сталі часу.

У більшості реальних випадків сталі часу та «зміщення нуля» до та після проведення досліджуваного процесу не змінюються, тому:

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau; \quad A01 = A02 = A0.$$

За умови, що значення сталої часу відоме (визначене при налагодженні калориметра), для визначення коефіцієнтів екстраполяційних функцій $A0, A1, A2$ достатньо трьох вимірювань значень теплового потоку, наприклад, як це показано на рис. 3, - двох вимірювань $W1_1$ і $W1_2$ у першому регулярному режимі до ініціації процесу та одного вимірювання $W2_1$ у другому регулярному режимі при повторній регуляризації теплового процесу після ініціації.

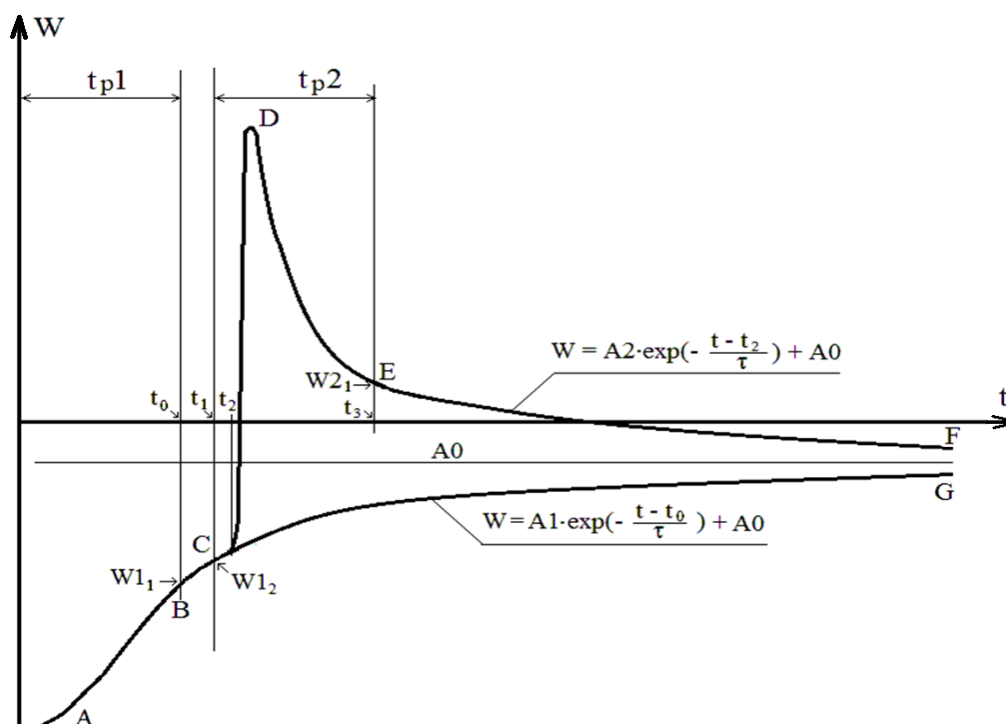


Рис. 3. Зміна теплового потоку в калориметрі у часі при визначенні коефіцієнтів екстраполяції за трьома вимірюваннями.

У цьому випадку коефіцієнти екстраполяційних функцій розраховують за формулами:

$$A0 = \frac{W1_2 - W1_1 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)}; \quad (4)$$



$$A1 = \frac{W1_1 - W1_2}{1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)}; \quad A2 = \frac{W1_1 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) - W1_2}{1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)} + W2, \quad (5)$$

де $\Delta t = (t_1 - t_0)$ - інтервал часу між вимірюваннями значень теплового потоку $W1_1$ та $W1_2$.

Вимірювання значень теплового потоку не є абсолютно точним, результат вимірювань містить похибку, яка впливає на точність визначення коефіцієнтів екстраполяційних функцій $A0$, $A1$, $A2$ і, відповідно на точність визначення теплоти, що виділилася у досліджуваному процесі. Крім того на похибку визначення коефіцієнтів екстраполяційних функцій впливає співвідношення між інтервалом часу між вимірюваннями та сталою часу калориметра $\frac{\Delta t}{\tau}$.

Якщо похибки вимірювань значень теплового потоку є незалежними випадковими величинами та мають абсолютне значення до ΔW , то можна розрахувати відношення абсолютної похибки визначення коефіцієнтів екстраполяційних функцій до похибки вимірювання теплового потоку:

$$\left| \frac{\Delta A0}{\Delta W} \right| = \frac{\sqrt{\left[\exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right]^2 + 1}}{\exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) - 1}; \quad \left| \frac{\Delta A1}{\Delta W} \right| = \frac{\sqrt{2}}{\exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) - 1}. \quad (6)$$

На рис. 4 представлені графіки значень похибок, розрахованих за (6) в залежності від відношення $\frac{\Delta t}{\tau}$.

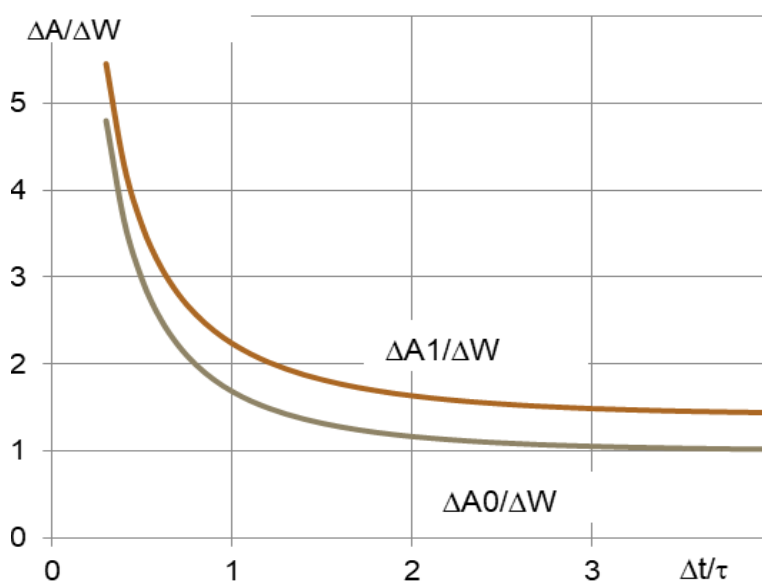


Рис. 4. Графіки значень похибок визначення коефіцієнтів екстраполяційної функції в залежності від відношення $\frac{\Delta t}{\tau}$.



Як видно з рис. 4, при значеннях відношення $\frac{\Delta t}{\tau} < 1$ значення похибок визначення коефіцієнтів екстраполяційної функції різко зростають і при значенні $\frac{\Delta t}{\tau} \approx 0,3$ приблизно у 5 разів перевищують похибку вимірювань теплового потоку.

Динамічний метод із скороченням режиму підготовки та екстраполяцією регулярних режимів за серіями багаторазових вимірювань.

Метод передбачає застосування багаторазових вимірювань теплового потоку в регулярному режимі з подальшою екстраполяцією отриманих результатів, що дає можливість зменшити вплив випадкової похибки та врахувати вплив «зміщення нуля» на результат вимірювання.

Враховуючи суттєвий вплив випадкової похибки вимірювання при одноразовому вимірюванні, запропоновано проводити серії вимірювань у регулярних режимах перед ініціацією процесу і після повторного настання регулярного режиму, а за результатами цих серій вимірювань визначати коефіцієнти екстраполяції A_1 , A_2 , A_0 як коефіцієнти регресії [11, 12].

Розглянемо більш детально послідовність дій при реалізації запропонованого методу динамічних вимірювань. Графік зміни теплового потоку в калориметрі у часі у випадку, коли початкова температура реакційної посудини нижча за робочу температуру калориметра, представлений на рис. 5.

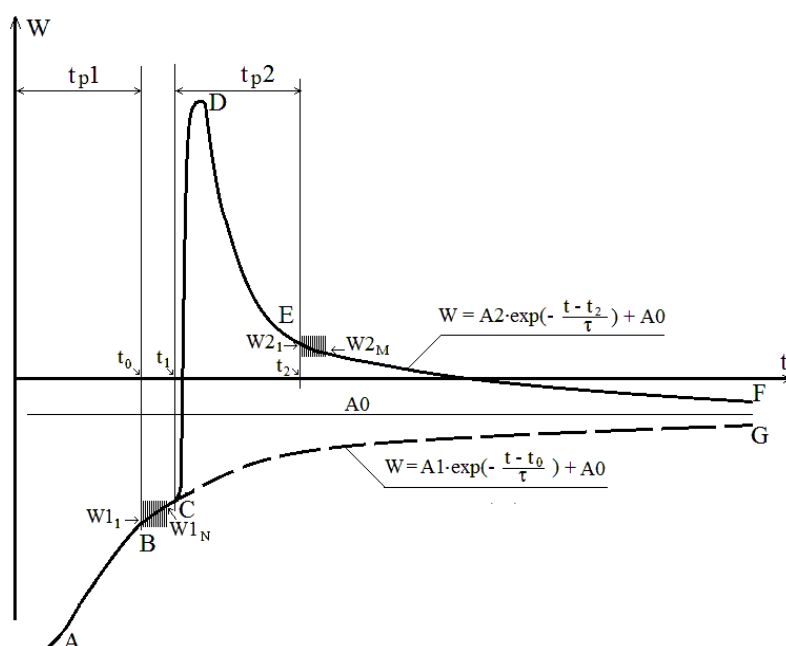


Рис. 5. Зміна теплового потоку в калориметрі у часі – визначення коефіцієнтів екстраполяції за серією вимірювань значень теплового потоку (початкова температура реакційної посудини нижча за робочу температуру калориметра).

На початку експерименту (точка А) реакційну посудину з досліджуваними речовинами розмішують в калориметричній комірці і починають контролювати тепловий потік. По мірі розігріву реакційної посудини, на ділянці графіку АВ



тепловий потік зменшується за абсолютним значенням. Витримують калориметр протягом часу регуляризації t_p , після чого він переходить у регулярний режим в точці В у момент t_0 проводять першу серію вимірювань значень теплового потоку $W1_i$ ($i=1 \dots N$), причому кількість вимірювань $N \geq 20$, а проміжок часу між вимірюваннями - Δt . Якщо ніяк не впливати на тепловий стан калориметра, то надалі тепловий потік буде змінюватися відповідно до пунктирної кривої BCG на рис. 5 за законом регулярного режиму $W = A1 \cdot \exp[(t_0 - t)/\tau] + A0$, з асимптотичним наближенням до значення «зміщення нуля» $A0$. Після закінчення серії вимірювань у точці С в момент часу t_1 проводять ініціювання досліджуваного процесу і одночасно починають інтегрування теплового потоку W . Тепловий потік внаслідок тепловиділення в досліджуваному процесі змінюється відповідно до кривої CDE. Інтегрування теплового потоку проводять впродовж інтервалу часу регуляризації t_p до точки Е в момент часу t_2 , коли повторно настає регулярний режим.

Інтегруванням теплового потоку $W(t)$ з моменту часу t_1 до t_2 визначають кількість теплоти $Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} W(t) \cdot dt$. У повторному регулярному режимі, починаючи з точки Е, проводять другу серію вимірювань значень теплового потоку $W2_j$ ($j=1 \dots M$), причому кількість вимірювань $M \geq 20$, а проміжок часу між вимірюваннями - Δt . Після точки Е тепловий потік буде змінюватися відповідно до кривої EF на рис. 5 за законом регулярного режиму $W = A2 \cdot \exp[(t - t_2)/\tau] + A0$, з асимптотичним наближенням до значення «зміщення нуля» $A0$.

Розраховують повну теплоту, що виділилася в реакційній посудині в результаті досліджуваної реакції, яка відповідає площі між кривими CDEF та CG на рис. 5:

$$Q = \int_{t_1}^{\infty} [W_{CDEF}(t) - W_{CG}(t)] \cdot dt = Q_1 + Q_2, \quad (7)$$

$$\text{де } Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} W(t) \cdot dt, \quad (8)$$

$$Q_2 = \left[A2 - A1 \cdot \exp\left(-\frac{t_1 - t_0}{\tau}\right) \right] \cdot \tau + A0 \cdot (t_2 - t_1), \quad (9)$$

$A0$, $A1$, $A2$ – коефіцієнти екстраполяційних функцій, які розраховують по формулам, отриманим методом найменших квадратів з першої та другої серії вимірювань в регулярних режимах [12]:

$$A0 = \frac{\sum_{i=1}^N W1_i \cdot \exp\left(-\frac{i \cdot \Delta t}{\tau}\right) \times \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{i \cdot \Delta t}{\tau}\right) - \sum_{i=1}^N \exp\left(-2 \frac{i \cdot \Delta t}{\tau}\right) \times \sum_{i=1}^N W1_i}{\left[\sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{i \cdot \Delta t}{\tau}\right) \right]^2 - N \times \sum_{i=1}^N \exp\left(-2 \frac{i \cdot \Delta t}{\tau}\right)}, \quad (10)$$



$$A1 = \frac{\sum_{i=1}^N W1_i \times \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{i \cdot \Delta t}{\tau}\right) - N \times \sum_{i=1}^N W1_i \exp\left(-\frac{i \cdot \Delta t}{\tau}\right)}{\left[\sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{i \cdot \Delta t}{\tau}\right)\right]^2 - N \times \sum_{i=1}^N \exp\left(-2 \frac{i \cdot \Delta t}{\tau}\right)}, \quad (11)$$

$$A2 = \frac{\sum_{j=1}^M W2_j \times \sum_{j=1}^M \exp\left(-\frac{j \cdot \Delta t}{\tau}\right) - M \times \sum_{j=1}^M W2_j \exp\left(-\frac{j \cdot \Delta t}{\tau}\right)}{\left[\sum_{j=1}^M \exp\left(-\frac{j \cdot \Delta t}{\tau}\right)\right]^2 - M \times \sum_{j=1}^M \exp\left(-2 \frac{j \cdot \Delta t}{\tau}\right)}, \quad (12)$$

де: $W1_i$ - результати вимірювань теплового потоку перед ініціюванням досліджуваного процесу ($i=1, 2, \dots, N$);

$W2_j$ - результати вимірювань теплового потоку після повторного встановлення регулярного режиму ($j=1, 2, \dots, M$)

$N \geq 20$ - кількість вимірювань теплового потоку перед ініціюванням досліджуваного процесу;

$M \geq 20$ - кількість вимірювань теплового потоку після повторного встановлення регулярного режиму;

Δt - інтервал часу між вимірюваннями;

t_0 - момент початку вимірювань теплового потоку перед ініціюванням досліджуваного процесу;

t_1, t_2 - моменти ініціювання реакції з початком інтегрування і кінця інтегрування;

τ - стала часу калориметра.

Запропонований метод вимірювань здійснюється таким же чином у випадку іншого співвідношення початкової та робочої температури, знаку «зміщення нуля». Графік зміни теплового потоку в калориметрі у часі у випадку, коли початкова температура реакційної посудини вища за робочу температуру калориметра, а «зміщення нуля» є додатнім представлений на рис. 6.

У цьому та інших можливих випадках порядок операцій та розрахунків такий же, як і в розглянутому варіанті.

Таким чином, кількість теплоти, що виділилася, визначають як суму двох доданків - результату інтегрування теплового потоку у нерегулярному режимі та інтегралу від екстраполяційних функцій зміни теплового потоку в регулярних режимах.

Для визначення похибок, що виникають внаслідок застосування динамічного методу вимірювань, проведено імітаційне моделювання методом Монте-Карло. При моделюванні встановлені такі параметри калориметричної системи: тривалість встановлення регулярного режиму після закінчення дії збурення – 600 с, стала часу в регулярному режимі – 330 с, відносна випадкова похибка вимірювання теплового потоку у калориметрі має рівномірний розподіл у межах $\pm 0,1\%$. Ці та інші застосовані при моделюванні параметри



приблизно відповідають характеристикам квазидиференціального бомбового калориметра моделі КТС-4 [13]. При моделюванні варіювалися кількість вимірювань у серії N та M, а також інтервал часу між вимірюваннями Δt . Відповідно варіювалась і тривалість вимірювань та накопичення даних для визначення коефіцієнтів екстраполяційних функцій.

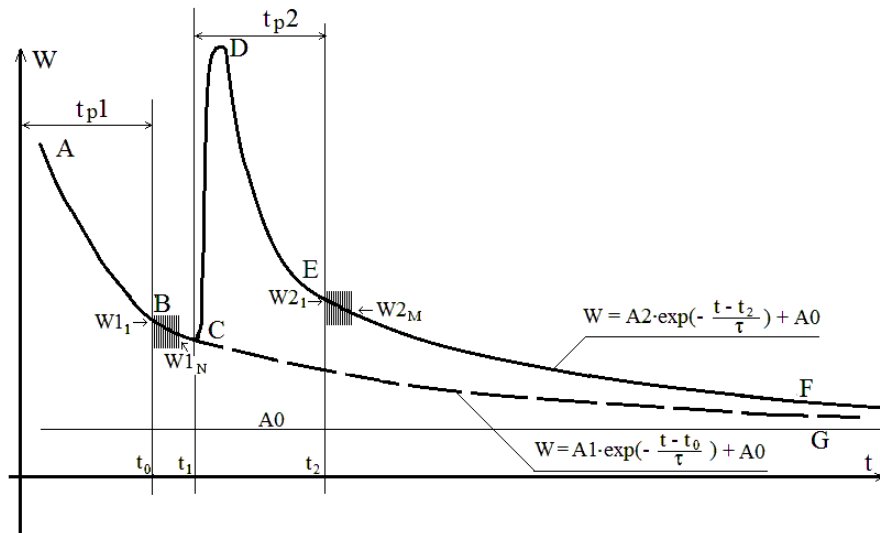


Рис. 6. Зміна теплового потоку в калориметрі у часі – визначення коефіцієнтів екстраполяції за серією вимірювань (початкова температура реакційної посудини вища за робочу температуру калориметра).

При розрахунку похибки визначення Q враховувалося, що енергія регулярного режиму Q_2 складає приблизно 8...12% від повної енергії, що виділяється у імпульсі при спалюванні проби палива.

За результатами моделювання встановлено, що для бомбового калориметру моделі КТС-4, при вимірюванні теплового потоку з похибкою до 0,1% і тривалості серій вимірювань для визначення коефіцієнтів екстраполяційних функцій 180с, похибка вимірювання значення Q_2 не перевищує 0,27%, а повної енергії Q - 0,034%. Оскільки похибка вимірювання калориметра КТС-4 складає $\pm 0,1\%$, можна вважати, що запропонований динамічний метод не суттєво підвищить загальну похибку. В той же час зменшення тривалості вимірювань разом із підготовкою є доволі значним.

Обговорення та аналіз результатів.

При традиційному інтегральному методі вимірювань у КТС-4 підготовка триває приблизно 80 хвилин, а саме вимірювання 30 хвилин, тобто разом 110 хвилин. За використання запропонованого динамічного методу: підготовка, що включає стабілізацію температурного режиму теплорозсіювального блоку та нерегулярний режим при включенні і встановленні бомби – 25...30 хвилин; регулярний режим з вимірюваннями для розрахунку коефіцієнтів A_0 і A_1 – 3 хвилини; підпал та інтегрування сигналу для визначення значення Q_1 у нерегулярному режимі – 10 хвилин; регулярний режим з вимірюваннями для розрахунку коефіцієнту A_2 – 3 хвилини, тобто загалом 41...46 хвилин. Таким



чином, динамічний метод дозволяє скоротити тривалість вимірювань у 2...2,5 рази.

На запропонований динамічний метод вимірювання імпульсу теплоти отримано патент України на винахід [14].

Висновки.

Розглянуті три методи динамічного вимірювання імпульсного тепловиділення зі скороченням тривалості експерименту шляхом екстраполяції вихідного сигналу калориметра в регулярному режимі. Проведене імітаційне моделювання динамічного способу з визначенням коефіцієнтів апроксимації в регулярному режимі на підставі регресійного аналізу результатів вимірювань.

Запропонований метод динамічного вимірювання імпульсного тепловиділення дає можливість зменшити тривалість підготовки та вимірювання у 2...2,5 рази у порівнянні з традиційним інтегральним методом при незначному підвищенні похибки.

Література.

1. W. Hemminger and G.W.H. Höhne: "Calorimetry – Fundamentals and Practice" Verlag Chemie, Weinheim (1984).
2. Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива. *Инженерно-физический журнал*, 1997. Т. 70, №5. С. 828-839.
3. Е.Н. Корчагина, Е.В. Ермакова, В.П. Варганов Калориметрия сгорания топлива. *Мир измерений*, 2012. № 2. С. 32–39
4. Э. Кальве, А. Прат. Микрокалориметрия. Применение в физической химии и биологии. Пер. с франц. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 477с.
5. Воробьев Л. И., Грищенко Т. Г., Декуша Л. В. Исследование влияния параметров конструкции кондуктивного бомбового калориметра на погрешности измерения. *Промышленная теплотехника*, 2001. Т. 23, № 6. С. 143–148.
6. А. с. № 637732 СССР. Способ измерения импульса тепла / Л. Н. Гальперин, Ю. Р. Колесов, А. С. Неганов. 1978. Бюл. изобретений. № 46. 19 с.
7. Способ измерения импульса тепла: патент 2 065 587 РФ: G 01 K 17/00 / Л. Б. Машкинов, М. Н. Штейнберг, К. А. Бабаян, В. В. Батылин Патентообладатель: Институт структурной макрокинетики РАН. Оpubл. 20.08.1996.
8. Способ измерения импульса тепла: патент 2 504 744 РФ: G 01 K 17/00 / Л. Б. Машкинов. Оpubл. 20.01.2014, Бюл. № 2.
9. Г.М. Кондратьев, Г.Н. Дульнев, Е.С. Платунов, Н.А. Ярышев Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2003. - 560 с.
10. Бабак В. П., Запорожець А. О., Назаренко О. О., Редько О. О. Аналіз апроксимації результатів вимірювань теплового потоку бомбового калориметра в нестационарному режимі. *Scientific Journal «ScienceRise»*, № 8 (37), 2017. С. 24–32.



11. Воробйов Л. Й. Динамічний метод вимірювання імпульсу тепловиділення у калориметрі теплового потоку. *Метрологія та прилади*, Харків, 2017. № 5-1. С. 26–29.
12. Бабак В. П., Хандецький В. С., Шрюфер Е. Обробка сигналів: підручник. Київ: Либідь, 1996. 392 с.
13. Воробйов Л. Й. Методи та засоби квазідиференціальної калориметрії. *Метрологія та прилади*, Харків, 2018. № 1. С. 17–25.
14. Воробйов Л. Й., Декуша Л. В., Грищенко Т. Г.; Декуша О. Л. Спосіб вимірювання імпульсу теплоти: пат. України на винахід № 116419 МПК G01 K 17/00, G01 N 15/20; заявник і патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5.

Annotation. *The method of dynamic measurement of pulsed heat dissipation with reduction of experiment duration by extrapolation of a calorimeter output signal in a regular mode on the basis of the regression analysis of results of measurements is presented. The total heat release is calculated as the sum of the integral value of the signal in irregular mode and the heat release component calculated from the results of extrapolation in the regular mode, which makes it possible to reduce the measurement time. Simulation modeling of the dynamic method of measurements was carried out, which showed that it makes it possible to reduce the duration of preparation and measurement by 2 ... 2.5 times in comparison with the traditional integral method.*

Key words: *pulse heat release, dynamic measurements, regular mode, calorimetry.*

Стаття підготовлена у рамках виконання науково-дослідної відомчої тематики ІТТФ НАН України, тема «Розвиток методів та засобів підвищення екологоенергетичної ефективності в газотурбобудуванні та теплоенергетиці» (шифр 1.7.1.896).

Стаття відправлена: 22.09.2020 г.

© Воробйов Л.Й., Декуша Л.В., Декуша О.Л., Іванов С.О., Ковтун С.І.



УДК 528.563

**WAYS TO FIX THE PIEZOELECTRIC ELEMENT IN THE
CONSTRUCTION OF THE PIEZOGRAVIMETER
СПОСОБИ ЗАКРІПЛЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕМЕНТА У КОНСТРУКЦІЇ
П'ЄЗОГРАВІМЕТРА**

Bezvesilna O.M. / Безвесільна О.М.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-6951-1242

Kyrychuk Y.V. / Киричук Ю.В.*d.t.s., as.prof. / д.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-8638-6060

Nazarenko N.M. / Назаренко Н.М.*as. / асистент*

*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. Розглянуто способи розміщення п'єзоелементів у конструкції п'єзогравіметра та зроблено їх порівняльну характеристику, визначено їх переваги та недоліки. Обрано спосіб розміщення п'єзоелементів – нецентрований та затиснений за допомогою гвинта.

Ключові слова: п'єзогравіметр, п'єзоперетворювач, п'єзоелемент, інерційна маса, конструкція, прискорення сили тяжіння.

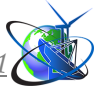
Вступ.

Інформацію про гравітаційне поле Землі, тобто про фізичне поле, зумовлене тяжінням маси Землі і відцентровою силою, що виникає внаслідок добового обертання Землі, використовують у сейсмології, гравіметрії, космічній і авіаційній техніці, археології, геології тощо. У класичній фізиці гравітаційне поле описують одним потенціалом і напруженістю. Напруженість гравітаційного поля збігається з прискоренням сили тяжіння (ПСТ) [1-2].

Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі, тобто ПСТ, найзручніше використовувати авіаційні гравіметричні системи (АГС), чутливим елементом яких є п'єзогравіметр. За допомогою АГС можна здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою інших гравіметричних засобів або систем [3-4].

Основний текст.

У попередніх дослідженнях [2] обрано конструкцію чутливого елемента (ЧЕ) нового п'єзогравіметра (ПГ), що працює на основі деформації стиснення-розтягування. Даний вибір обґрунтовано значними перевагами ЧЕ, що працюють на стиснення-розтягування, перед ЧЕ (інерційною масою та п'єзоелементом) на "згин" чи "здвиг" для вимірювання ПСТ: високий коефіцієнт перетворення; мала чутливість до сторонніх впливів, включаючи поперечні коливання; простота та технологічність конструкції; висока часова стабільність метрологічних характеристик [5].



Існує декілька способів розміщення п'єзоелементів (ПЕ) в конструкціях ЧЕ, що працюють на основі деформації стиснення-розтягування, найпростіші з яких зображені на рис. 1.

Канонічна схема (рис. 1, а) складається із одного дискового ПЕ 1, розташованого між основою 2 й інерційна маса (ІМ) 3. У даній схемі можливий тільки неізолюваний від корпусу метод виведення сигналу. Так як центри мас ПЕ та ІМ не збігаються із центром інерції ПГ, така конструкція є не центрованою, що сприяє виникненню чутливості до поперечних коливань [5].

Основні переваги даної конструкції: простота виготовлення і можливість досягнення високої резонансної частоти ПГ.

Циліндричний ПЕ 1 із радіальним напрямом поляризації (робочий п'єзомодуль d_{31}) (рис. 1, б). Розташування електродів на поверхнях ПЕ дає можливість без використання додаткових ізоляторів виконати симетричне виведення сигналу, що сприяє підвищенню надійності ПГ. Вибір висоти, зовнішнього і внутрішнього діаметрів ПЕ дозволяє оптимізувати вибір значення коефіцієнта передачі ПГ і його резонансної частоти. Дана конструкція також є нецентрованою.

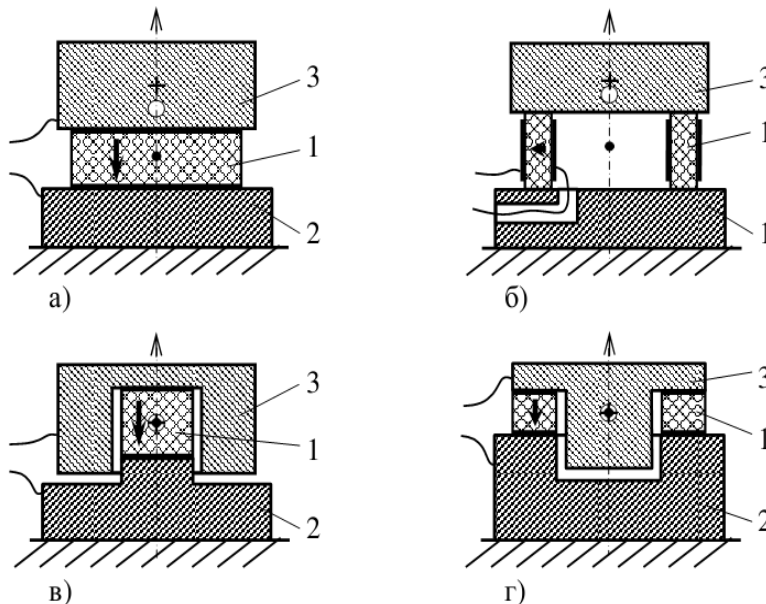


Рис. 1. Схеми розміщення ПЕ у конструкції ПГ, що працюють на основі деформації стиснення-розтягування:

1 – п'єзоелемент; 2 – основа; 3 – інерційна маса (складові елементи, з'єднані за допомогою клею)

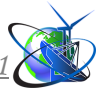
Джерело: [5]

У центрованих конструкціях із зовнішнім (рис. 1, в) і внутрішнім (рис. 1, г) розташуванням ІМ центри мас ПЕ 1 і ІМ 3 співпадають із центром інерції ПГ, що сприяє зниженню чутливості до поперечних коливань.

Загальні недоліки усіх клеєних схем: їх невисока міцність і надійність. Крім того, клейові з'єднання негативно впливають на температурну стабільність метрологічних характеристик ПГ.

Переваги: простота їх конструкції та малі габаритні розміри.

У вищезгаданих схемах з'єднання складових елементів може відбуватись



пайкою або зварюванням (як альтернатива склеюванню).

Схеми розміщення ЧЕ ПГ із пружним затисненням елементів (рис. 2). ПГ із центральним затисненням (рис. 2, а) містить два дискових ПЕ 1 з осевим отвором, розташовані між основою 2 та ІМ 3 і стягнуті різьбовою шпилькою 4 через пружину 5. Наявність пружини стабілізує зусилля затиснення за рахунок компенсації теплового розширення елементів конструкції і деформацій різьбових з'єднань. Знімання електричного сигналу здійснюється через тонку металеву прокладку 6 між п'єзоелементами. Наявність декількох ПЕ забезпечує підвищення ємності і коефіцієнта перетворення по заряду ПГ та не вимагає розміщення додаткового ізолятора між ПЕ й ІМ. Дана конструкція є нецентрованою та має неізольоване від корпусу виведення сигналу.

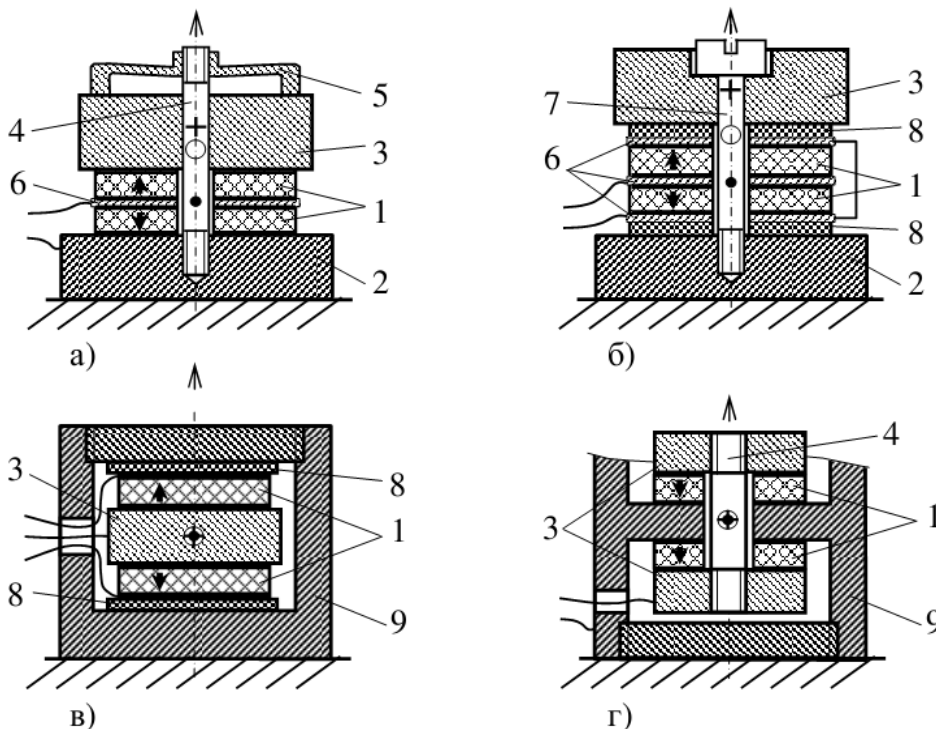


Рис. 2. Схеми розміщення ПЕ у конструкції ПГ, що працюють на основі деформації стиснення-розтягування:

1 – п'єзоелемент; 2 – основа; 3 – інерційна маса; 4 – шпилька;

5 – пружина; 6 – прокладка; 7 – гвинт; 8 – ізолятор;

9 – корпус (складові елементи, з'єднані за допомогою гвинта чи шпильки)

Источник: [5]

У схемі, зображеній на рис. 2, б, центральне затиснення здійснюється гвинтом 7 без використання окремого пружного елемента. Конструкція додатково містить два ізолятора 8, які забезпечують реалізацію ізольованого від корпусу виведення сигналу. Дана конструкція, як і попередня, є нецентрованою. Відсутність пружини дозволяє збільшити зусилля затиснення елементів ПГ. Однак, зростання жорсткості затиснення може призвести до зниження коефіцієнта передачі ПГ на 20 - 30%.

Розглянуті схеми розміщення ЧЕ ПГ з центральним пружним затисненням характеризуються досить високою стабільністю метрологічних характеристик, міцністю, надійністю і технологічністю.



До іншого різновиду схеми розміщення ЧЕ ПГ з пружним затисненням відносяться конструкції, виконані за схемою тандем-датчика [1]. Особливість роботи даної схеми полягає в одночасній, але протилежній за знаком, деформації ПЕ. Нелінійності вихідних сигналів, що виникають при стисненні і розтягуванні ПЕ, взаємно компенсуються (рис. 2, в, г).

У реальних умовах не завжди можливо підібрати пари ПЕ із абсолютно однаковими характеристиками. Крім того, механічні напруги у ПЕ дещо відрізняються, так як останні закріплені на різних ділянках корпусу ПГ та мають різні жорсткості. Дані недоліки не дозволяють повною мірою здійснити компенсацію нелінійності вихідних сигналів.

Порівняльні характеристики згаданих конструктивних схем наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика конструктивних схем ПГ

№	Тип конструкції	Переваги	Недоліки
1	Нецентрована із клеєвим з'єднанням	Простота конструкції, можливість реалізації високої резонансної частоти	Низька чутливість; піддається впливові поперечних коливань; температурна нестабільність метрологічних характеристик
2	Центрована із клеєвим з'єднанням	Стійкість до впливу поперечних коливань	Стійкість до впливу зовнішніх електромагнітних полів; низька точність; малий діапазон вимірювання; температурна нестабільність
3	Нецентрована із затисненням за допомогою шпильки	Висока чутливість, високий коефіцієнт перетворення, стабільність метрологічних характеристик	Нестабільність коефіцієнта підсилення; залежність від властивостей гвинта
4	Нецентрована із затисненням за допомогою гвинта	Стабільність метрологічних характеристик; стійкість до впливу поперечних коливань	Залежність від властивостей гвинта
5	Схема тандем-датчик	Стійкість до впливу зовнішніх магнітних полів, температурна стійкість	Неможливість підібрати пари ПЕ із абсолютно однаковими характеристиками

Як бачимо із табл. 1, кожна конструктивна схема має як свої переваги, так і недоліки. Тому запропоновано у конструкції нового ПГ використовувати наступну схему розміщення ЧЕ (рис. 3).

Як бачимо із рис. 1, конструкція нового ПГ є не центрованою. Чутливий



елемент ПГ АГС складається із п'єзоелектричного елемента 1, що працює на основі деформації стиснення-розтягування, з ізоляторами 2 на торцях, і інерційної маси 3. З метою підвищення надійності та міцності конструкції, ЧЕ пружно притиснений до основи 4 гвинтом 6. ПГ за допомогою кабелю 7 з'єднаний із операційним підсилювачем.

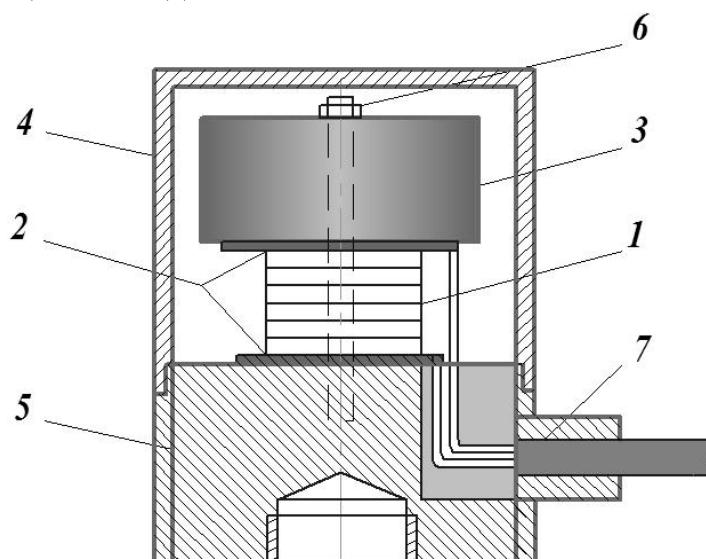


Рис. 3. Конструкція ПГ:

1 – ПЕ; 2 – ізолятори; 3 – інерційна маса; 4 – основа; 5 – герметичний корпус; 6 – гвинт; 7 – вивідний кабель

Источник: [5]

Конструкція ПГ була обрана із наступних міркувань. Оскільки необхідно забезпечити максимальну чутливість ПГ, то конструкція має бути не центрованою (табл. 1). Так як у якості ЧЕ буде використовуватись п'єзопакет, а не біморфний п'єзоелемент, то його затиснення має бути максимально пружним, що можна реалізувати лише за допомогою гвинта. Таке затиснення забезпечує стійкість ПЕ до впливу перевантажень та максимальну його пружність, що також призводить до підвищення надійності ПГ. Схема ПГ передбачає ізольоване виведення сигналу через кабель, що максимально зменшує вплив на вихідний сигнал ПГ зовнішніх електромагнітних полів.

Висновки.

Із наведеного огляду конструкцій ЧС п'єзогравіметр розглянуто способи розміщення п'єзоелементів та зроблено їх порівняльну характеристику, визначено їх переваги та недоліки. В результаті обрано спосіб розміщення п'єзоелементів – нецентрований та затиснений за допомогою гвинта

Література:

1. Безвесільна, О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: Монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 604 с.2.
2. Tkachuk, A. N. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter / A.N. Tkachuk, E.N. Bezvesilnaya // Aviation. –2014. –Vol. 18, Issue 3. –P. 134–140. doi: 10.3846/16487788.2014.9698785.



3. Безвесільна, О. М. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів: монографія / О. М. Безвесільна, Ю. В. Киричук, С. С. Ткаченко - Житомир: ЖДТУ, 2010. – 153 с.

4. Безвесільна, О. М. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем (Технологічні вимірювання та прилади): навчальний посібник для студентів приладобудівних спец. ВНЗ / О. М. Безвесільна, Ю. В. Киричук; Житомир. держ. технол. ун-т.– Житомир: ЖДТУ, 2008.– 172с.

5. Янчич, В.В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: учеб. пособие/ В.В. Янчич. Ростов-на-Дону, Россия: Издательство Южного федерального университета, 2008; –77с.

Abstract. *The methods of placement of piezoelectric elements in the construction of a piezogravimeter are considered and their comparative characteristics are made, their advantages and disadvantages are determined. The method of placement of piezoelectric elements is chosen - centered and clamped with a screw.*

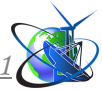
Key words: *piezogravimetry, piezoelectric transducer, piezoelectric element, inertial mass, construction, gravity acceleration.*

Статья отправлена: 24.09.2020 г.

© Безвесільна О.М.

© Киричук Ю.В.

© Назаренко Н.М.



УДК 528.563

**ERROR COMPENSATION FOR ACCELERATION OF VERTICAL
ACCELEROMETER AND HORIZONTAL ACCELEROMETER USING
NEURAL NETWORK****КОМПЕНСАЦІЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО
АКСЕЛЕРОМЕТРА ТА ГОРИЗОНТАЛЬНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ
НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ****Bezvesilna O.M. / Безвесільна О.М.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-6951-1242

Kyrychuk Y.V. / Киричук Ю.В.*d.t.s., as.prof. / д.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-8638-6060

*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 розглядається компенсація похибок вимірювання прискорення вертикального акселерометра та горизонтальних акселерометрів шляхом введення в комплекс блоку обчислень з використанням нейронних мережі.

Ключові слова: акселерометр, навігаційний комплекс, прискорення, похибка.

Вступ.

В існуючих системах керування навігаційних комплексів відсутні засоби компенсації похибок, що наявні на виходах вертикального акселерометра та горизонтальних акселерометрів [1]. Тому результати вимірювань прискорення, що формуються у БЦОМ на основі даних з виходів двох горизонтальних акселерометрів та вертикального акселерометра, містять похибки. Це – інструментальні похибки визначення прискорення, що похибками масштабних коефіцієнтів, обумовлені систематичними похибками дрейфу та похибками виставлення осей чутливості [2].

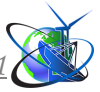
Всі ці похибки суттєво знижують точність результатів вимірювання прискорення.

Основний текст.

Поставлена задача вирішується наступним чином. Для компенсації похибок вимірювання прискорення горизонтальних акселерометрів та вертикального акселерометра додатково введений блок обчислень з використанням нейронних мереж. До його входів підключені вихід вертикального акселерометра та виходи горизонтальних акселерометрів. Виходи блока обчислень з нейронними мережами підключені до входів БЦОМ.

Завдяки тому, що блоку обчислень з нейронними мережами виконує компенсацію інструментальних похибок двох горизонтальних акселерометрів та вертикального акселерометра, забезпечується суттєве підвищення точності вимірювань [3,4].

Таким чином, у запропонованій системі забезпечується суттєве



підвищення точності вимірювань прискорення.

Для компенсації похибок вимірювання прискорення сили горизонтальних акселерометрів та вертикального акселерометра додатково введений блок обчислень з нейронними мережами (рис. 1). До входів блоку підключені вихід вертикального акселерометра та виходи горизонтальних акселерометрів. Виходи блока нейронної мережі підключені до входів БЦОМ.

Комплекс стабілізації складається: два горизонтальні акселерометри 2, 3, вертикальний акселерометр 1, вимірювач 4 висоти та БЦОМ 5 та блок 6 нейронної мережі. Горизонтальні акселерометри 2, 3 і вертикальний акселерометр 1 встановлені на гіростабілізованій платформі. Вихід вимірювача 4 висоти підключений до входу БЦОМ 5 [3,4].

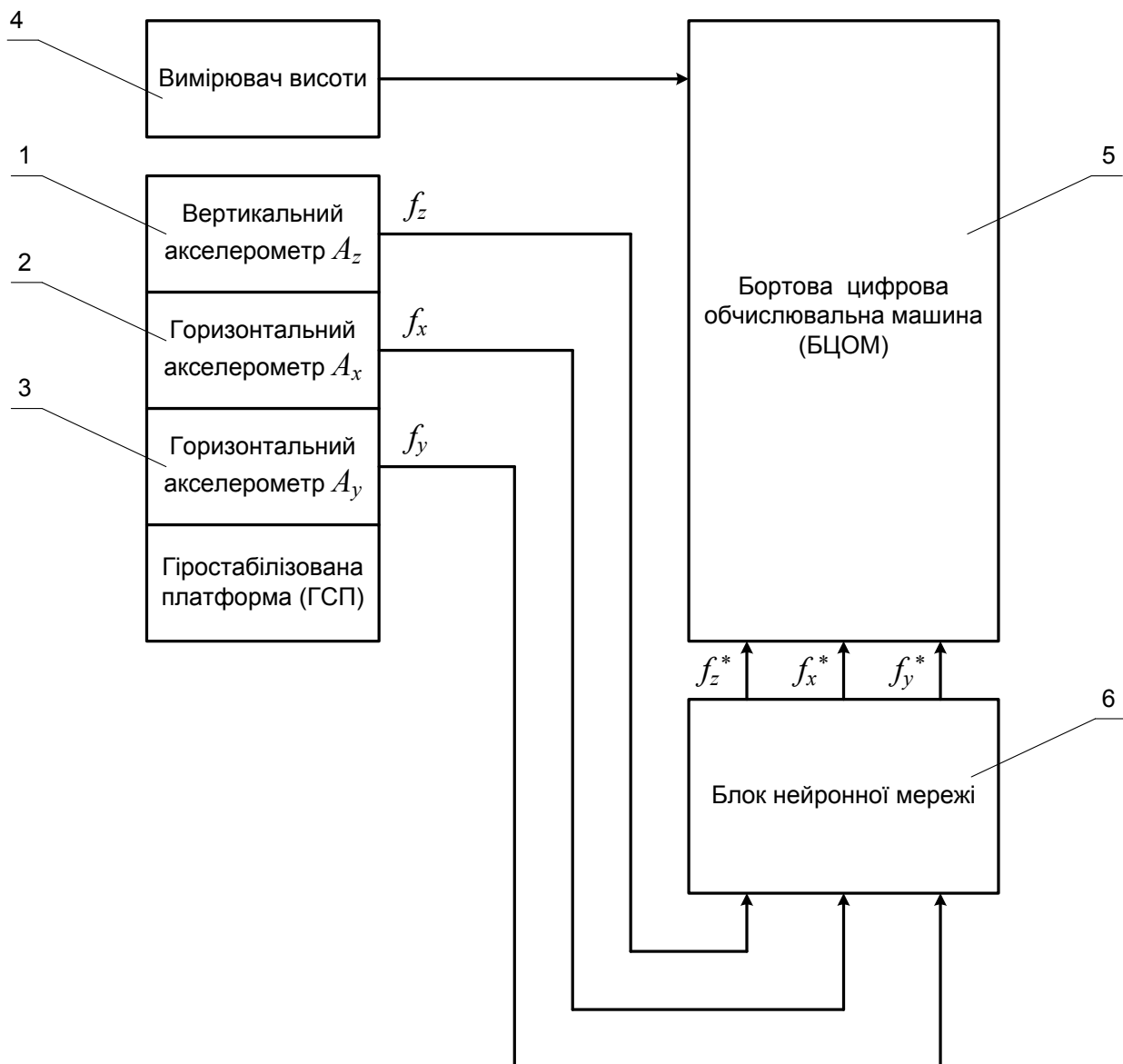
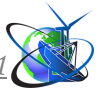


Рис. 1. Комплекс стабілізації з компенсацією похибок вимірювання прискорення блоком нейронної мережі

До входів блоку обчислень 6 нейронної мережі підключено виходи вертикального акселерометра 1 та горизонтальних акселерометрів 2, 3. Виходи



блоку обчислень 6 нейронної мережі підключені до входів БЦОМ 5.

Комплекс стабілізації працює таким чином.

Сигнали f_z , f_x , f_y з виходів двох горизонтальних акселерометрів 2, 3 та вертикального акселерометра 1, поступають на входи блоку обчислень 6 нейронної мережі. Вихідний сигнал від вимірювача 4 висоти подається на вхід БЦОМ 5. Виміряні двома горизонтальними акселерометрами 2, 3 та вертикальним акселерометром 1 вихідні сигнали містять інструментальні похибки. Як відомо з [3], ці інструментальні похибки обумовлені дією на вертикальний акселерометр 1 та горизонтальні акселерометри 2, 3 таких факторів [4]: систематичних похибок ΔA_i дрейфу; похибок ΔB_i масштабних коефіцієнтів; похибок ΔC_i виставлення осей чутливості, де i – осі координат Ox , Oy , Oz .

У блоці обчислень 6 нейронної мережі виконується розрахунок проєкцій інструментальних похибок ΔA_i , ΔB_i , ΔC_i на відповідні осі координат Ox , Oy , Oz на основі підходів, що викладені у [3, 4]. Цей блок також виконує компенсацію сумарних інструментальних похибок $\sum_i^N \Delta A_i$, $\sum_i^N \Delta B_i$, $\sum_i^N \Delta C_i$ (де $i = \overline{1, N}$, N – кількість проєкцій інструментальних похибок на відповідні осі координат Ox , Oy , Oz) шляхом їх визначення за формулами:

$$f_z^* = f_z - \sum_i^N (\Delta A_i + \Delta B_i + \Delta C_i), \quad f_x^* = f_x - \sum_i^N (\Delta A_i + \Delta B_i + \Delta C_i),$$

$$f_y^* = f_y - \sum_i^N (\Delta A_i + \Delta B_i + \Delta C_i),$$

де f_z^* , f_x^* , f_y^* – відкориговані значення вихідних сигналів вертикального акселерометра 1 та горизонтальних акселерометрів 2, 3 відповідно.

Далі у БЦОМ 5 на основі сигналів f_z^* , f_x^* , f_y^* та вихідного сигналу вимірювача 4 висоти обчислюються значення прискорення [3,4].

Висновки.

Таким чином, проведені вдосконалення комплексу стабілізації дозволили вирішити поставлену задачу компенсації похибок вимірювання прискорення сили вертикального акселерометра та горизонтальних акселерометрів за рахунок блоку нейронної мережі.

Література:

1. Безвесільна О.М. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів/ О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, С.С. Ткаченко //Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 174 с.
2. Безвесільна О.М. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів/ О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, С.С. Ткаченко //Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 174 с
3. Безвесільна О.М. Штучні нейронні мережі при вирішенні задач технологічної підготовки гнучкого виробництва: монографія / О.М. Безвесільна, І.Ю. Черепанська, А.Ю. Сазонов – КПІ ім. Ігоря Сікорського ДП



НВЦ «Пріоритети, 2017. – 230 с.

4. Безвесільна О.М. Вимірювання лінійних прискорень на основі штучної нейронної мережі/ О.М. Безвесільна, М.Д. Кошовий // Вісник Інженерної академії України. – №3-4, 2012р. – С. 80-84.

Abstract. *The paper considers the compensation of errors in measuring the acceleration of the vertical accelerometer and horizontal accelerometers by introducing into the complex a bloc of calculations using neural networks.*

Key words: *accelerometer, navigation system, acceleration, error.*

Статья отправлена: 24.09.2020 г.

© Безвесільна О.М.

© Киричук Ю.В.



УДК 622.279.5

**MODERN RESEARCH STATUS AND RESULTS ANALYSIS OF
CONDENSATE RECOVERY ENHANCEMENT**
**АНАЛІЗ СТАНУ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІЗ ПРОБЛЕМ
ПІДВИЩЕННЯ КОНДЕНСАТОВИЛУЧЕННЯ**

Burachok O.V. / Бурачок О.В.

ORCID: 0000-0001-9935-3970

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
Karpatska str., 15, Ivano-Frankivsk, 76019 Ukraine**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019 Україна*

Анотація. Виконано аналіз стану та результатів наукових досліджень із проблем конденсатовилучення з родовищ вуглеводнів на різних стадіях їх розробки. Проаналізовано напрямки досліджень проблем підвищення конденсатовилучення, що проводяться в Україні. Розглянуто основні технології підвищення конденсатовилучення, а саме нагнітання: сухого газу, азоту, вуглекислого газу, вуглеводневих розчинників, поперемінне води і газу, хімічних агентів. Виконано порівняння ефективності між різними методами. Узагальнено результати та подано рекомендації щодо використання того чи іншого методу.

Ключові слова: підвищення конденсатовилучення, результати досліджень, нагнітання газу, азот, вуглекислий газ, розчинники, хімічні агенти, луи, ПАР, полімери.

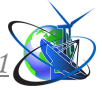
Вступ.

Нафтогазова галузь України має одну з найстаріших історій у світі. Максимальних видобутків досягнуто по нафті з конденсатом у 1972 р. – 14,4 млн. т, по газу у 1975 р. – 68,7 млрд. м³. Від того часу, відбувається природне падіння, за якого на кінець 2018 року, виснаженість ресурсної бази України по газу становила 80,5% а більшість видобутку природного газу по АТ «Укргазвидобування» надходить з родовищ із виснаженістю більше 75%, пов'язаних із традиційними колекторами, при чому, 80% видобутку забезпечують 23 родовища, або 18% тих, що перебувають на балансі товариства [1]. Зважаючи на необхідність енергонезалежності та енергозабезпечення України газом, надзвичайно важливим є оптимізація систем розробки існуючих виснажених родовищ, в тому числі за рахунок впровадження вторинних методів підвищення вуглеводневилучення [2, 3].

Основні напрямки досліджень в Україні.

В Україні, дослідженням газоконденсатних родовищ, займалися в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (ІФНТУНГ) професори Р.М. Кондрат, О.Р. Кондрат, В.М. Дорошенко, Д.О. Єгер, Ю.О. Зарубін та в інституті УкрНДІгазу – Є.С. Бікман і І.М. Фик. Виконано значний обсяг науково-дослідних робіт на фізичних моделях пласта по дослідженню можливостей застосування в якості робочих агентів води, водогазових сумішей, об'ємів водних розчинів ПАР, вуглеводневих розчинників. Дослідники запропонували наступні технології [4–10]:

- Заводнення за тиску, що дорівнює або близький до тиску початку конденсації;



- Заводнення за тиску, що відповідає тиску конденсації з газу важких фракцій вуглеводневого конденсату і гідрофобізації ними поверхні порових каналів;
- Заводнення за тиску максимальної конденсації вуглеводневої суміші;
- Заводнення за тиску, за якого густина і в'язкість випавшого конденсату мінімальна;
- Підтримання пластового тиску нагнітанням об'ємівки вуглеводневого розчинника із подальшим нагнітанням води чи водогазової суміші;
- Підтриманням пластового тиску нагнітанням об'ємівок водних розчинів ПАР чи піни з подальшим нагнітанням води чи водогазових сумішей [10];
- Для різко неоднорідних колекторів, поєднання заводнення (у високопроникні) із сайклінг-процесом (сухий газ у низькопроникні).

Незважаючи на отримані позитивні результати від лабораторних експериментів, їх неможливо однозначно узагальнити і перенести на реальні геологічні об'єкти, оскільки при оцінці ефективності технологій не враховано економічні показники та геолого-технологічні ризики пов'язані із промисловим впровадженням.

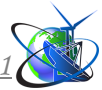
У випадку неможливості запровадження підтримання пластового тиску, основні напрямки по збільшенню вуглеводневилучення спрямовані на максимально можливе зниження пластового тиску за рахунок зменшення тиску на вході в установку комплексної підготовки газу (УКПГ) за допомогою дотискувальних компресорних станцій (ДКС), що призводить до пониження робочих гирлових тисків. Наприклад, така технологія запропонована для горизонту ВД-13 Залужанського газоконденсатного родовища та інших покладів на родовищах ГПУ „Львівгазвидобування” [11].

Іншими напрямками підвищення кінцевих коефіцієнтів газовилучення є комплексний вплив на привибійну зону свердловин скерованими методами, з метою зміни напрямку фільтраційних потоків і дозалучення слабодренуваних зон [3].

Нагнітання сухого газу (сайклінг-процес).

Проблемами дорозробки виснажених газових та газоконденсатних родовищ [12, 13], дослідженням та проектуванням сайклінг-процесів на родовища України [14-17] активно займався і продовжує займатися Бікман Є.С. Для покладів із активним водонапірним режимом, доцільно закачувати в свердловини приконтактної та приконтурної зони поблизу ГНК або ГВК суміш сухого газу і азоту. На родовищах України підтримання пластового тиску здійснювалося на п'яти об'єктах. Сайклінг-процес реалізовувався на покладах Т-1 Куличихінського родовища, Т-1 Тимофіївського родовища, С-5 Котелевського родовища. На Березівському родовищі здійснювався внутрішньо-свердловинний перепуск газу із горизонту В-16 з низьким потенційним вмістом у горизонт С-5 із високим вмістом. На покладі К-30 Новотроїцького родовища процес сайклінгу завершено і розробка родовища продовжується на виснаження.

Ліо та ін. [18] виконали експерименти з випаровування жирного та парафінистого конденсату на установці з довгим керном та у бомбі PVT.



Дослідження на PVT бомбі показали, що сухий газ може ефективно випаровувати не тільки проміжні, але й важкі C_{20+} компоненти. Експерименти на довгому взірці керну забезпечують високі коефіцієнти вилучення, коли витіснення здійснюється за тисків вищих, за тиск початку конденсації, ніж за умови, коли тиски є нижчими за точку роси. Видобуток конденсату отриманий на керні є вищим, ніж у PVT-бомбі за тих самих об'ємів нагнітання газу, що на нашу думку може бути пов'язано з тривалістю процесу витіснення та постійним випаровуванням і конденсацією на фронті витіснення, чого не відбувається у бомбі PVT.

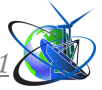
Нагнітання вуглеводневих розчинників (збагачених газів).

На пошуковому порталі www.onepetro.org наявна велика кількість статей і досліджень присвячених проблемам:

- витіснення нафти вуглеводневими (різної комбінацією збагачених газів) і неуглеводневими (в основному, вуглекислий газ і азот) розчинниками;
- випаровування та конденсації на фронті витіснення;
- визначення і розрахунок умов часткового і повного змішування вуглеводнів, а саме у випадку одно-контактного та багато-контактного змішування з допомогою кореляційних емпіричних рівнянь, третинних діаграм, рівнянь стану фазової рівноваги;
- лабораторних досліджень з визначення умов змішування з допомогою бульбашкового апарату (rising bubble experiment), установок із тонких трубок (slim tube apparatus), у бомбі PVT;
- гідродинамічному композиційному чисельному моделюванню.

Через велику кількість робіт, наведемо лише одну оглядову статтю [19], в якій, на думку автора, найкраще розглянуто різні методи досліджень змішувального витіснення з допомогою нагнітання газів. У всіх випадках, ці дослідження стосувалися нафтових покладів, компонентний склад яких суттєво відрізняється від випавшого конденсату, але загальні процеси випаровування та конденсації на контакті з розчинником, та умови досягнення повного змішування із утворенням однієї однорідної фази, звичайно характерні для усіх вуглеводневих систем.

У колишньому Радянському Союзі питаннями використання рідких вуглеводнів для підвищення нафтоконденсатовіддачі пластів займалися Вяхірев, Тер-Саркісов, Закіров та ін. [20-25]. Нагнітання газу, збагаченого компонентами етан-бутанових фракцій дозволяє збільшити об'єм випавшого конденсату за рахунок розчинення в ньому збагаченого газу, що призводить до зростання коефіцієнта насичення і перехід його у рухомий стан, коли він досягне критичного значення. Проведені лабораторні дослідження та промисловий досвід засвідчують доцільність створення облямівки розчинника в розмірі від 3% до 12% об'єму пор, в залежності від ступеня неоднорідності колектора, при чому ефективність використання вуглеводневих розчинників для газоконденсатних сумішей є більш ефективною у порівнянні з нафтою, оскільки витіснення вже починається на меншій пройденій фронті віддалі де насичення рідкою фазою на початок витіснення були нижче за критичне.



Bedrykovetsky [26] застосовував одновимірний аналітичний та напів-аналітичний підхід із вразуванням PVT-фазових перетворень і змішуваності, до розрахунку пілотного впровадження нагнітання LPG у поклади Вуктильського газоконденсатного родовища (Тімано-Печорськ, Росія) з метою витіснення ретроградного конденсату. Під час першого пілотного нагнітання, 26 тис. т об'ємівки LPG закачано у св. 103 із проштовпуванням сухим газом. Через 2 місяці конденсатний вал досяг перших двох видобувних свердловин, що позначилось зростанням конденсатного фактору з 43 г/м³ до 65 г/м³ та зростанням густини конденсату з 0695 г/м³ до 0.715 г/м³. Другий конденсатний вал надійшов до свердловин через 5-6 місяців від початку нагнітання. Цього разу вміст конденсату був нижчий, але сам по собі він був важчий. Видобуток додаткового конденсату склав 1 тис. т. На основі цих результатів проведено розрахунок ефективності нагнітання LPG за різних умов і об'ємів об'ємівки, одна для усіх варіантів додатковий видобуток конденсату не перевищував 20%. У другому пілотному проекті, здійснювалося нагнітання сухого газу у виснажену ділянку покладу через 3 нагнітальні свердловини. Протягом двох років було закачано 695 млн. м³ сухого газу, що забезпечило видобуток 237 тис. т LPG та 54 тис. т конденсату. Додатковий видобуток конденсату, спостерігався протягом тривалого часу після проривання газу нагнітання, за рахунок випаровування, що значно перевищує видобуток за розробки на виснаження.

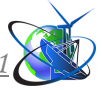
Нагнітання азоту.

Проблемами застосування азоту активно і фундаментально займалися в ІФНТУНГ, зокрема Кондрат Р.М., Кондрат О.Р., Хайдарова Л.І. З використанням композиційного симулятора GEM компанії CMG досліджено коефіцієнт газовилучення від нагнітання азоту в гіпотетичний однорідний газовий поклад квадратної та кругової форми для різних умов, ступеня виснаження на початок нагнітання, тривалості нагнітання азоту, площового розміщення свердловин та різних відстаней між батареями видобувних і нагнітальних свердловин, вплив темпу законтурного нагнітання азоту, вплив циклічності нагнітання азоту, ефективності роботи і зупинки видобувних свердловин та ін. [27-34].

Розрахунки показали високу ефективність від застосування азоту, із кінцевими коефіцієнтами газовилучення до 95%. Нажаль, у розглянутих роботах не наведено компонентний склад пластового газу, а відповідно, не оцінено витіснення випавшого конденсату і його додатковий видобуток за рахунок нагнітання азоту. Також розрахунки зупинялися за максимального вмісту азоту у продукції в 5%, що обґрунтовано максимальним вмістом у товарному газі, хоча за рахунок встановлення додаткового устаткування з відділення азоту від газу, можна було досягти значно вищих кінцевих коефіцієнтів газовилучення із заощадженням коштів на регенерацію азоту [35].

Серед основних переваг використання азоту можна виділити [27]:

- легкодоступність та дешевизну отримання за допомогою стаціонарних чи мобільних криогенних, мембранних або адсорбційних установок;
- низьку корозійну активність.



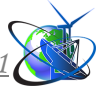
Серед потенційних недоліків азоту є значне підвищення тиску насичення пластової суміші [36], відповідно досягти першоконтактного змішування, тобто змішування, що настає за будь якої доданої мольної частки азоту, технологічно і технічно неможливо, оскільки ці тиски становлять порядку 80 МПа і вище. Через це може відбуватися більша конденсація вуглеводнів у рідку фазу через зростання тиску початку конденсації, особливо в зоні контакту газоконденсатної суміші і азоту. З іншого боку, для газоконденсатних із дуже високим потенційним вмістом, це може призводити до потенційного досягнення критичних насичень по сконденсованій фазі, що дозволить її фільтрацію і витіснення тим самим азотом.

Азот може забезпечувати підтримання пластового тиску, запобігаючи випадінню конденсату. Недоліком може бути те, що конденсація відбуватиметься не тільки у зоні змішування на фронті витіснення між азотом та конденсатом, але й у обійдених зонах, на границях шарів із різними проникностями. 4-компонентний синтетичний пластовий флюїд використовувався у простій симуляційній моделі з двома шарами із різними проникностями. Багатоконтактне змішування має місце тільки далеко від границь шарів, там де відсутній перетік. Перетік між шарами спричиняє значне змішування, що призводить до значного випадіння конденсату (до 50%) за фронтом витіснення. У випадку, коли високо-проникний шар розміщено під низько-проникним, досягаються високі рівні видобутку за рахунок гравітації. У протилежному випадку, відбувається швидке проривання азоту [37].

Нагнітання вуглекислого газу.

Використання CO_2 набуло широкого використання для підвищення нафтовилучення, особливо у США, однак його використання для витіснення конденсату мало в основному чисто науковий характер. Увага до вуглекислого газу повернулася у зв'язку із зобов'язаннями країн, щодо зменшення викидів і необхідністю його захоронення починаючи від Кіотського протоколу 1992 р. і підписанням у 2015 р. під егідою Об'єднаних націй Паризької угоди [38].

Al-Hashami та ін. [39] провели дослідження на основі концептуальної гідродинамічної моделі, особливо звертаючи увагу на дифузію CO_2 , його розчинність у воді, ступінь виснаження родовища коли оптимально розпочинати нагнітання та об'єми нагнітання. У дослідженні виконано базовий економічний аналіз результатів. Додатковий видобуток газу склав 11%, а от економічна ефективність дуже сильно залежить від ціни на газ, вартість CO_2 та компонентного складу пластового газу. Дифузія є важливим чинником при змішуванні CO_2 з пластовим газом, однак у випадку, якщо вона нижче $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, її вплив мінімальний та може бути проігнорований. Розчинність вуглекислого газу у пластовій воді стримує момент проривання CO_2 , а його нагнітання на пізній стадії розробки після суттєвого виснаження і падіння пластового тиску призводить до вищої економічної ефективності та додаткового видобутку газу. Необхідно зауважити, що результати суттєво залежать від компонентного складу пластового газу, і оскільки в роботі він не наведений, неможливо зробити висновок, наскільки нагнітання CO_2 збільшило конденсатовіддачу.



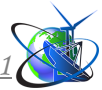
Дослідження щодо використання CO_2 для збільшення видобутку конденсату виконав Gachuz-Mugo із співавторами [40]. Вони здійснили лабораторні експерименти з витіснення конденсату з тріщинуватого колектора за високих тисків і температур. Згідно отриманих результатів, нагнітання вуглекислого газу не показало суттєвої відмінності в порівнянні з розробкою на виснаження, а найефективнішим було нагнітання сухого газу.

Soroush та ін. [41] виконали концептуальне моделювання для похилозяляючого газоконденсатного покладу із шаровою неоднорідністю з метою порівняння ефективності нагнітання чистого CO_2 і та водогазової дії з використанням CO_2 у випадках нагнітання вгору та вниз по нашаруванню. Нагнітання вниз по нашаруванню показало однакові результати як для чистого CO_2 так і поперемінного нагнітання CO_2 і води, забезпечуючи видобуток 81% рідких вуглеводнів, в той час нагнітання вгору лише 60%.

Uchenna [42] дослідив вплив нагнітання CO_2 на видобуток конденсату використовуючи загальнодоступні модель покладу PUNQ-S3 та компонентний склад [43]. Ним проаналізовано два варіанти: підтримка тиску нагнітанням вуглекислого газу від початку розробки, та із затримкою після 4-х років розробки на виснаження. Постійне нагнітання CO_2 від початку позначилося на підвищених рівнях видобутку CO_2 , що між тим мало позитивний вплив на винесення конденсату з привибіної зони свердловин, забезпечуючи вищі дебіти та кінцеве конденсатовилучення 70%. Другий варіант був більш ефективним і забезпечив видобуток газу 89% і на 4% менше конденсату ніж перший, однак значно вище NPV згідно вірогіднісного розподілу.

Shtepani [44] переглянув можливість захоронення CO_2 у виснажених газових і газоконденсатних покладах, вказуючи на те, що нагнітання CO_2 може підвищити вуглеводневилучення за рахунок випаровування та підтримання тиску. Крім того, існують додаткові сприятливі фактори використання CO_2 , такі як, вища густина за пластових умов у порівнянні з газоконденсатом буде сприяти його міграції вниз; вища в'язкість гарантуватиме, що витіснення конденсату буде кращим у порівнянні з вуглеводневими газами через краще співвідношення рухливостей. Дослідження на керні показали, що вже за трьох закачаних порових об'ємів значна кількість конденсату може бути витіснена і видобута.

Лабораторні дослідження з витіснення конденсату на взірцях керну за умови неусталеної фільтрації з допомогою надкритичного вуглекислого газу та його суміші з метаном за різних концентрацій показали, що використання чистого вуглекислого газу призводить до меншого впливу капілярних ефектів та кращого співвідношення рухливостей, і відповідно пізнішого проривання газу із витісненням 79% відсотків конденсату за 0,62 закачаних порових об'ємів до моменту проривання, в той час як нагнітання метану призводить до проривання за 0,27 порових об'ємів та 45% видобутку конденсату [45]. Використання сумішей вуглекислого газу і метану є неефективним у порівнянні із чистими компонентами, оскільки вони не дозволяють отримати високих кінцевих коефіцієнтів вилучення, який фактично лінійно залежить від концентрації CO_2 у газі нагнітання.



Поперемінне нагнітання води і газу.

Основна перевага поперемінного нагнітання води і газу (WAG – water-alternating-gas) базується на кращому витісненні вуглеводнів за рахунок збільшення коефіцієнта охоплення, через більш рівномірне просування контуру.

Так, Cullick і Jones [46, 47] здійснили чисельне моделювання на 2D та 3D моделях забезпечуючи додатковий видобуток конденсату від 28 до 54% в залежності від конкретних умов чисельного експерименту. Враховуючи, що вони не використовували гістерезис відносних фазових проникностей, і тільки відносні фазові для дренавання, результати розрахунків є занадто оптимістичними.

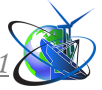
Soroush та ін. [41] також з допомогою чисельного моделювання досліджували витіснення конденсату з допомогою поперемінного нагнітання CO₂ і води у склепінну частину моделі уявного покладу із значними кутами падіння за умови наявності та відсутності змішування. Як і очікувалося, за умови змішування кінцевий коефіцієнт вилучення конденсату становив 79,2% проти 65,4% коли змішування не відбувалося.

Нагнітання хімічних витіснювальних речовин.

Однією з найбільш повних і фундаментальних робіт із застосування основних хімічних методів підвищення нафтовилучення, а саме лугів, ПАР, полімерів та їх комбінацій, є монографія опублікована James J. Sheng у 2011 р. [48]. В ній детально розкрито вплив усіх факторів, що впливають на ефективність кожного методу, включаючи адсорбцію, дифузію, вміст солей, іонний обмін, рухливості та реологія флюїдів, міжфазний натяг і фазові перетворення, мікроемульсії та ін. Через складний багатофакторний характер фізико-хімічної взаємодії між агентами та пластовими флюїдами, агентами/флюїдами і породами, існує ряд обмежень, щодо можливості використання того чи іншого хімічного методу підвищення вуглеводневилучення. Їх первинний аналіз виконав J. Taber [49], а підсумував та узагальнив S. Attas [50].

В ІФНТУНГ дослідженнями з застосування ПАР до витіснення конденсату займався Кондрат О.Р. [10, 51-52]. На лабораторній установці із насипним керном досліджено вплив різних типів ПАР із різними концентраціями на коефіцієнт конденсатовилучення за різного початкового насичення. Результати показали, що в залежності від фізико-літологічних властивостей пористого середовища, коефіцієнта початкового насичення конденсатом, типу ПАР і тривалості його нагнітання, отриманий коефіцієнт конденсатовилучення становить від 65 до 85%. Оптимальним є використання 0,05% розчину суміші нейоногенного ПАР савенолу SWP і аніонного Карпатола УМ-2, а от додавання 0,03% полімеру AN-125 має негативний вплив, знижуючи коефіцієнт конденсатовитіснення на 4,3%.

Burachok і Kondrat [53] на основі чисельного моделювання умовного покладу, максимально-наближеного до умов газоконденсатних родовищ Дніпровсько-Донецької западини, провели дослідження оптимізації нагнітання ПАР, лугів, полімерів та їх поєднання за умови наявності геологічних



невизначеностей. Через недостатню приймальність нагнітальних свердловин, виснаження домінувало над нагнітанням, через це розраховані економічні показники (NPV) виявилися практично однакові для всіх методів. Найвищі додаткові видобутки конденсату забезпечили нагнітання лугів з ПАР і ПАР з полімерами. Через значний вплив геологічних невизначеностей рекомендовано виконати порівняння методів на одній геологічній реалізації моделі покладу.

Порівняння ефективності різних методів вторинного видобутку конденсату.

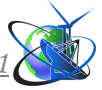
Лабораторні дослідження з порівняння різних методів вилучення конденсату, а саме нагнітання, N_2 , CO_2 та сухого газу в газоконденсатний флюїд одного з родовищ Середнього сходу виконали Kumar та ін. [54]. Експерименти з випаровування показали, що нагнітання CO_2 призводить до значного зменшення кількості випавшої рідини у бомбі PVT. Вже сконденсовані вуглеводні випарувалися, збільшивши кількість C_{5+} у газовій фазі. Нагнітання азоту в малих об'ємах призводить до збільшення сконденсованих у рідку фазу вуглеводнів, однак тривале нагнітання азоту зменшує випадіння за рахунок збільшення тиску у системі. Нагнітання сухого газу зменшує кількість випавшої рідини за будь яких доданих концентрацій. Нагнітання CO_2 набагато ефективніше за N_2 та має подібну до сухого газу ефективність. Нагнітання азоту не є привабливим для умов конкретного родовища, оскільки воно розпочинається після того як пластовий тиск зменшився на 8,2 МПа у порівнянні з тиском початку конденсації. Якщо б, пластовий тиск був вищим за тиск насичення, використання азоту було б доцільним.

Kossack і Opdal [55] оцінили вплив розміру об'ємівки сухого газу із наступним прощтовхуванням азотом на видобуток конденсату з покладу за різного ступеня неоднорідності. Малий розмір об'ємівки (5–10% порового об'єму) не перешкоджає змішуванню азоту з конденсатом, однак додатковий видобуток у порівнянні з витісненням чистим азотом, компенсує це, роблячи процес нагнітання об'ємівки економічно доцільним. Вертикальна неоднорідність, коли вертикальна проникність є меншою за горизонтальну, що характерно для глибокозалягаючих зцементованих колекторів, робить витіснення більш сприятливим ніж за однорідних умов.

Siregart та ін. [56] виконали порівняльне дослідження між азотом і метаном, що нагнітався в одновимірну композиційну симуляційну модель, насичену 4-компонентним синтетичним флюїдом із високим ступенем конденсації до 30%. Нагнітання метану є більш сприятливим через кращу здатність випаровувати рідкі вуглеводні, меншу дисперсію та меншу кількість сконденсованих вуглеводнів. Дуже цікавий в одночасно дивний факт, те що даний флюїд має майже однаковий мінімальний тиск змішування за $100^\circ C$ як для метану 34,1 МПа так і азоту 34,5 МПа. За високих чисел Пекле (6000–15000), звичних для умов реальних родовищ, дисперсія досить мала і нагнітання азоту є гарною альтернативою метану.

Висновки.

Розглянуто та проаналізовано результати досліджень методів підвищення конденсатовилучення. Дослідниками застосовувалися різні підходи до



вивчення конденсатовилучення: аналітичні, лабораторні на бомбах PVT та фізичних моделях керна, чисельні з допомогою гідродинамічного моделювання (переважна більшість). У більшості випадків використовувалися моделі класичної форми однорідні або шарово-неоднорідні прямокутної форми одно-, дво- і тривимірні. Серед науковців не існує одностайної думки щодо доцільності та часу впровадження того чи іншого методу вторинного видобутку. Однак більшість з них сходиться до думки, що використання сухого газу є оптимальним незалежно від ступеня виснаження газоконденсатного родовища. Проте, через необхідність блокування великих об'ємів товарного газу на час реалізації проекту, азот стає перспективною альтернативою. В той же час, він має ряд недоліків, таких як збільшення тиску початку конденсації і відповідно кількості випавшої рідкої фази на контакті з пластовим газом, а тому його використання рекомендовано за пластових тисків, вищих за тиск початку конденсації. Іншою альтернативою є вуглекислий газ, адекватність використання якого стає все більш актуальною, зважаючи на зобов'язання України по зменшенню викидів згідно Кіотського протоколу (вставити посилання на протокол). Його висока витісна здатність за рахунок низького тиску багато-контактного змішування, сприятлива рухливість через вищу в порівнянні з вуглеводневими газами в'язкість та висока розчинність у воді, нажаль компенсуються високою кородійною активністю, що потребує використання спеціального антикородійного свердловинного обладнання, а у випадку старих родовищ, може призводити до високих геологічних ризиків. Додаткової уваги заслуговують хімічні методи дії на пласт, однак наразі не існує прикладів їх промислового впровадження.

Література:

1. Фірман, М. Стан та перспективи нагромадження ресурсної бази найбільшої газовидобувної компанії України // Шоста міжнародна науково-практична конференція «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». м. Трускавець, 7-11 жовтня 2019 р.
2. Дорошенко, В.М. Основні напрями вдосконалення систем розробки родовищ та потенціал нагромадження видобутку нафти в Україні / В.М. Дорошенко, Ю.О. Зарубін, В.П. Гришаненко [та ін.] // Нафтогазова галузь України. – К., 2013, № 2, 27–30.
3. Єгер, Д.О. Підвищення ефективності направлених методів інтенсифікації видобутку нафти і газу. – Л.: Ліга-Прес, 2003. – 160 с.
4. Кондрат, Р.М. Комплексна технологія збільшення вуглеводневилучення з виснажених газоконденсатних родовищ / Кондрат Р.М., Кондрат О.Р. // Наука та інновації, 2005, Т. 1 №5, С. 24-29.
5. Кондрат, Р.М. Енергоощадні технології видобутку залишкових запасів вуглеводнів з частково виснажених родовищ природніх газів / Кондрат Р.М., Єгер Д.О., Смолівик Л.В. // Матеріали 2 наук.-техн. Конф. – Львів, 1997. – С. 58.
6. Кондрат, Р. М. Проблеми видобування залишкових вуглеводнів з виснажених газових і газоконденсатних родовищ // Розвідка та розробка



нафтових і газових родовищ, 2001, № 1, 71-74.

7. Дорошенко, В. М. Напрямки вирішення проблем розробки виснажених родовищ нафти і газу / В. М. Дорошенко, Д. О. Єгер, Ю. О. Зарубін, Р. М. Кондрат // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ, 2007, № 4, 108-110.

8. Кондрат, Р. М. Проблеми та шляхи видобутку залишкових вуглеводнів з виснажених газоконденсатних покладів / Р. М. Кондрат, О.Р. Кондрат, Л.М. Середницький, А.В. Кучернюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ, 2007, № 2(23), 5-14.

9. Кондрат, О. Р. Підвищення ефективності дорозробки виснажених газоконденсатних родовищ // Геотехнічна механіка, 2015, №122.

10. Кондрат, О. Р. Лабораторні дослідження підвищення вуглеводневилучення з виснажених газоконденсатних родовищ // Ж-л “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”, 2015, № 3(56), 72-76.

11. Кондрат, О. Р. Збільшення поточного видобутку газу і кінцевого газовилучення з виснажених родовищ природних газів / О. Р. Кондрат, Р. М. Кондрат // Нафтогазова енергетика 2017: тези доп.; міжнар. наук.-техн. конф., м. Ів.-Франківськ, 15-19 трав. – Івано-Франківськ: Голіней О. М., 2017, С. 55-56.

12. Кривуля, С. В. Проблеми та перспективи дорозробки Шебелинського ГКР / С.В. Кривуля, Є.С. Бікман, Ю.Л. Фесенко, А.П. Вахрив, В.В. Соболев, О.М. Щирба // Нафтогазова енергетика 2017: тези доп.; міжнар. наук.-техн. конф., м. Ів.-Франківськ, 15-19 трав. – Івано-Франківськ: Голіней О. М., 2017, С. 85-87.

13. Нестеренко, О.Г. Перспективи впровадження малогабаритних ДКС (МДКС) з метою стабілізації видобутку газу з родовищ України / О.Г. Нестеренко, Є.С. Бікман, С.В. Кривуля, П.Є. Жарков // Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2015, №1 (39), 2-6.

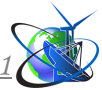
14. Бікман, Є. С. Оптимізація сайклінг-процесу в умовах розробки фаменських покладів Тимофіївського та Куличихинського НГКР // Нафтогазова енергетика 2017: тези доп.; міжнар. наук.-техн. конф., м. Ів.-Франківськ, 15-19 трав. – Івано-Франківськ: Голіней О. М., 2017, 89-93.

15. Бікман, Є. С. Стратегія розробки газоконденсатних родовищ України з використанням азоту для підтримання пластового тиску / Є. С. Бікман, С. В. Кривуля, О.В. Ляшенко, І. І. Хомин, О. Г. Нестеренко, Я. С. Яремійчук // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2011, №3 (25), 15-18.

16. Бікман, Є.С. Технологія збагачення газу азотом при сайклінг-процесі на Тимофіївському та Куличихинському НГКР з одночасним виробництвом метанольного продукту / Є.С. Бікман, С.О. Єгоров, К.С. Курочкин // Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2014, №1 (35), 2-6.

17. Бікман, Є.С. Оптимізація систем розробки газоконденсатних родовищ України з високим вмістом вуглеводнів C_{5+} в пластовому газі / Є.С. Бікман, В.В. Дячук // Проблеми нафтогазової промисловості: зб. наук. праць. – Київ, 2006, Вип. 3, 165–168.

18. Luo, K., Li, S., Zheng, X., Chen, G., Dai, Z., Liu, N. Experimental Investigation into Revaporization of Retrograde Condensate by Lean Gas Injection.



SPE paper 68683 was prepared for presentation at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition held in Jakarta, Indonesia, 17-19 April 2001.

19. Shtepani, E., Thomas, F.B., Bennion, D.B. New Approach in Gas Injection Miscible Processes Modelling in Compositional Simulation. Journal of Canadian Petroleum Technology, August 2006, Vol. 45, No. 8, pp. 35-40. PETSOC-06-08-01.

20. Вяхирев Р. И., Гриценко А. И., Тер-Саркисов Р. М. Разработка и эксплуатация газовых месторождений. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 880 с.: ил.

21. Тер-Саркисов, Р. М. Новая концепция воздействия на газоконденсатную залежь // Газовая промышленность, 1997, № 6, С. 16-18.

22. Гриценко, А. И. Закачка жидких углеводородов в пласт для повышения нефтеконденсатоотдачи / А. И. Гриценко, Р. М. Тер-Саркисов, О. В. Клапчук [и др.] // Обз. инф.: сер. Разраб. и экспл. газ. и газоконденс. месторожд. – М.: ВНИИЭгазпром, 1980, Вып. 6. – 39 с.

23. Закиров, С. Н. Повышение конденсатоотдачи пласта / С. Н. Закиров, Б. А. Алиев // Обз. инф.: сер. Разраб. и экспл. газ. и газоконденс. месторожд. – М.: ВНИИЭгазпром, 1985, Вып. 4. – 46 с.

24. Тер-Саркисов, Р. М. Гидродинамическое моделирование активных методов разработки газоконденсатных месторождений / Тер-Саркисов Р.М., Николаев В.А., Яковенко А.В. // Нефтегазовое дело, 2015, т.13, №2, С. 68-73.

25. Тер-Саркисов, Р.М. Разработка месторождений природных газов. – М.: ОАО «Издательство «Недра»», 1999. – 659 с.: ил. ISBN 5-247-03833-9.

26. Bedrikovetsky, P. Enhanced Gas-Condensate Recovery in Complex Reservoirs: Pilots and Models. SPE paper 39056 was prepared for presentation at the Fifth Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition held in Rio de Janeiro, Brazil, 30 August – 3 September 1997.

27. Кондрат, Р.М., Хайдарова, Л.І. Застосування азоту для підвищення газовилучення з виснажених газових покладів // Ж-л “Нафтогазова енергетика”, 2018, № 2(30), 7-16.

28. Кондрат, Р.М., Хайдарова, Л.І. Дослідження процесу витіснення залишкового природного газу азотом із виснаженого газового родовища за різної тривалості періоду нагнітання азоту в пласт // Ж-л “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”, 2016, № 1(58), 60-67.

29. Кондрат, Р.М., Хайдарова, Л.І. Дослідження впливу тиску початку нагнітання азоту у виснажене газове родовище на характеристики процесу вилучення залишкового природного газу // Ж-л “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”, 2016, № 2(59), 51-57.

30. Кондрат, Р.М., Хайдарова, Л.І. Вплив циклічності нагнітання азоту з різним темпом у виснажений газовий поклад на кінцевий коефіцієнт газовилучення // Ж-л “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”, 2018, № 4(69), 15-22.

31. Кондрат, Р.М., Хайдарова, Л.І. Вплив темпу законтурного нагнітання азоту у виснажений газовий поклад кругової форми на коефіцієнт вилучення залишкового газу // Ж-л “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”, 2018, № 2(67), 70-74.



32. Кондрат, Р.М., Хайдарова, Л.І. Вплив систем площевого розміщення видобувних і нагнітальних свердловин при нагнітанні азоту у виснажений газовий поклад на коефіцієнт газовилучення // Ж-л “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”, 2019, № 1(70), 33-40.

33. Кондрат, Р.М., Хайдарова, Л.І. Вплив розміщення видобувних свердловин на коефіцієнт газовилучення при периферійному нагнітанні азоту у виснажений газовий поклад кругової форми // Ж-л “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”, 2017, № 4(65), 34-39.

34. Кондрат, Р.М. Видобування залишкового природного газу з виснажених газових покладів нагнітанням азоту / Кондрат, О.Р., Хайдарова, Л.І. // Ж-л “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”, 2019, № 2(71), 20-29.

35. <https://www.engineering-airliquide.com/ru/ustanovka-po-udalenyu-azota>

36. Saenger, P., Hagoort, J. Recovery of Gas Condensate by Nitrogen Injection Compared With Methane Injection. SPE Journal, March 1998, 26-33. SPE 30795.

37. Saenger, P.J., Bjornstad, H.K., Hagoort, J. Nitrogen Injection Into Stratified Gas-Condensate Reservoirs. SPE paper 28941 prepared for the presentation at the SPE 69th Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, LA, U.S.A., 25-28 September 1994.

38. UNFCCC Paris Agreement, 2015.

https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

39. Al-Hashami A., Ren S.R., Tohidi B. CO₂ Injection for Enhanced Gas Recovery and Geo-Storage: Reservoir Simulation and Economics. SPE paper 94129 prepared for the presentation at the SPE Europec/EAGE Annual Conference held in Madrid, Spain, 13-16 June 2005.

40. Gachuz-Muro, H., Gonzalez-Valtierra, B., Luna-Rojero, E., Aguilar-Lopez, B., Pineda-Munoz, A. Laboratory tests with CO₂, N₂ and lean natural gas in naturally fractured gas-condensate reservoir under HP/HT conditions. SPE paper 142855 prepared for presentation at the Enhanced Oil Recovery Conference held in Kuala Lumpur, Malaysia, 19-21 July 2011.

41. Soroush, M., Hoier, L., Kleppe, J. CO₂ injection and CO₂ WAG in Dipping Gas Condensate and Oil Reservoirs. SPE paper 154062 was prepared for presentation at the Eighteenth SPE Improved Oil Recovery Symposium held in Tulsa, Oklahoma, USA, 14-18 April 2012.

42. Uchenna, O. Analysis and Potential of CO₂ Huff-n-Puff for Near Wellbore Condensate Removal and Enhanced Gas Recovery. SPE paper 160917 prepared for presentation at the SPE International Student Paper Contest at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio, Texas, USA, 8-10 October 2012.

43. Whitson, C.H. and Kuntadi, A. Khuff Gas Condensate Development. ITPC paper 10692 prepared for presentation at the International Petroleum Technology Conference held in Doha, Qatar, 21-23 November 2005.

44. Shtepani, E. CO₂ sequestration in Depleted Gas/Condensate Reservoirs. SPE paper 102284 was prepared for presentation at the 2006 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio, Texas, U.S.A., 24-27 September 2006.



45. Al-Abri, A., Sidiq, H., Amir, R. Enhanced Natural Gas and Condensate Recovery by Injection of Pure SCO₂, Pure CH₄ and Their Mixtures: Experimental Investigation. SPE paper 124145 was prepared for presentation at the 2009 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, Louisiana, USA, 4-7 October 2009.

46. Jones, L.G., Cullick, A.S., Cohen, M.F. WAG Process Promises Improved Recovery in Cycling Gas Condensate Reservoirs: Part 1 – Prototype Reservoir Simulation Studies. SPE paper 19113 was prepared for presentation at the SPE Gas Technology Symposium held in Dallas, Texas, 7-9 June 1989.

47. Cullick, A.S., Lu, H.S., Jones, L.G., Cohen, M.F., Watson, J.P. WAG May Improve Gas-Condensate Recovery. SPE Reservoir Engineering Journal, August 1993, pp. 207-213.

48. Sheng, J. J. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice. Burlington, MA, USA: Elsevier Inc., 2011

49. Taber, J.J., Martin, F.D., Seright, R.S. EOR Screening Criteria Revisited – Part 2: Applications and Impact of Oil Prices. SPE Reservoir Engineering, August 1997. Pp. 199-205. SPE 39234.

50. Al Attas, S. Safe Execution of a World Class EGR Facility in Abu Dhabi – The Elixir Mirfa Project. IPTC paper 17627 was prepared for presentation at the International Petroleum Technology Conference held in Doha, Qatar, 20-22 January 2014.

51. Кондрат О. Р. Експериментальні дослідження витіснення сконденсованих вуглеводнів з газоконденсатних родовищ розчинами ПАР / О. Р. Кондрат // Нафтова і газова промисловість, 2000, № 1, 34-38.

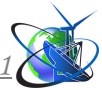
52. Рудий С. М. Використання карпатола для дії на продуктивні пласти нафтових і газоконденсатних свердловин / С. М. Рудий, М. І. Рудий, О. Р. Кондрат // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ, 2014, № 2(51), 156-164.

53. Burachok, O. and Kondrat, O. [2019]. Optimization of Gas-condensate Reservoir EOR Technology under Geological Uncertainties, EAGE IOR 2019 – 20th European Symposium on Improved Oil Recovery, 8-11 April 2019, Pau, France, Tu P14. (<https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900130>).

54. Kumar, A., Gohary, M.E., Pedersen, K.S., Azeem, J. Gas Injection as an Enhanced Recovery Technique for Gas Condensates. A comparison of three Injection Gases. SPE paper 177778 was prepared for presentation at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference held in Abu Dhabi, UAE, 9-12 November 2015.

55. Kossack, C.A., Opdal, S.T. Recovery of Condensate From a Heterogeneous Reservoir by the Injection of a Slug of Methane Followed by Nitrogen. SPE paper 18265 was prepared for presentation at the 63rd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in Houston, TX, October, 1988.

56. Siregar, S., Hagoort, J., Ronde, H. Nitrogen Injection vs. Gas Cycling in Rich Retrograde Condensate-Gas Reservoirs. SPE paper 22360 was prepared for presentation at the SPE International Meeting on Petroleum Engineering held in



Beijing, China, 24-27 March 1992.

References:

1. Firman, M. Stan ta perspektyvy naroschuvannia resursnoii bazy naibilshoi gazovydobuvnoi kompanii Ukrainy // Shosta mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsia «Nadrokorystuvannia v Ukraini. Perspektyvy investuvannia». m. Truskavets, 7-11 zhovtnia 2019 r.
2. Doroshenko, V.M. Osnovni napriamy vdoshkonalennia system rozrobky rodovysch ta potentsial naroschuvannia vydobutku nafty v Ukraini / V.M. Doroshenko, Yu.O. Zarubin, V.P. Gryshanenko [ta in.] // Naftogazova galuz Ukrainy. – K., 2013, № 2, 27–30.
3. Yeger, D.O. Pidvyschennia efektyvnosti napravlenykh metodiv intensyfikatsii vydobutku nafty i gazu. – L.: Liga-Pres, 2003. – 160 s.
4. Kondrat, R.M. Kompleksna tekhnologia zbilshennia vuglevodnevyvluchennia z vysnazhenykh gazokondensatnykh rodovysch / Kondrat R.M., Kondrat O.R. // Nauka ta innovatsii, 2005, T. 1 №5, s. 24-29.
5. Kondrat, R.M. Energooschadni tekhnologii vydobutku zalyshkovykh zapasiv vuglevodniv z chastkovo vysnazhenykh rodovysch pryrodnykh gaziv / Kondrat R.M., Yeger D.O., Smolovyk L.V. // Materialy 2 nauk.-tekhn. konf. – Lviv, 1997. – s. 58.
6. Kondrat, R. M. Problemy vydobuvannia zalyshkovykh vuglevodniv z vysnazhenykh gazovykh i gazokondensatnykh rodovysch // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch, 2001, № 1, 71-74.
7. Doroshenko, V. M. Napriamky vyrishennia problem rozrobky vysnazhenykh rodovysch nafty i gazu / V. M. Doroshenko, D. O. Yeger, Yu. O. Zarubin, R. M. Kondrat // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch, 2007, № 4, 108-110.
8. Kondrat, R. M. Problemy ta shliakhy vydobutku zalyshkovykh vuglevodniv z vysnazhenykh gazokondensatnykh pokladiv / R.M. Kondrat, O.R. Kondrat, L.M. Serednytskyi, A.V. Kucherniuk // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch, 2007, № 2(23), 5-14.
9. Kondrat, O. R. Pidvyschennia efektyvnosti dorozrobky vysnazhenykh gazokondensatnykh rodovysch // Geotekhnichna mekhanika, 2015, №122.
10. Kondrat, O. R. Laboratorni doslidzhennia pidvyschennia vuglevodnevyvluchennia z vysnazhenykh gazokondensatnykh rodovysch // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch, 2015, № 3(56), 72-76.
11. Kondrat, O. R. Zbilshennia potochного vydobutku gazu i kintseвого gazovyluchennia z vysnazhenykh rodovysch pryrodnykh gaziv / O. R. Kondrat, R. M. Kondrat // Naftogazova energetyka 2017: tezy dop.; mizhnar. nauk.-tekhn. konf., m. Iv.-Frankivsk, 15-19 trav. – Ivano-Frankivsk: Goliney O. M., 2017, s. 55-56.
12. Kryvulia, S. V. Problemy ta perspektyvy dorozrobky Shebelynskogo GKR / S.V. Kryvulia, Ye.S. Bikman, Yu.L. Fesenko, A.P. Vakhriv, V.V. Sobol, O.M. Schyrba // Naftogazova energetyka 2017: tezy dop.; mizhnar. nauk.-tekhn. konf., m. Iv.-Frankivsk, 15-19 trav. – Ivano-Frankivsk: Goliney O. M., 2017, s. 85-87.
13. Nesterenko, O.G. Perspektyvy vprovadzhennia malogabarytnykh DKS (MDKS) z metoyu stabilizatsii vydobutku gazu z rodovysch Ukrainy / O.G. Nesterenko, Ye.S. Bikman, S.V. Kryvulia, P.Ye. Zharkov // Kompresornoie i energeticheskoe mashynostroenie, 2015, №1 (39), 2-6.
14. Bikman, Ye. S. Optyimizatsia saikling-protseu v umovakh rozrobky famenskykh porladiv Tymofiivskogo ta Kulychykhyskogo NGKR // Naftogazova energetyka 2017: tezy dop.; mizhnar. nauk.-tekhn. konf., m. Iv.-Frankivsk, 15-19 trav. – Ivano-Frankivsk: Goliney O. M., 2017, 2017, 89-93.
15. Bikman, Ye. S. Strategia rozrobky gazokondensatnykh rodovysch Ukrainy z vykorystanniam azotu dlia pidtrymannia plastovogo tysku / Ye. S. Bikman, C. B. Кривуля, O.V. Liashenko, I. I. Khomyn, O. G. Nesterenko, Ya. S. Yaremiychuk // Kompresornoie i energeticheskoe mashynostroenie, 2011, №3 (25), 15-18.
16. Bikman, Ye.S. Tekhnologia zbagachennia gazu azotom pry saikling-protseu na Tymofiivskomu ta Kulychykhyskomu NGKR z odnochasnym vyrobnytstvom metanolnogo



- produktu / Ye.S. Bikman, S.O. Yegorov, K.S. Kurochkin // *Kompresornoe i energeticheskoe mashynostroenie*, 2014, №1 (35), 2-6.
17. Bikman, Ye.S. Optymizatsia system rozrobky gazokondensatnykh rodovysch Ukrainy z vysokym vmistom vuglevodniv C_{5+} v plastovomu gazi / Ye.S. Bikman, V.V. Diachuk // *Problemy naftogazovoi promyslovosti: zb. nauk. prats.* – Kyiv, 2006, Vyp. 3, 165–168.
18. Luo, K., Li, S., Zheng, X., Chen, G., Dai, Z., Liu, N. Experimental Investigation into Revaporization of Retrograde Condensate by Lean Gas Injection. SPE paper 68683 was prepared for presentation at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition held in Jakarta, Indonesia, 17-19 April 2001.
19. Shtepani, E., Thomas, F.B., Bennion, D.B. New Approach in Gas Injection Miscible Processes Modelling in Compositional Simulation. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, August 2006, Vol. 45, No. 8, pp. 35-40. PETSOC-06-08-01.
20. Viakhirev R. I., Gritsenko A. I., Ter-Sarkisov R. M. Razrabotka i ekspluatatsia gazovykh mestorozhdeniy. – M.: OOO «Nedra-Biznestsentr», 2002. – 880 s.: il.
21. Ter-Sarkisov, R. M. Novaia kontseptsia vozdeistvia na gazokondensatnyu zalezh // *Gazovaia promyshlannost*, 1997, № 6, 16-18.
22. Gritsenko, A. I. Zakachka zhydkikh uglevodorodov v plast dlia povyshenia neftekondensatootdachi / A. I. Gritsenko, R. M. Ter-Sarkisov, O. V. Klapchuk [i dr.] // *Obz. inf.: ser. Razrab. i ekspl. gaz. i gazokondens. mestorozhd.* – M.: VNIIEgazprom, 1980, Vyp. 6. – 39 s.
23. Zakirov, S. N. Повышение конденсатоотдачи пласта / S. N. Zakirov, B. A. Aliev // *Obz. inf.: ser. Razrab. i ekspl. gaz. i gazokondens. mestorozhd.* – M.: VNIIEgazprom, 1985, Vyp. 4. – 46 s.
24. Ter-Sarkisov, R. M. Gidrodinamicheskoe modelirovanie aktivnykh metodov razrabotki gazokondensatnykh mestorozhdeniy / Ter-Sarkisov R.M., Nikolaev V.A., Yakovenko A.V. // *Neftegazovoe delo*, 2015, t.13, №2, 68-73.
25. Ter-Sarkisov, R.M. Razrabotka mestorozhdeniy prirodnnykh gazov. – M.: OAO «Izdatelstvo «Nedra»», 1999. – 659 s.: il. ISBN 5-247-03833-9.
26. Bedrikovetsky, P. Enhanced Gas-Condensate Recovery in Complex Reservoirs: Pilots and Models. SPE paper 39056 was prepared for presentation at the Fifth Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition held in Rio de Janeiro, Brazil, 30 August – 3 September 1997.
27. Kondrat, R.M., Khaidarova, L.I. Zastosuvannia azotu dlia pidvyschannia gazovyluchennia z vysnazhenykh gazovykh pokladiv // *Naftogazova energetyka*, 2018, № 2(30), 7-16.
28. Kondrat, R.M., Khaidarova, L.I. Doslidzhennia protsesu vytisnennia zalyshkovogo pryrodnogo gazu azotom iz vysnazhenogo gazovogo rodovyscha za riznoi tryvalosti period nagnitannia azotu v plast // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*, 2016, № 1(58), 60-67.
29. Kondrat, R.M., Khaidarova, L.I. Doslidzhennia vplyvu tysku pochatku nagnitannia azotu u vysnazhene gazove rodovysche na kharakterystyky protsesu vyluchennia zalyshkovogo pryrodnogo gazu // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*, 2016, № 2(59), 51-57.
30. Kondrat, R.M., Khaidarova, L.I. Vplyv tsyklichnosti nagnitannia azotu z riznym tempom u vysnazhenyi gazovyi poklad na kintsevyi koefitsient gazovyluchennia // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*, 2018, № 4(69), 15-22.
31. Kondrat, R.M., Khaidarova, L.I. Vplyv tempu zakonturnogo nagnitannia azotu u vysnazhenyi gazovyi poklad krugovoi formy na koefitsient vyluchennia zalyshkovogo gazu // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*, 2018, № 2(67), 70-74.
32. Kondrat, R.M., Khaidarova, L.I. Vplyv system ploschovogo rozmischennia vydobuvnykh i nagnitalnykh sverdlodyn pry nagnitanni azotu u vysnazhenyi gazovyi poklad na koefitsient gazovyluchennia // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*, 2019, № 1(70), 33-40.
33. Kondrat, R.M., Khaidarova, L.I. Vplyv rozmischennia vydobuvnykh sverdlodyn na koefitsient gazovyluchennia pry pereferijnomu nagnitannia azotu u vysnazhenyi gazovyi poklad krugovoi formy // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*, 2017, № 4(65), 34-39.



34. Kondrat, R.M. Vydobuvannia zalyshkovogo pryrodnogo gazu z vysnazhenykh gazovykh pokladiv nagnitanniam azotu / Kondrat, O.R., Khaidarova, L.I. // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch, 2019, № 2(71), 20-29.
35. <https://www.engineering-airliquide.com/ru/ustanovka-po-udaleniyu-azota>
36. Saenger, P., Hagoort, J. Recovery of Gas Condensate by Nitrogen Injection Compared With Methane Injection. SPE Journal, March 1998, 26-33. SPE 30795.
37. Saenger, P.J., Bjornstad, H.K., Hagoort, J. Nitrogen Injection Into Stratified Gas-Condensate Reservoirs. SPE paper 28941 prepared for the presentation at the SPE 69th Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, LA, U.S.A., 25-28 September 1994.
38. UNFCCC Paris Agreement, 2015.
https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
39. Al-Hashami A., Ren S.R., Tohidi B. CO₂ Injection for Enhanced Gas Recovery and Geo-Storage: Reservoir Simulation and Economics. SPE paper 94129 prepared for the presentation at the SPE Europepec/EAGE Annual Conference held in Madrid, Spain, 13-16 June 2005.
40. Gachuz-Muro, H., Gonzalez-Valtierra, B., Luna-Rojero, E., Aguilar-Lopez, B., Pineda-Munoz, A. Laboratory tests with CO₂, N₂ and lean natural gas in naturally fractured gas-condensate reservoir under HP/HT conditions. SPE paper 142855 prepared for presentation at the Enhanced Oil Recovery Conference held in Kuala Lumpur, Malaysia, 19-21 July 2011.
41. Soroush, M., Hoier, L., Kleppe, J. CO₂ injection and CO₂ WAG in Dipping Gas Condensate and Oil Reservoirs. SPE paper 154062 was prepared for presentation at the Eighteenth SPE Improved Oil Recovery Symposium held in Tulsa, Oklahoma, USA, 14-18 April 2012.
42. Uchenna, O. Analysis and Potential of CO₂ Huff-n-Puff for Near Wellbore Condensate Removal and Enhanced Gas Recovery. SPE paper 160917 prepared for presentation at the SPE International Student Paper Contest at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio, Texas, USA, 8-10 October 2012.
43. Whitson, C.H. and Kuntadi, A. Khuff Gas Condensate Development. IPTC paper 10692 prepared for presentation at the International Petroleum Technology Conference held in Doha, Qatar, 21-23 November 2005.
44. Shtepani, E. CO₂ sequestration in Depleted Gas/Condensate Reservoirs. SPE paper 102284 was prepared for presentation at the 2006 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio, Texas, U.S.A., 24-27 September 2006.
45. Al-Abri, A., Sidiq, H., Amir, R. Enhanced Natural Gas and Condensate Recovery by Injection of Pure SCO₂, Pure CH₄ and Their Mixtures: Experimental Investigation. SPE paper 124145 was prepared for presentation at the 2009 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, Louisiana, USA, 4-7 October 2009.
46. Jones, L.G., Cullick, A.S., Cohen, M.F. WAG Process Promises Improved Recovery in Cycling Gas Condensate Reservoirs: Part 1 – Prototype Reservoir Simulation Studies. SPE paper 19113 was prepared for presentation at the SPE Gas Technology Symposium held in Dallas, Texas, 7-9 June 1989.
47. Cullick, A.S., Lu, H.S., Jones, L.G., Cohen, M.F., Watson, J.P. WAG May Improve Gas-Condensate Recovery. SPE Reservoir Engineering Journal, August 1993, pp. 207-213.
48. Sheng, J. J. . Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice. Burlington, MA, USA: Elsevier Inc., 2011
49. Taber, J.J., Martin, F.D., Seright, R.S. EOR Screening Criteria Revisited – Part 2: Applications and Impact of Oil Prices. SPE Reservoir Engineering, August 1997. Pp. 199-205. SPE 39234.
50. Al Attas, S. Safe Execution of a World Class EGR Facility in Abu Dhabi – The Elixir Mirfa Project. IPTC paper 17627 was prepared for presentation at the International Petroleum Technology Conference held in Doha, Qatar, 20-22 January 2014.
51. Kondrat O. R. Eksperymentalni doslidzhennia vytisnennia skondensovanykh vuglevodniv z gazokondensatnykh rodovysch rozchynamy PAR // Naftova I gazova promyslovist, 2000, № 1, 34-38.



52. Rudyi S. M. Vykorystannia karpatolu dlia diji na produktyvni plasty naftovykh i gazokondensatnykh sverdlovyn / S. M. Rudyi, M. I. Rudyi, O. R. Kondrat // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch, 2014, № 2(51), 156-164.

53. Burachok, O. and Kondrat, O. [2019]. Optimization of Gas-condensate Reservoir EOR Technology under Geological Uncertainties, EAGE IOR 2019 – 20th European Symposium on Improved Oil Recovery, 8-11 April 2019, Pau, France, Tu P14. (<https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900130>).

54. Kumar, A., Gohary, M.E., Pedersen, K.S., Azeem, J. Gas Injection as an Enhanced Recovery Technique for Gas Condensates. A comparison of three Injection Gases. SPE paper 177778 was prepared for presentation at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference held in Abu Dhabi, UAE, 9-12 November 2015.

55. Kossack, C.A., Opdal, S.T. Recovery of Condensate From a Heterogeneous Reservoir by the Injection of a Slug of Methane Followed by Nitrogen. SPE paper 18265 was prepared for presentation at the 63rd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in Houston, TX, October, 1988.

56. Siregar, S., Hagoort, J., Ronde, H. Nitrogen Injection vs. Gas Cycling in Rich Retrograde Condensate-Gas Reservoirs. SPE paper 22360 was prepared for presentation at the SPE International Meeting on Petroleum Engineering held in Beijing, China, 24-27 March 1992.

Abstract. *Ukrainian oil and gas industry is one of the oldest in the world. Majority of the fields are depleted and on the final stage of the development, therefore secondary hydrocarbon recovery methods are of a great importance. Detailed review of the current status and results of published research on enhanced condensate recovery was performed including the research performed in Ukraine. The reviewed methods included:*

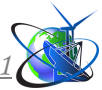
- *dry gas injection (gas-cycling);*
- *hydrocarbon solvents injection (rich gases);*
- *nitrogen;*
- *carbon dioxide;*
- *water-alternating-gas (WAG);*
- *chemical agents – alkali, surfactants, polymers.*

Comparison of the different methods efficiency was performed including recommendations for methods selection and applicability.

Keywords: *enhanced condensate recovery, research results, gas injection, nitrogen, carbon dioxide, solvents, chemical agents, alkali, surfactants, polymers, WAG.*

Статья надіслана: 05.08.2020 р.

© Бурачок О.В.



УДК 621.311.001.57

**ANALYSIS OF ASYMMETRIC MODES IN ELECTRICAL NETWORKS
WITH VOLTAGE UP TO 1 kV****АНАЛІЗ АСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ
НАПРУГОЮ ДО 1 кВ****Iegorov O. / Єгоров О.Б.***s.t.s., as. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0003-2599-1624

*O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
17 Marshal Bazhanov St., 61002 Kharkiv, Ukraine**Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, 61002 Харків, Україна***Kundenko M. / Кунденко М.П.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-5841-4367

Iegorova O. / Єгорова О.Ю.*s.t.s., as. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-8593-1557

*Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture,
44 Alchevskih St., 61052 Kharkiv, Ukraine**Харківський національний технічний університет сільського господарства
ім. Петра Василенка, вул. Алчевських 44, 61052 м. Харків, Україна*

Abstract. The urgency of the problem of improving the quality and reducing electricity losses is especially increasing in electrical networks with voltage up to 1 kV, due to the fact that in electrical networks the general mode of operation is not symmetrical. The method of reducing the asymmetry and losses of 0.38 / 0.22 kV electric networks with two lines in the ring is considered. The dependences of the sequences of direct and reverse voltage during summer days in a closed network are determined.

Keywords: closed circuit, power, voltage, energy loss, voltage drop, voltage asymmetry.

Introduction.

Voltage unbalance is characterized by the presence in a three-phase electrical network voltage negative or zero sequences, much smaller than the corresponding direct voltage components (main) sequence. Unbalance of three-phase voltage system arises as a result of the imposition of a direct my system voltage sequence is sequence, which leads to a change to the absolute values of phase and phase-to-phase stresses.

Numerous studies of operating modes of closed networks and, in particular, lines with bi-directional power supply have revealed a number of significant advantages of such power supply schemes [1]. For asymmetrically loaded rural lines of 0.38 / 0.22 kV, the most important are the reduction in the amount of power and energy losses due to phase-by-phase equalization of currents on the line sections after their closure, a decrease under otherwise equal conditions of the magnitude of losses and voltage deviations, as well as the asymmetry of the currents in comparison with similar characteristics for ring-closed radial lines [2, 3].

Materials and methods.

It is easy to show that the decrease in power losses when two lines are closed in



a ring can be expressed as follows:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_1^3 \left\{ 2I \left[R_1 \sum_{k=1}^n i_k - R_{n+2} i_{n+1} - R_{m+1} \sum_{k=(n+1)}^m i_k - I_{yp}^2 \sum_{k=1}^{m+1} R_k \right] \right\} \quad (1)$$

I - equalizing current at closing of lines,

R_k - resistance of the k -th section of the line,

i_k - current load at the k -th point of connection.

In square brackets, expressions (1) are the values of the active components of the voltage drops in the lines. Since the power factor of the load in rural networks is high and for most of the wires used $\frac{r}{x} < 1$ (for example, for AC-16 $r_0 \approx 5x_0$), then, without significant error in the further analysis, the active components of voltage drops can be replaced by their full values.

Then

$$I = \frac{\Delta U_I - \Delta U_{II}}{Z_{\Sigma}} = \frac{\delta U}{Z_{\Sigma}}, \quad (2)$$

where

δU - is the difference in the voltage drops from the supply centers I and II at the point where the lines are closed,

Z_{Σ} - total resistance of the mains.

Thus, expression (1) can be represented in the form:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_1^3 2 \frac{(\delta U)^2}{Z_{\Sigma}} \frac{R_{\Sigma}}{Z_{\Sigma}}. \quad (3)$$

Just as the quantities ΔU_I , ΔU_{II} , δU are random variables and can vary from $\Delta U_{\min}$ to $\Delta U_{\max}$ both sides (I or II).

For the case $\Delta U_{I \max} = \Delta U_{II \max}$, the probability δU can be found from the expression:

$$p(\delta U) = 1 - \left(1 - \frac{\delta U}{\Delta U_{\max}} \right)^2, \quad (4)$$

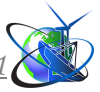
and the probability distribution density, respectively:

$$f(\delta U) = \frac{2}{\Delta U_{\max}} \left(1 - \frac{\delta U}{\Delta U_{\max}} \right). \quad (5)$$

The voltage distribution function for δU is shown in Fig. 1.

Expected value δU :

$$\begin{aligned} M(\delta U) &= \int_0^{\Delta U_{\max}} \frac{2}{\Delta U_{\max}} \left(1 - \frac{\delta U}{\Delta U_{\max}} \right) \delta U d(\delta U) = \\ &= \frac{1}{3} \Delta U_{\max}. \end{aligned} \quad (6)$$



Consequently, the expected reduction in electrical energy losses for the year can be obtained from:

$$\Delta A = \int_1^3 \frac{(m(\delta U))^2}{Z_\Sigma} \left(2 - \frac{R_\Sigma}{Z_\Sigma}\right) \tau = \int_1^3 \frac{(\Delta U_{\max})^2}{9Z_\Sigma} \left(2 - \frac{R_\Sigma}{Z_\Sigma}\right) \tau \quad (7)$$

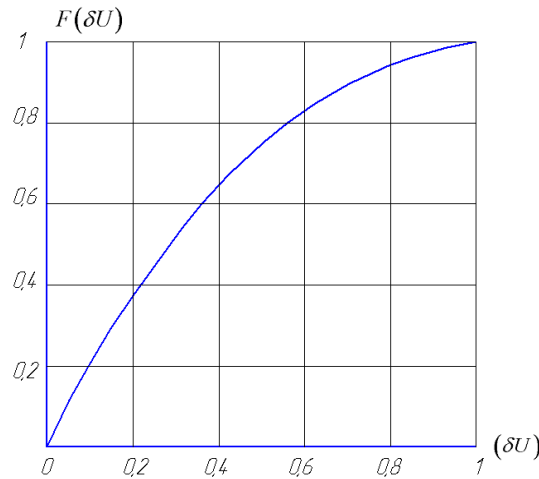


Fig. 1. The voltage distribution function for

Reducing the asymmetry of voltages along the lines, as a rule, is accompanied by equalization of the phase voltages on the sections of the line when the network is closed. The resulting asymmetry will be random, since in each of the closed lines the quantities and phases of the symmetrical components of the currents and voltages are also random [4].

The probability of the resulting voltage of the inverse (zero) sequence can be determined from the expression:

$$F(U_2) = p(U_2) = \frac{U_2^2}{U_{2\max}^2} \quad (8)$$

The mathematical expectation of the voltage of the inverse (zero) sequence is:

$$M(U_2) = \int_0^{U_{2\max}} 2 \frac{U_2^2}{U_{2\max}^2} dU_2 = \frac{2}{3} U_{2\max} \quad (9)$$

From the expression obtained, it can be seen that the value of the mathematical expectation of the voltage of the reverse (zero) sequence in the network closing mode is 33% less than the maximum value observed in the closed radial lines.

An experimental verification of the effect of reducing the asymmetry in the closure of lines was carried out in electric networks of the Kharkov region (Ukraine).

The trunk lines with branches with power and lighting loads alternately operated by radial and closed circuits. Over the course of a day, the values of phase and linear voltages at the beginning and middle of the lines, as well as at the point of their closure, were measured.

After each measurement cycle in the radial mode, the lines were connected to a ring at a specially equipped station and the measurements were repeated. This provided data in both modes at almost the same time. The experiment was carried out



repeatedly; the results of measurements were processed by methods of mathematical statistics. In Fig. 3 and Fig. 4 shows the changes in the strains of the forward and reverse sequences during the summer days.

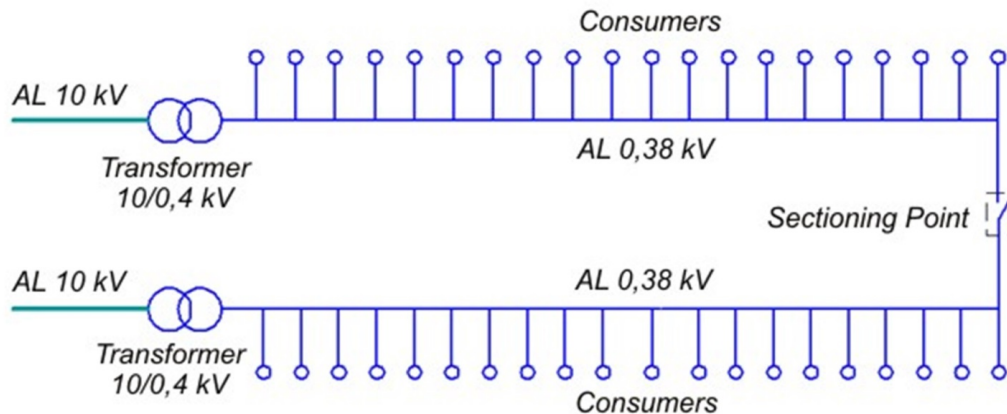


Fig. 2 0.38 / 0.22 kV network with a partitioning point

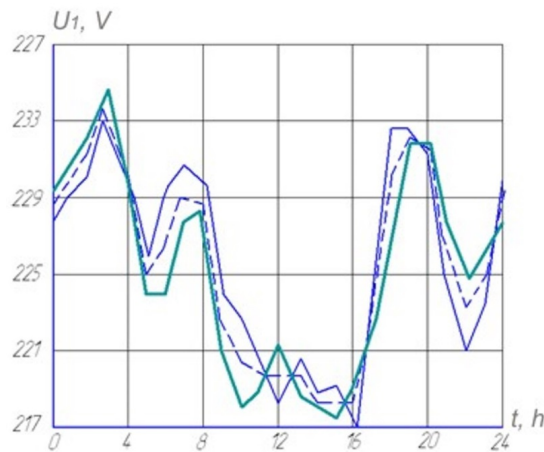


Fig. 3. Voltages of direct sequences over summer days

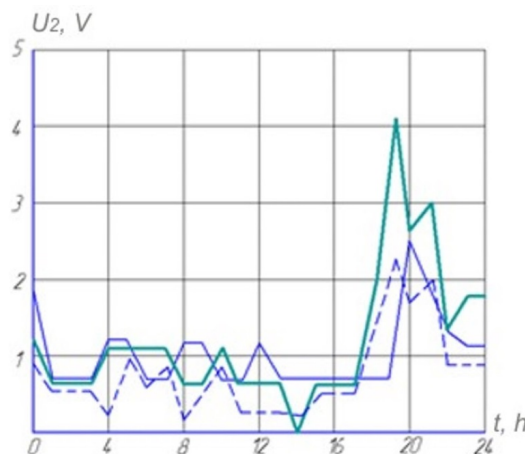


Fig. 4. Voltages of the reverse sequence during the summer days

In order to check the obtained theoretical relationships for estimating the effect of symmetry when closing the network, a histogram was plotted on the basis of the experimental data (Figure 5) for the ratio of the negative sequence voltage at the line connection point in the closed-circuit mode to the largest value of the negative sequence voltage that occurred in one of the two closed lines before their connection



[5].

The probability distribution function $U_2/U_{2\max}$ for the ratios is shown in Fig. 6. The dependencies for the zero sequence voltage have a similar nature. As you can see, the experimental and theoretical dependences are close.

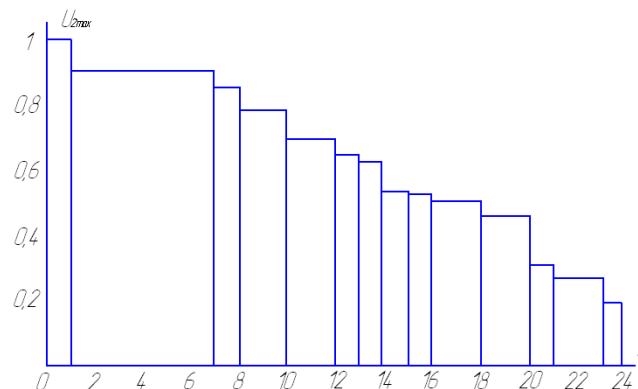
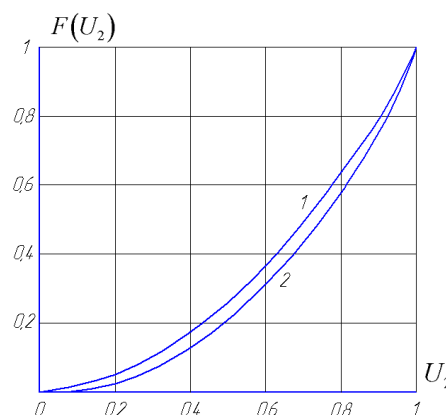


Fig. 5. The histogram of the negative sequence voltage relations in the line connection point in the closed-circuit mode to the largest value of the negative sequence voltage that occurred in one of the two closed lines prior to their connection



**Fig. 6. The probability distribution function of the relations $U_2/U_{2\max}$
1 - experimental; 2 – theoretical**

Conclusions.

For research of asymmetric modes of electrical networks the most effective and the method of mathematical and physical simulation, which makes it possible to study a wide range of tasks with high precision. Thus, the development of calculation method asymmetric modes in power supply systems voltage up to 1 kV, economic damage due to exposure asymmetry, solving problems of energy saving and improving the quality of electrical energy in electrical networks up to 1kV is an important task in electric power industry. When switching to closed-circuit mode, one can expect a decrease in voltage asymmetry by 33% relative to the highest observed in radial lines connected to the ring.

References:

1. Tsitsiashvili G., Osipova M. Queueing models with different schemes of



customers transformations // Proc. Int. Conf. “Mathematical Methods for Increasing Efficiency of Information Telecommunication Networks” (BWWQT – 2007), Queues: flows, systems, networks, 19, Grodno, 2007, Pp. 243–246.

2. Єгоров О. Б. До питання розрахунку динамічних режимів електричної системи // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил – 2010. – №. 4. – с. 172-174.

3. Cheremisin M, Iegorov O. Improving the efficiency of managing the modes of distributive networks by automated monitoring the parameters of the mode and the environment in real time // Світлотехніка та електроенергетика. Міжнародний науково-технічний журнал, №1(54), 2019. С. 3-8

4. Sensarma P. S., Padiyar K. R., Ramanarayanan V. Analysis and performance evaluation of a distribution STATCOM for compensating voltage fluctuations // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2001. – V. 16. – №. 2. – С. 259-264. DOI: 10.1109/61.915492

5. Conrad L., Little K., Grigg C. Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips // IEEE Transactions on industry applications. – 1991. – V. 27. – №.1. – С. 167-172. DOI: 10.1109/28.67549

Анотація. Актуальність проблеми покращення якості та зменшення втрат електричної енергії особливо збільшується в електричних мережах напругою до 1 кВ, через те, що в електричних мережах загальний режим роботи не симетричний. Розглянуто спосіб зменшення асиметрії та втрат електричних мереж мережі 0,38 / 0,22 кВ з двома лініями в кільці. Визначені залежності послідовностей прямої та зворотної напруги протягом літніх днів у закритій мережі.

Ключеві слова: замкнутий контур, потужність, напруга, втрати енергії, падіння напруги, асиметрія напруги

Статья отправлена: 24.08.2020 г.

© Iegorov O.



УДК 628.544:622.271.45+622.278

INVESTIGATION OF THERMOCHEMICAL CONVERSION OF CARBON-CONTAINING WASTE**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОХІМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ ВУГЛЕМІСТКИХ ВІДХОДІВ**

Sklyarenko E.V. / Скляренко Є.В.

Ph.d. / к.т.н.

ORCID: 0000-0003-3952-6520

Vorobiov L.Y. / Воробйов Л.Й

d.s., s.s. / д.т.н., с.н.с.

ORCID: 0000-0001-7958-6996

SPIN: 6154-2069

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, M. Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv,
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. М. Капніст (Желябова), 2а, Київ*

Анотація. Розглянута можливість та доцільність утилізації відходів вугільного виробництва, які містять значну кількість органічних (горючих) речовин, та речовин, що забруднюють навколишнє середовище. Показано, що для досягнення поставленої цілі найбільш доцільно використовувати технології які базуються на основі термохімічного методу, зокрема, технології внутрішньовідвальної газифікації та двоступеневого спалювання. Отримані результати експериментальних досліджень утилізації вуглемістких відходів дозволили визначити основні їх технологічні показники, спосіб підведення і кількість необхідної теплової енергії теплоносія, для компенсації теплових витрат в процесі. Дослідження підтвердили ефективність технології щодо підвищення екологічної безпеки вугільного виробництва, за рахунок видалення сірчаних з'єднань та інших шкідливих речовин з їх відходів.

Ключові слова: вуглемісткі відходи вугільного виробництва, спалювання, піроліз, газифікація, шкідливі викиди.

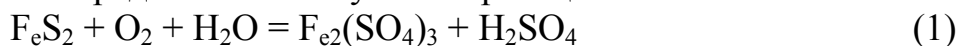
Вступ.

Теплоенергетика є важливою складовою світової економіки. Більша частина теплової і електричної енергії виробляється на базі органічних палив на електростанціях з тепловими двигунами різних термодинамічних циклів. В умовах дефіциту цих енергоресурсів і постійного зростання цін на них, задача підвищення ефективності їх використання і економії набуває найбільш пріоритетного значення.

Важливим фактором розвитку енергетики сьогодення є також екологічні проблеми, які виникають при використанні традиційних викопних палив. Зокрема, в Україні це викликано необхідністю широкого використання кам'яного вугілля, яке домінує в структурі її паливно-енергетичного комплексу (ПЕК). Ці екологічні проблеми виникають, як при видобуванні та збагаченні вугілля, так і при його спалюванні в теплоенергетичних установках, що робить теплоенергетику України одним з найбільших забруднювачів навколишнього середовища. На її долю припадає до 30% викидів шкідливих речовин, у тому числі до 59% SO₂, 25 – 27 % твердих частинок та 10 – 12 % NO_x [1]. Значну шкоду довкіллю наносять золошлакові відходи ТЕС, загальна кількість їх накопичення оцінюється в більш як 200 млн. т [2,3]. Крім того, електростанція яка працює на вугіллі, викидає в атмосферу більше радіоактивних речовин (радію, торію, полонію і ін.) ніж атомна станція такої ж потужності.



У вугільному виробництві більша частина шахтних відходів (порода) і відходів вуглезбагачення (шлами) скидається у відвали, терикони і шламонакопичувачі, захаращуючи і забруднюючи довкілля та порушуючи санітарні норми населених пунктів. Об'єми накопичення цих відходів становлять більше 1,3 млрд.т, з яких тільки біля 17% складає корисне використання (для ремонту доріг, виготовлення будівельних конструкцій і ін.), в тому числі всього 9% використовують для забутовки шахтних виробок [1]. З пилом і продуктами горіння териконів в атмосферу попадає значна кількість шкідливих речовин (вуглеводнів, оксидів сірки і азоту, парникових газів, важких металів і ін.). Особливо шкідливий екологічний вплив на довкілля мають різні з'єднання сірки. В період зберігання породи у відвалах і териконах відбувається поступове окислення сульфідних і органічних з'єднань сірки з утворенням водорозчинних сульфатних з'єднань і сірчаної кислоти. Наприклад, процес окислення сульфідів заліза чи інших екологічно шкідливих хімічних сірчаних з'єднань можна представити наступними реакціями:



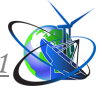
де М – Zn, Pb, Cu, Co, Ni

Під дією атмосферних впливів (сонця, вітру та опадів) відбувається поступове перенесення цих продуктів окислення та інших хімічних елементів зі складу породи, в повітря, ґрунти і ґрунтові води, що порушує санітарні норми і негативно впливає на флору, фауну та стан здоров'я людини.

Поряд з цим, сучасні методи добування і збагачення вугілля супроводжуються значними втратами палива з шахтною породою та з відходами вуглезбагачення. По орієнтовним розрахункам ці втрати складають до 10% на кожен тону рядового вугілля. Якщо ж прийняти середній вміст вуглецю в цих відходах на рівні 10 - 20% (в шламах збагачення коксівного вугілля може сягати і до 45%), то їх загальний енергетичний потенціал можна оцінити в більш як 260 млн.т у.п. Використання такого енергетичного потенціалу дозволяє, не тільки отримати додаткове джерело дешевого палива, але й суттєво підвищити екологічну безпеку вугільного виробництва. Тобто, наприклад, відходи вуглезбагачення можна характеризувати як низькосортне високозольне паливо, з наступними середніми показниками [4]:

1. Елементарний склад (в перерахунку на суху масу): зольність – 72,3%, сірка загальна–8,21%, вуглець–15,13%, водень–1,55%, кисень –2,42%, азот–0,39%.
2. Середня питома вага – 2,08 .
3. Насипна вага фракції 13 – 50 мм -1060 кг /м³,
4. Вихід відходів, з величиною часток до 50 мм складає 73,17%.
5. Нижча теплота згоряння на робочу масу відходів – 5945 кДж /кг.

На сьогодні ж цей потенціал, в силу ряду причин, практично є не задіяним. Перш за все, через низькокалорійність, високу вологість і зольність (60 ... 70% і вище), та широкий фракційний склад такого палива. По – друге – відсутність ефективних методів його використання для енергетичних цілей, оскільки їх спалювання в існуючих теплосилових установках супроводжується великим



механічним недопалом, низьким ККД, втратою потужності енергоблоку, значними витратами природного газу, чи іншого вуглеводневого палива на "під світку", для стабілізації процесу горіння. Крім того, наприклад, якщо для прямого спалювання цих відходів в шарових топках, їх попередньо доцільно піддати брикетуванню, то для спалювання в камерних топках їх необхідно перетворити в пил, що потребує спеціальних систем брикетування, пилоприготування, транспортування і відповідно значних капітальних витрат. При їх спалюванні в топках з киплячим шаром, виникають проблеми з стабілізацією процесу горіння і значним виносом дрібних часток, що також збільшує втрати з механічним недопалом та зменшує ККД енергетичного блоку. При використанні таких високозольних палив виникає ще одна складна проблема, це проблема транспорту і екологічно чистого захоронення значних об'ємів золи.

Суттєвою проблемою використання вугільних відходів в енергетиці є також, невідповідність місць їх накопичення місцевим теплоенергетичним потребам. Перевезення ж відходів високої зольності до місць споживання, є як економічною, так і екологічною проблемою.

Зважаючи на вище наведені екологічні проблеми вугільного виробництва і труднощі використання його відходів в енергетичних цілях, можна зробити висновок, що пошук ефективних шляхів їх утилізації є актуальною задачею сьогодення.

Основний матеріал.

Метою даної роботи є підвищення ефективності утилізації вуглемістких відходів вугільного виробництва.

Аналіз технологій утилізації низькосортних, з широким фракційним складом палив показав, що на даний час найбільш перспективними є енерготехнологічні методи комплексного їх використання. Так, на сьогоднішній день відомо ряд природоохоронних методів утилізації відходів вугільного виробництва, направлених як на захист довкілля, так і отримання корисної енергії з їх горючої частини та цінних продуктів з мінеральної частини.

Одним з таких методів є термохімічний метод попередньої переробки (конверсії) твердих вуглемістких відходів. Його змістом є сукупність високотемпературних тепло – технологічних процесів для фізико – хімічного перетворення органіки вихідного палива в нові газоподібні, рідкі чи тверді енергетичні продукти. Як наприклад, процес газифікації, де в ході деструктивних реакцій з вільним чи зв'язаним киснем, двооксидом вуглецю і водяною парою відбувається перетворення хімічної енергії відходів в енергію газоподібного палива. При цьому, під дією високих температур, відбувається знешкодження і ряду шкідливих компонентів відходів. Тобто, застосування термохімічного методу утилізації вуглемістких відходів дозволяє, не тільки підвищити екологічну безпеку вугільного виробництва, але й отримати додатковий енергетичний ресурс.

В Інституті технічної теплофізики НАНУ впродовж багатьох років проводяться роботи по створенню ефективних технологій спалювання різних



твердих вуглемістких палив з застосуванням даного термохімічного методу. Так, при фінансовій підтримці Європейської Комісії в межах проекту Copernicus II ENVIMAN, був проведений комплекс аналітичних і експериментальних робіт направлених на утилізацію відходів вугільного виробництва. Була розроблена технологія їх ефективного використання в енергетичних цілях. Її основні засади розглянуті в роботах [5,6]. Згідно розробленої технології, відходи вугільного виробництва, в місцях їх накопичення, піддаються термохімічній конверсії з утворенням генераторного газу, який може бути використаним на місці, чи транспортуватися до споживача на певні відстані. Принципова технологічна схема такої технології приведена на рис.1.

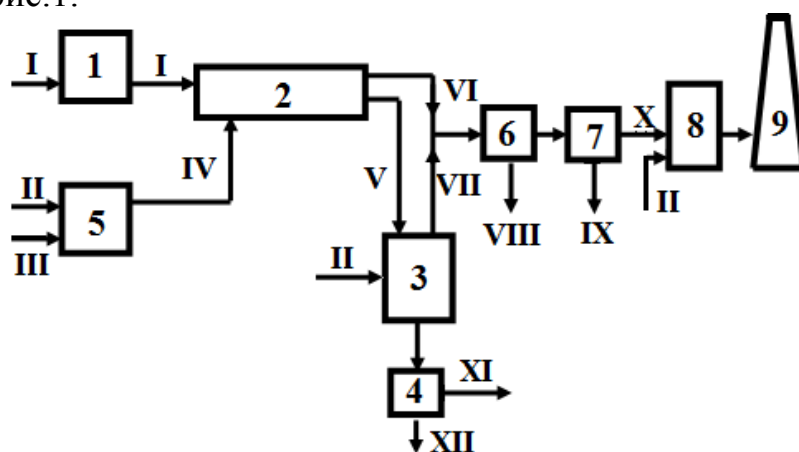


Рис.1. Технологічна схема реалізації термохімічного методу утилізації вуглемістких відходів вугільного виробництва.

1 – бункер відходів; 2 – піролізер; 3 – газогенератор; 4 – магнітний сепаратор; 5 – камера згоряння; 6 – циклон; 7 – апарат тонкої очистки; 8 – споживач генераторного газу; 9 – димова труба. I – паливо; II – повітря; III – вуглеводневий газ; IV – теплоносії; V – коксовий залишок; VI – піролізний газ; VII – продукти газифікації; VIII – грубий залишок; IX – мілко дисперсний залишок; X – очищений газ; XI – магнетит; XII – зола.

Згідно технології, відходи завантажуються в бункер 1. З нього вони подаються в піролізер 2, куди також, подається високотемпературний газовий теплоносії IV, утворений в спеціальній камері згоряння 5, шляхом неповного згоряння любого вуглеводневого газу III, в повітрі II. За рахунок теплоти теплоносія відбувається нагрівання відходів та їх деструкція на коксовий залишок V і піролізний газ VI. Коксовий залишок з температурою 650...800°C надходить в газогенератор 3, де при взаємодії з повітрям піддається газифікації. Продукти газифікації VII змішуються з піролізним газом VI і подаються в циклон 6 для грубої очистки, а потім в апарат тонкої очистки 7, де відбувається очистка газу від з'єднань сірки і тонке обезпилювання. Очищений горючий газ X надходить до споживача 8 (наприклад, котельня), де спалюється, а продукти його згоряння викидаються в атмосферу, через димову трубу 9. Мінеральна частина коксового залишку з газогенератора направляється в магнітний сепаратор 4, де відбувається його магнітне розділення на магнетит XI і золу XII.

Даний процес проходить в дві стадії: перша – високотемпературний відновлювальний піроліз органічної частини відходів, і друга – газифікація



кокового залишку. В основі піролізу лежить важлива особливість, яка притаманна усім твердим паливам, а саме те, що при нагріванні відбувається термічний розклад їх органічної маси з виділенням летких речовин.

Схематично процес піролізу органічної маси твердого палива можна представити рівнянням, де температурний фактор є одним з основних технологічних параметрів процесу, як для його початку і закінчення, так і для виходу та якості піролізних продуктів.

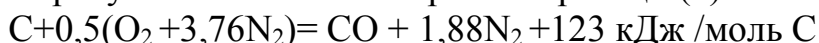


Продуктами піролізу є твердий коксовий залишок і конденсуючі (смоли та інші рідкі вуглеводневі сполуки) та неконденсуючі (CO , H_2 , CH_4 , CO_2 та ін.) леткі продукти. При цьому, розклад органічної частини палива супроводжується складною сукупністю окисно-відновлюваних хімічних реакцій і взаємодією летких між собою, зв'язаним киснем (CO_2 і H_2O) та вуглецем палива [7]:



Частина з приведених реакцій (4, 7, 9) є екзотермічними - в результаті їх проходження виділяється теплота, а частина (5, 6, 8) - є ендотермічними і для їх проходження необхідно підведення теплоти, від стороннього джерела.

В ході аналітичних досліджень розглянута можливість компенсації цих теплових витрат за рахунок теплоти екзотермічної реакції (4):



В наслідок реакції на 1 моль вуглецю утворюються газові продукти газифікації: 28 г CO + 52,7 г N_2 і виділяється 123 кДж / моль C теплової енергії. Якщо доля вуглецю в породі шахтних відходів становить $\psi_c = 0,2$ то загальна маса породи на 1 моль вуглецю буде становити

$$m_m = \mu_c [(1 - \psi_c) / \psi_c] = 12[(1 - 0,2) / 0,2] = 48 \text{ г} \quad (10)$$

де μ_c – молекулярна маса вуглецю, 12 г / моль

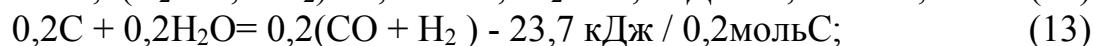
Тоді, за рахунок теплоти реакції (4), продукти газифікації і мінеральна частина породи, можуть бути нагріті до температури:

$$t = 123 / [(28 + 52,7) 10^{-3} \times c_r + 48 \times 10^{-3} \times c_m] \quad (11)$$

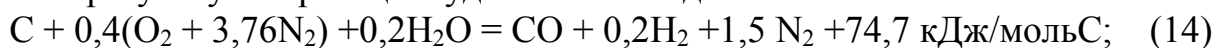
де: $c_m = 0,92 \text{ кДж/кгК}$ - середня теплоємність породи у визначеному температурному режимі; $c_r = 1,11 \text{ кДж/кгК}$ - середня теплоємність газу

$$t = 123 / [(28 + 52,7) 10^{-3} \times 1,11 + 48 \times 10^{-3} \times 0,92] = 919^\circ\text{C}$$

Проте, оскільки в реальних умовах у повітрі і вугільних відходах присутня вода. то в даному процесі необхідно розглядати наступні дві основні реакції (12, 13):



А їх результуюча реакція буде мати вигляд:





Згідно приведеної реакції (14) на 1 моль С буде отримано генераторний газ складу: $28\text{гCO} + 0,4\text{гH}_2 + 42\text{гN}_2$.

Тоді газ і відходи можуть бути нагріті до температури:

$$t = 74,7 / (1,07 \times 70 \times 10^{-3} + 15 \times 0,4 \times 10^{-3} + 0,86 \times 48 \times 10^{-3}) = 611^\circ\text{C}$$

де: $c_m = 0,86$ кДж/кгК - середня теплоємність породи у визначеному температурному режимі; $c_r = 1,07$ кДж/кгК - середня теплоємність газу, $c_n = 15$ кДж/кгК – теплоємність водню.

В таблиці 1 приведені розрахункові дані граничної температури нагріву продуктів газифікації вугільних відходів, за рахунок теплоти екзотермічної реакції (14), при різних значеннях долі вуглецю у їх складі.

Таблиця 1

Розрахункові дані енергетичної спроможності вугільних відходів, при різних значеннях долі вуглецю у їх складі

ψ_c - доля вуглецю у складі відходів	m_m (г) – маса відходів на 1 моль С	$t, ^\circ\text{C}$ - гранична температура нагріву продуктів газифікації відходів, за рахунок теплоти екзотермічної реакції (14)
0,05	228	269,6
0,1	108	429,6
0,2	48	611,0
0,3	28	710,7
0,4	18	774,1

При використанні теплоти екзотермічних реакцій необхідно зважити на те, що їх інтенсивне проходження спостерігається в інтервалі температур 300 – 350°C. А враховуючи значний вміст води у відходах і високу їх зольність, можна стверджувати, що основними енергетичними витратами в піролізному процесі є витрати на видалення води і нагрівання маси відходів до визначеної температури розкладу. Для компенсації цих теплових витрат чи підвищенні температури процесу необхідно підвести певну кількість теплоти від стороннього джерела енергії. Величини цих витрат (табл.2), в залежності від температури процесу і вихідної вологості відходів розраховано за формулою (15) [8], та узагальнено графіками на рис. 2.

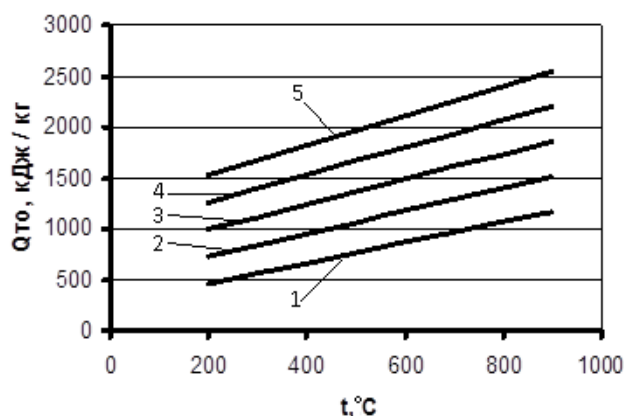


Рис. 2. Залежності кількості теплоти необхідної для термохімічної конверсії вугільних відходів від їх вологості (W^p %) і температури процесу $t, ^\circ\text{C}$): W^p – 1 - 10; 2 - 20; 3 - 30; 4 - 40; 5 - 50.



$$Q_{\text{то}} = [(595 + 0,47t)W^p/100 + c_{\text{см}}t(100 - W^p)/100] \times 4,187 \text{ кДж/кг} \quad (15)$$

де: W^p – вологість відходів на робочу масу, %;

$c_{\text{см}} = 0,226 \text{ ккал / кг}$

K – теплоємність сухої маси відходів;

t – температура процесу, °C.

Таблиця 2

Розрахункові дані кількості теплоти (кДж/кг) необхідної для термохімічної конверсії вугільних відходів, в залежності від їх вологості і температури процесу

t, °C	Вихідна вологість вугільних відходів W^p , %				
	10	20	30	40	50
200	454,3	724,4	994,4	1256,1	1534,5
300	556,8	837,4	1117,9	1398,5	1679,0
400	659,5	950,4	1241,4	1532,4	1823,4
500	762,0	1063,5	1365,0	1666,4	1967,9
600	864,6	1176,5	1488,5	1800,4	2112,3
700	967,2	1289,6	1612,0	1933,6	2256,8
800	1069,8	1402,6	1735,5	2068,4	2401,2
900	1172,4	1515,7	1859,0	2202,4	2545,7

Експериментальні дослідження.

Для відпрацювання технологічного процесу, уточнення і оптимізації його параметрів в реальних умовах, а також верифікації аналітичних досліджень, був проведений комплекс експериментальних робіт на лабораторній установці, принципова схема камери газифікації якої, приведена на рис.3. Камера газифікації лабораторної установки виконана секційною з жароміцної сталі, загальною висотою 555мм і внутрішнім діаметром 118мм. Її внутрішня поверхня футерована вогнетривким матеріалом, а зовнішня – покрита теплоізоляцією. В середній частині кожної секції є штуцера для встановлення датчиків температури і тиску. Їх схема розміщення приведена на рис.3. Температури вимірювалися за допомогою термопар градування ХА з реєстрацією показів на автоматичному потенціометрі КСП-4. Тиск вимірювався за допомогою U – подібних рідинних манометрів. Аналіз складу газової фази продуктів термохімічної конверсії проводився хроматографами ЛХМ – 80 і "Газохром -3101" по таких компонентах: водень, окис вуглецю, двоокис вуглецю, метан, етан, пропан, кисень, азот і аргон. В експериментах використовувалися аналітичні проби відходів вугільного виробництва з різним вмістом вуглецю. Для прикладу, один з досліджуваних зразків і його характеристики приведено в таблиці 3.



Методика проведення експериментальних досліджень полягала в наступному. В камеру газифікації насипалася визначена кількість (до 5 кг) відходів, фракційним розміром 3...7 мм. Експерименти проводилися в стаціонарному режимі, шляхом продування визначеної товщини шару відходів, спочатку холодним повітрям, для визначення гідромеханічних характеристик шару (порозність шару, його гідралічний опір та дійсна швидкість фільтрації). Потім, при подачі визначеної кількості повітря, у верхній частині камери газифікації відходи запалювалися. Отримані продукти згоряння, фільтруючись через шар відходів, нагрівають їх і вступають у взаємодію з вільним вуглецем. Під час експерименту контролювалися: час дослід, температура, тиск, склад газу і витратні параметри вхідних матеріальних потоків. Наприкінці експерименту твердий залишок зважувався і аналізувався на вміст летких, води та золи.

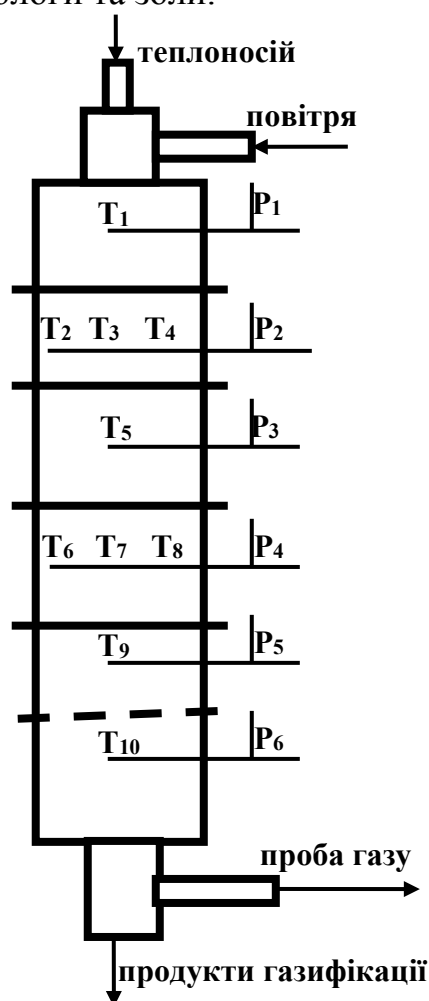


Рис.3. Принципова будова камери газифікації лабораторної установки і схема розміщення датчиків температури

Таблиця 3
Хімічний склад вугільних відходів, що використовувалися в експериментальних дослідженнях

Показник		Значення, % мас
Зольність, A^a		80,34
Вологість, W^a		4,2
Вміст вуглецю, C^a		5,9
Вміст водню, H^a		1,3
Вміст сірки, S^a , в т.ч.		2,69
сульфідної, S_s^a		1,15
сульфатної, S_s^a		1,44
органічної, S_o^a		0,1
Склад золи:	SiO_2	58
	Al_2O_3	20,7
	Fe_2O_3	10,4
	CaO	1,6
	MgO	2,23
	Na_2O	2,3
	K_2O	2,2
	P_2O_5	0,4
	TiO_2	1,7
	MnO	0,1

В даній роботі представлена частина результатів, направлених на експериментальне дослідження вигорання органічної частини відходів по висоті газифікаційної камери і можливості знешкодження шкідливих продуктів, зокрема з'єднань сірки. Так, на рис. 4 приведено графіки зміни температури в часі шару вугільних відходів, з вмістом вуглецю до 20%.

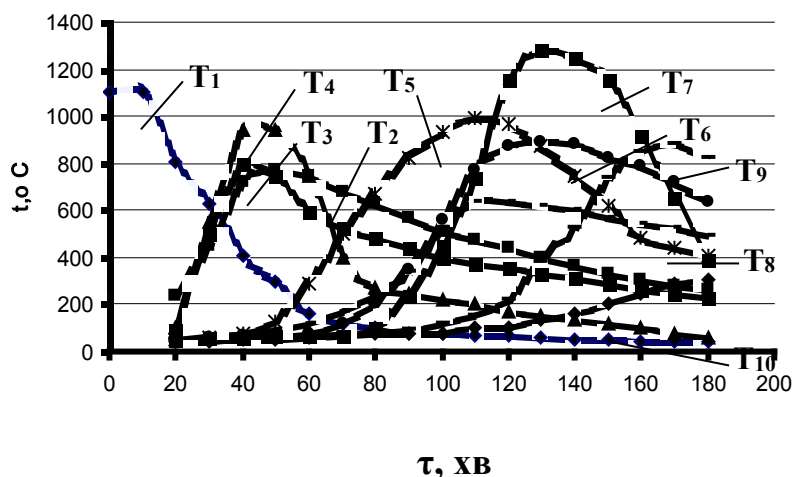


Рис. 4. Зміна температури в часі шару вугільних відходів, з вмістом вуглецю до 20%, при їх термохімічній конверсії

На рисунку можна простежити (в кожній секції), характер зміни температури шару відходів в часі (процес нагрівання і охолодження шару, та максимальний рівень температури). Проведені дослідження показали, що експериментальні результати добре корелюються з результатами аналітичних досліджень. Так, середня максимальна температура процесу, по перерізу камери газифікації (термопари T_6 , T_7 , T_8), становить 943°C , а розрахована по реакції (4) становить 919°C . Хоча розбіжність температур по перерізу камери газифікації є значною, що можна пояснити наступним. По – перше, нерівномірністю розподілення наявного вуглецю в шарі відходів. По – друге, зміною порозності шару і відповідно його гідрравлічного опору (особливо в пристінних зонах камери) при термохімічному перетворенні. При цьому, в перерізі реакційної камери порушується аеродинаміка газового потоку і змінюється дійсна швидкість його фільтрації, що суттєво впливає на температуру процесу. Приведений фактор пояснює підвищення температури в центральній зоні камери (термопари T_3 , T_7), оскільки більша частина окислювача фільтрується через цю зону.

З проведених аналітичних досліджень можна зробити висновок, що для здійснення високотемпературної конверсії відходів вугільного виробництва, особливо для знешкодження з'єднань сірки, їх власного енергетичного потенціалу є недостатньо. Тому, в запропонованій технології, для компенсації теплових витрат, додатковим джерелом теплової енергії слугує природний газ (чи інше вуглеводневе паливо), а точніше, високотемпературні продукти їх неповного згоряння. Поряд з підвищенням калорійності піролізного газу, це дозволяє проводити процес газифікації при високому і стабільному температурному рівні, що практично повністю знімає проблему забруднення довкілля сірчаними з'єднаннями. Оскільки частина цих з'єднань, в умовах високої температури, знешкоджується в самому газогенераторі, а подальша сіркова очистка здійснюється в більш легких умовах, в зрівнянні з очисткою продуктів згоряння на вугільних електростанціях (об'єми очистки відрізняються майже в 5 разів). Крім того, при газифікації вугільних відходів



утворюється сірководень, технологія видалення якого з генераторного газу значно простіша, ніж видалення SO_2 з димових газів електростанцій.

Для отримання даних впливу температури процесу (t), часу конверсії (τ), температури і складу теплоносія на ступінь утворення газоподібних з'єднань сірки, була проведена серія дослідів в яких через шар відходів продувалися продукти згоряння природного газу різного складу (з $\alpha > 1$, чи $\alpha < 1$). В першому випадку процес проходить в окислювальному, а в другому – у відновлювальному середовищі. Деякі результати цих досліджень приведені в таблиці 4.

Таблиця 4

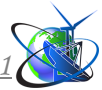
Результати експериментальних досліджень впливу α , t , τ на утворення з'єднань сірки при термохімічній конверсії вугільних відходів

№ дослідів	Умови дослідів			Волога, W^a , %	Леткі, V^a , %	Зола, A^a , %	Сірка, S^a_t %, в твердому залишку	Сірка, S^a_g %, в газовому стані
	t , °C	α	τ , хв..					
8	780	1,042	30	0,52	1,70	95,11	0,25	92,1
9	780	1,042	20	0,65	2,02	95,25	0,27	91,4
10	780	1,042	10	0,82	2,85	90,87	0,32	89,4
11	800	1,042	30	0,66	2,32	95,25	0,21	93,4
12	630	1,042	30	1,03	3,70	89,39	0,60	57,5
13	630	0,95	30	1,21	5,30	72,73	1,02	57,7
14	630	0,74	30	1,01	5,24	75,22	0,96	61,6
15	630	0,5	30	0,93	5,54	71,72	0,87	63,5
16	630	1,3	30	0,36	1,60	97,59	0,30	90,7
17	630	1,48	30	0,34	2,20	97,71	0,30	90,8

Як видно, максимум утворення газоподібних з'єднань сірки (89,4...93,4%) зафіксовано при $\alpha > 1$ і температурах процесу 780...800°C. При цьому, час термообробки відходів збільшує вихід газоподібної сірки всього на 3%. При переході до відновлювального середовища вихід газоподібних сіркових з'єднань зменшується майже в півтора рази, хоча в їх складі переважає вихід сірководню, який суттєво спрощує очистку генераторного газу від його наявності.

Для оцінки можливості отримання концентратів заліза з твердих залишків, в кінці кожного дослідів була проведена їх магнітна сепарація. Згідно отриманим даним, вихід магнітних фракцій збільшується із зменшенням температури термообробки (від 900 до 600°C), а при однаковій температурі із зменшенням коефіцієнту надлишку повітря. Стосовно досліджуваних відходів, при вмісті заліза у вихідній пробі на рівні 10,43 і 8,38% (в розрахунку на Fe_2O_3 відповідно у золі і вихідній пробі), сумарний вихід магнітних фракцій, в залежності від температури, коливався в межах від 19 до 69%, де магнітні фракції Fe_2O_3 складають 10...25%.

Таким чином, результати проведених експериментальних досліджень свідчать про те, що шаровий метод газифікації з підсвіткою природним газом, дозволяє здійснити термохімічну утилізацію вугільних відходів і їх знешкодження.



Висновок

На підставі проведених аналітичних та експериментальних досліджень показана можливість утилізації відходів вугільного виробництва шляхом їх термохімічної конверсії, що дозволить вирішувати на місцевому рівні не тільки паливну проблему, але й проблему щодо зменшення забруднення довкілля такими відходами. Крім того, утилізація вугільних відходів по такій технології дозволяє отримати золоті концентрати низки цінних продуктів (германій, галій, залізо і ін.), та золу з високою реакційною здатністю для будівельної промисловості (наприклад, для виробництва цементу, кераміки, високої якості цегли і ін.).

Література

1. Паливно-енергетичний комплекс України у цифрах і фактах / Ковалко М.П., Віхарєв Ю.О., Денисюк С.П., Єрохін О.О., Ковальов О.В., Ніколаєв Є.І., Осінчук З.П.; за редакцією Ковалка М.П. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2000. – 152 с.
2. Бабий В.Ф. Современные тепловые электростанции как источник загрязнения атмосферного воздуха концерогенными полициклическими ароматическими углеводородами и окислами азота // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. -1986. - №10. – С. 24 – 39.
3. Телиженко О.М., Яструбинский В.И. Экономическая оценка влияния тепловых электростанций на окружающую среду. – Сумы, 1999. – 76 с.
4. Вессельман С.Г. Использование отходов углеобогащения. В кн. Новые методы рационального использования местных топлив. Рига: 1959. -204 с.
5. А.С. 385992 (СССР) Способ подземной газификации углей / В.Г.Носач, Э.И.Баратов. – Опубл. в Б.И.1973, №26.
6. Носач В.Г. Повышение экологической безопасности угледобычи путем термохимической переработки углесодержащих отходов / В.Г. Носач, В.И.Родионов, А.А.Шрайбер, Е.В.Скляренко // Промышленная теплотехника, 2003, т.25, №4. – С.86 – 89.
7. Перелетов И.И., Бровкин Л.А., Розенгарт Ю.И. и др. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.
8. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования. Изд-во "Наука", 1971. – 358 с.

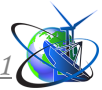
Annotation. The possibility and relevance of utilization of coal production waste containing a significant amount of organic (combustible) substances and substances that have a harmful effect on the environment are discussed. It is shown that in order to achieve this goal, it is most expedient to use technologies based on the thermochemical method, in particular, technologies of dump gasification and two-stage combustion. The obtained results of experimental studies of the utilization of coal-containing wastes made it possible to determine their main technological indicators, the method of supplying and the amount of necessary thermal energy of the coolant to compensate for the heat costs in the process. Studies have confirmed the effectiveness of the technology in improving the environmental safety of coal production by removing sulfur compounds and other harmful substances from their waste.



Key words: coal-containing wastes of coal production, combustion, pyrolysis, gasification, hazardous emissions.

Стаття підготовлена у рамках виконання науково-дослідної відомчої тематики ІТТФ НАН України, тема «Розвиток методів та засобів підвищення екологоенергетичної ефективності в газотурбобудуванні та теплоенергетиці» (шифр 1.7.1.896).

Стаття відправлена: 23.09.2020 г.
© Склярєнко Є.В, Воробйов Л.Й.



УДК 621.791.927.5

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE RATIO OF EXOTHERMAL MIXTURE CUO / AL IN CORE FILLER OF THE FLUX-CORED WIRE ELECTRODE ON GEOMETRY BEAD

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДНОШЕННЯ ЕКЗОТЕРМІЧНОЇ СУМІШІ CUO/AL У НАПОВНЮВАЧІ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ НА ГЕОМЕТРІЮ ВАЛИКУ

Trembach V.O. / Трембач Б.О.

Ph.D. student / аспірант

ORCID: 0000-0002-2305-8411

Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Academic street, 72, 84300

PJSC «Novokramatorsky Mashinostroitelny Zavod», Kramatorsk, Ordzhonikidze street, 5, 84305

Донбаська Державна машинобудівна академія, Краматорськ, вул. Академічна, 72 84300

ПрАТ "Новокраматорський машиностроительний завод",

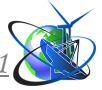
Краматорськ, вул. Орджонікідзе, 5, 84305

Анотація. Розробка нових і дослідження існуючих самозахисних порошкових дротів з додаванням екзотермічних сумішей до їх складу є актуальним завданням, що стоїть перед сучасними дослідниками. Як засвідчив літературний огляд серед різноманіття екзотермічних сумішей, значний інтерес має система $\text{CuO} - \text{Al}$. В статі проведені дослідження впливу відношення окислювача до відновлювача екзотермічної суміші CuO / Al , та деяких параметрів наплавлення на геометрію наплавленого валику. Визначено, що найліпші геометричні показники спостерігаються при CuO / Al з більшим вмістом алюмінію (відновлювача).

Ключові слова: наплавлення, самозахисний порошковий дріт, екзотермічна суміш, параметри, наплавлений валик, геометрія валику.

Вступ.

З усього різноманіття способів наплавлення, за даними міжнародного інституту зварювання все більше поширення отримує наплавлення самозахисними порошковими дротами (СПД) [1]. Перспективним напрямком в розробці СПД є розробка матеріалів для наплавлення з екзотермічною сумішшю у складі композиції осердя порошкового дроту [2], що забезпечує рівномірність плавлення та підвищує показники плавлення [3-8]. Найбільш розповсюдженою екзотермічною сумішшю є $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}$, [2, 8, 9]. Однак при використанні окалини, що містить крім Fe_2O_3 інші окисли заліза з меншим тепловим ефектом, потребує введення більшої кількості екзотермічної суміші [10]. Крім того, використання системи $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}$ звужує рівень досягач мого легування. Розрахунки теплових ефектів взаємодії різних окислювачів з Al показали, що найбільший тепловий ефект від 1г екзотермічної суміші досягається при використанні CuO (4,2 кДж/г), згодом Fe_2O_3 (3,97 кДж/г), FeO (3,268 кДж/г), Cr_2O_3 (2,64 кДж/г). У такому випадку викликає інтерес екзотермічні суміші з система $\text{CuO} - \text{Al}$ [2, 11, 12], через більший тепловий ефект та низьку температуру початку реакції відновлення міді з CuO . Наведені позитивні показники екзотермічної суміші $\text{CuO} - \text{Al}$, насамперед більша термічність, дає змогу досягти необхідний ефект (зменшити нерівномірність плавлення оболонки і компонентів осердя наповнювача порошкового дроту) при введенні меншої кількості екзотермічної суміші. Останнє, вивільняє більше



місця для ведення легуючих компонентів, тим самим дає змогу досягнути більшого ступеню легування наплавленого металу. Крім того, при використанні термічних сумішей інших систем (не окалини) наприклад CuO , за рахунок відновлення окислювача останній надходить в метал, тим самим легуючи його, чим забезпечує ще більший рівень легування [7].

Одним з недоліків наплавлення СПД є вузький діапазон параметрів наплавлення, що може викликати підвищене розбризкування, поганому формуванню валику, наявності пор та інше [13, 14]. На геометрію валику впливають такі параметри наплавлення, як зварювальний струм, напруга дуги, швидкість зварювання та контактна відстань під час роботи, оскільки вони регулюють кількість подачі тепла, яка відповідає за плавлення основного металу та дріт наповнення [15], а також додавання екзотермічної суміші до складу наповнювача СПД [8,16,17].

Так у роботах Лі та інші [8] вивчали вплив вмісту екзотермічної суміші Fe_2O_3 - Al від 0 до 50 мас.% в наповнювачі порошкового дроту, що брались в стехіометричній пропорції, на глибину проникнення та розведення наплавленого валику. Відповідно до отриманих результатів, глибина проникнення та розведення наплавленого валику металом підкладки (основи) зростає зі збільшенням вмісту екзотермічної суміші. Однак спостерігається значне падіння, майже до рівня при вмісті відсутності екзотермічної суміші.

Для кращого контролю геометрії наплавленого валику необхідно встановити залежність між геометрією наплавленого валику з одного боку, та параметрами наплавлення та екзотермічною сумішшю з іншого боку.

Дослідженням впливу екзотермічної суміші Fe_2O_3 - Al, що додавалася до композиції наповнювача СПД займався також Жаріков С.В. [18]. За результатами його роботи спостерігалось майже незмінне значення геометричних параметрів валику, при вмісті екзотермічної суміші до 30%.

Метою роботи, є дослідження впливу відношення окислювача до відновлювача (CuO/Al) та зміни параметрів наплавлення на геометричні показники наплавленого валику.

Для досліджень були виготовлені СПД з екзотермічною сумішшю діаметром 4 мм. В якості газошлакоутворюючих компонентів застосована шлакова основа: мармур - плавиковий шпат - рутил. Наплавлення виконувалось однопрохідними валиками на пластини з низьковуглецевої сталі Ст3пс розміром 10x100x200мм на зварювальному автоматі з використанням джерела живлення з жорсткою вольт-амперною характеристикою.

Для наплавлення використовували наступні такі параметри як відношення CuO/Al у наповнювачі СПД, швидкість подачі дроту $V_{\text{пд}}$ та напруга на дузі. Їх рівні наведені у табл. 1.

Коефіцієнт заповнювання дроту 0,35–0,36. Дослідженню піддавалися СПД, композиція наповнювачів яких відповідає складу наведеному у табл. 2. При цьому сумарна частка екзотермічної суміші від загальної маси наповнювача складала 32 % та 30 % відповідно, що обумовлено досягненням необхідного рівня легування та обраної системи легування.



Таблиця 1

Рівні змін параметрів

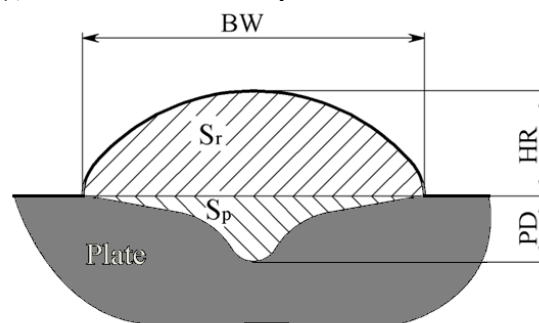
Зміні параметри \ Рівні	Низький рівень -1	Високий рівень +1
Співвідношення CuO/Al у наповнювачі СПД	3/1	5/1
Швидкість подачі порошкового дроту, м/год	109	124
Напруга на дузі, В	24	32

Таблиця 2

Склад наповнювача експериментальних СПД.

Експериментальний склад		S1	S2
Найменування компоненту			
Газошлакоутворюючі компоненти	Плавиковий шпат ГОСТ 4421-73	12	12
	Рутиловий концентрат ГОСТ 22938-78	7	6
	Карбонат кальцію ГОСТ 8252-79	4	4
	Цирконій ГОСТ 8252-79	4	4
Легуючі та розкислювачі	Титановий порошок ПТМ ТУ 14-22-57-92	5	5
	Феросіліцій ФС-75 ГОСТ 1415-78	5	4
	Феромарганець ФМн-88А ГОСТ 4755-91	5	5
	Хром металевий Х99 ГОСТ 5905-79	15	15
	Ферованадій ФВд-50 ГОСТ 27130-94	3	2
Графіт сріблястий		4,2	4,2
Порошок заліза ПЖР-1 ГОСТ 9849-86		3,8	9,8
Оксид мідної порошкоподібної ГОСТ 16539 79		24	25
Порошок алюмінію ПА1 ГОСТ 6058 73		8	5
Відношення CuO/Al		3/1	5/1

Цей аналіз дозволив оцінити дані, необхідні для розрахунку розведення звареного шва (D_v), таких як площа наплавленого металу (S_r), площа проникнення (S_p), висота підсилення валику (H_R), глибина проникнення (D_P) та ширина валику (W_B), як показано на рис. 1.



Фіг. 1. Геометричні параметри валику.

Пластини перерізували в середніх точках, щоб отримати зразки, що мають



ширину 20 мм. Ці зразки відшліфували та протравили.

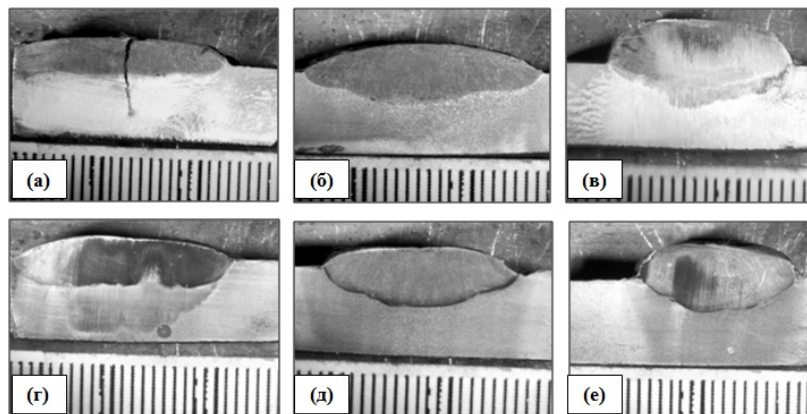
Отримані результати наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Режими наплавлення

Параметри наплавлення	Комбінація режимів наплавлення		
	WM1	WM2	WM3
Виліт дроту CTWD, мм	40	35	40
Швидкість подачі дроту WFS, м/ч	109	124	124
Напруга на дузі Ua, В	32	32	24

Відповідно до були отримані наступні значення та геометричні показники наплавлених валиків



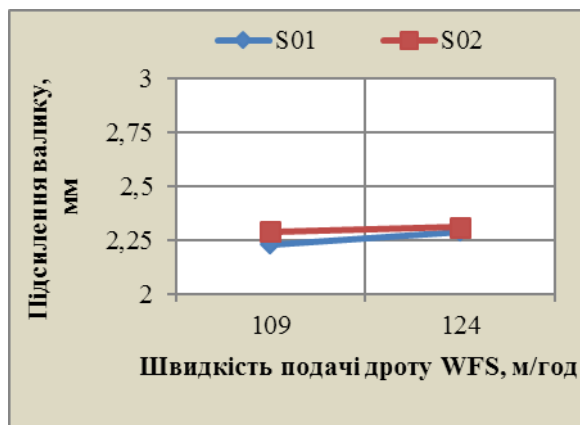
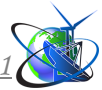
Фіг 2. Поперечні перерізи наплавлених валиків виконаних експериментальними дротами з екзотермічною композицією у складі наповнювача, самозахисним порошковим дротом: S01 на режимах WM1 (а), WM2 (б), WM2 (в), та S02 на режимах WM1 (г), WM2 (д), WM2 (е).

Таблиця 4

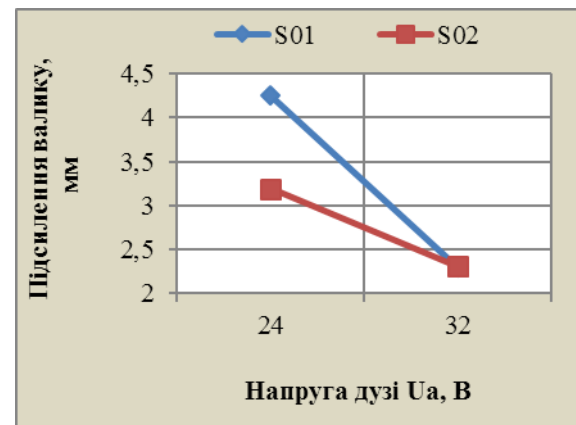
Геометричні показники

	Комбінація режимів наплавлення		
	WM1	WM1	WM1
Підсилення валику			
S01	2,23	2,29	4,25
S02	2,29	2,31	3,19
Глибина проникнення			
S01	1,92	2,56	2,9
S02	2,76	3,37	3,29
Ширина валику			
S01	21,75	23,65	18,46
S02	21,32	18,1	14,63
Частка матеріалу основи у наплавленому металу			
S01	0,64	0,52	0,36
S02	0,66	0,57	0,47

Відповідно отриманим даним були побудовані графіки залежності підсиленню валику (Фіг. 3), глибини проникнення (Фіг. 4), ширини валику (Фіг. 5) та частки матеріалу підкладки у наплавленому металу (Фіг. 6).



(a)

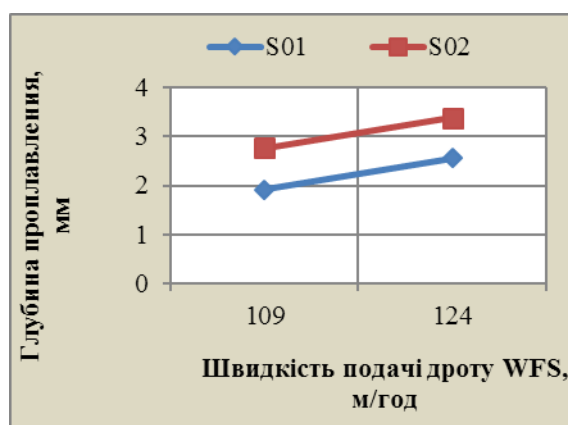


(б)

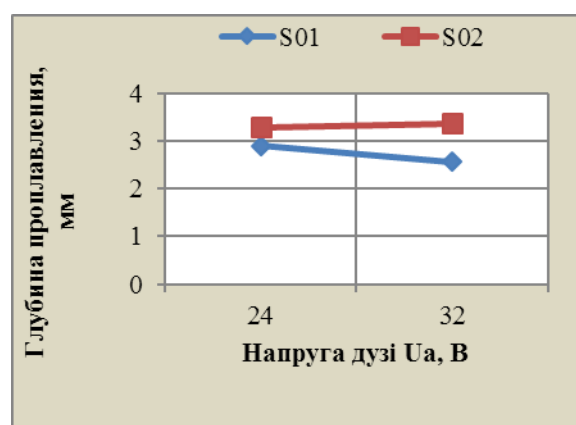
Фіг. 3. Графік залежності підсилення наплавленого валику експериментальними СПД з екзотермічною сумішшю в наповнювачі дроту в залежності від: а) швидкості подачі порошкового дроту; б) напруги на дузі.

З наведених на фіг. 3 (а) даних можна зазначити, що швидкість подачі порошкового дроту майже не впливає на підсилення валику, і знаходиться майже на одному рівні для двох експериментальних порошкових дротів. В той час, як напруга на дузі фіг. 3 (б) чинить більший вплив, на значення підсилення валику. При цьому підсилення валику зменшуються з підвищенням напруги на дузі для обох експериментальних зразків. Крім того, підсилення наплавленого валику має значно більші значення для СПД з S01 з більшим вмістом алюмінію, перевищуючим стехіометричне відношення ($\text{CuO}/\text{Al}=3/1$) при низькій напрузі на дузі ($U_d = 24 \text{ В}$). В той час як для високих значень напруги на дузі ($U_d = 32 \text{ В}$).

На фіг. 4 зображені графіки залежності глибини проникнення для експериментальних СПД при зміні швидкості подачі СПД та напруги на дузі.



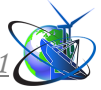
(a)



(б)

Фіг. 4. Графік залежності глибини проникнення експериментальними СПД з екзотермічною сумішшю в наповнювачі дроту в залежності від: а) швидкості подачі порошкового дроту (WFS); б) напруги на дузі (Ua).

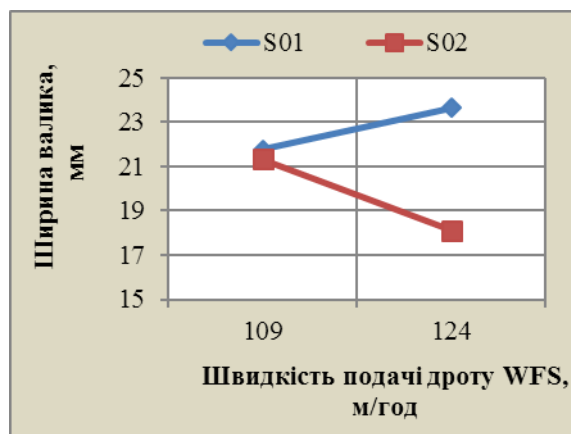
Згідно з фіг. 4 можна зазначити, що вплив швидкості подачі порошкового



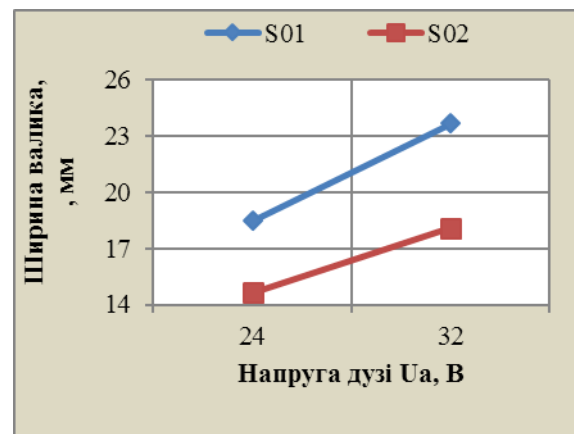
дроту та композиції екзотермічної суміші, що додається до складу наповнювача СПД, мають значний вплив. Так зі збільшенням швидкості подачі порошкового дроту (WFS) для двох експериментальних СПД спостерігається збільшення глибини проникнення, майже на однакове значення. При цьому глибина проникнення для СПД S01 з більшим вмістом алюмінію, мають менші значення, ніж для СПД S02 з стехіометричним співвідношенням окислювача до відновлювача ($\text{CuO}/\text{Al} = 5/1$).

Що стосовно напруги на дузі, то зі зростанням їх значень глибина проникнення для СПД S01 зменшується, в той час як для СПД S02 вона залишається на одному рівні. Такий вплив можна пояснити збільшенням потужності дуги. В той час як при збільшенні напруги на дузі спостерігається зниження глибини проникнення, що можна пояснити збільшенням блукання дуги. Відповідно до Фіг. 4 можна також зазначити, що значний вплив на глибину проникнення чинить співвідношення окислювача до відновлювача у екзотермічній суміші. Так, для двох випадків (зміни швидкості подачі дроту та напруги на дузі) глибина проникнення виявилася більшою для СПД S02 з стехіометричним відношенням $\text{CuO}/\text{Al} = 5/1$.

На фіг. 5 зображена зміна ширини валику для експериментальних СПД при зміні швидкості подачі СПД та напруги на дузі.



(а)



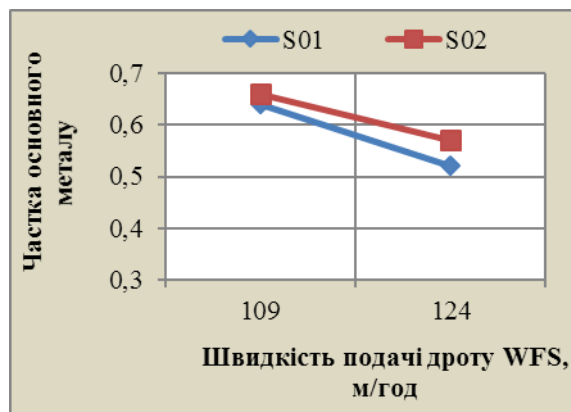
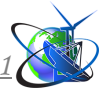
(б)

Фіг. 5. Графік залежності ширини наплавленого валику експериментальними СПД з екзотермічною сумішшю в наповнювачі дроту в залежності від: а) швидкості подачі порошкового дроту (WFS); б) напруги на дузі (U_a).

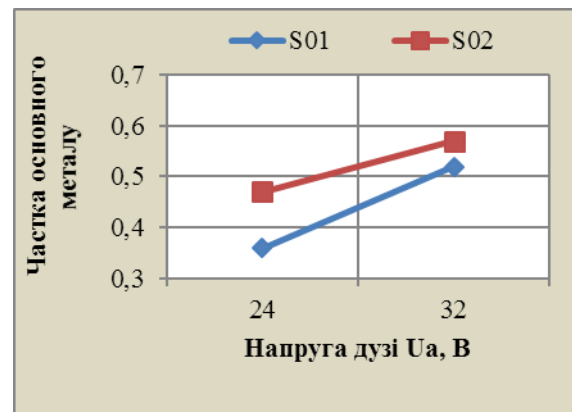
Відповідно до отриманих графіків (фіг. 5 (а)), ширина шву на низькому рівні ($\text{WFS} = 109$ м/год) має однакове значення для двох експериментальних СПД. В той час як при збільшенні швидкості подачі дроту, для СПД S01 спостерігається збільшення ширини шву, в той час як для СПД S02 спостерігається значне зменшення ширини шву.

Що стосовно впливу співвідношення екзотермічної суміші, то ширина валику має більші значення для СПД S01 з $\text{CuO}/\text{Al} = 3/1$.

На Фіг. 6 наведені графіки зміни частка матеріалу основи у наплавленому металу.



(а)



(б)

Фіг. 6. Графік залежності частки розплавленого металу СПД з екзотермічною сумішшю в наповнювачі дроту в залежності від:
а) швидкості подачі порошкового дроту (WFS); б) напруги на дузі (Ua).

Відповідно до отриманих даних можна зазначити, що зі збільшенням швидкості подачі порошкового дроту частка основного металу зменшується для обох експериментальних порошкових дротів (Фіг. 6 (а)). Що можна пояснити збільшенням розплавленого металу, для СПД з екзотермічної суміші у складі наповнювача. Тоді як зі збільшенням напруги на дузі частка матеріалу основи у наплавленому металу збільшується.

Збільшення частки алюмінію у складі екзотермічної суміші знизило частку основи у наплавленому металу як при зміні швидкості подачі дроту, так і при зміні напруги на дузі.

Таким чином, можна зробити висновок, що зазначені зміни чинять значний внесок на геометричні параметри наплавленого валику. При цьому склад композиції екзотермічної суміші чинить значний внесок

Висновки

1. Проведено дослідження впливу співвідношення компонентів екзотермічної суміші CuO+Al, що додається до складу композиції осердя самозахисного порошкового дроту, а також швидкості подачі порошкового дроту та напруги на дузі на геометричні параметри наплавленого валику.

2. Визначено, що геометрія наплавленого валику є більш стабільною, при зміні режимів наплавлення, коли у склад наповнювача самозахисного порошкового дроту додається екзотермічна суміш CuO+Al при стехіометричному співвідношенні її компонентів (CuO/Al = 1/4,5).

Перелік посилань

1. Исследование и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой/И.К. Походня, В.Н. Шлепаков, С.Ю. Максимов, И.А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2010. – №12. – С. 34-42.

2. Гринь А.Г., Трембач Б.А., Жариков С.В., Трембач И.А. Перспективные направления разработки самозащитных порошковых проволок с экзотермическими смесями/ Зварювання та споріднені технології – сьогодні і



майбутнє: Тези стенд. доп./міжнародна Асоціація Зварювання. – Київ, 2018. – с.30-31.

3. Жариков С. В. Оптимизация режимов наплавки самозащитной порошковой проволокой с экзотермической смесью / С. В. Жариков, А. Г. Гринь, Л. В. Васильева // Вісник ДДМА. Збірник наукових праць. - 2016. - № 2 (38) - С. 116-120.

4. Зареченский А. В. Особенности плавления порошковых лент с термитными смесями / А. В. Зареченский, Л. К. Лещинский, В. В. Чигарев // Сварочное производство. – 1985. – №8. – С. 39–41.

5. Иоффе О. М. Влияние титано-термитной смеси, входящей в электродное покрытие, на повышение производительности сварки / И. С. Иоффе, О. М. Кузнецов, В. М. Питецкий // Сварочное производство. – 1980. – №3. – С. 26–28.

6. Карпенко В.М. Эффективность тепловыделения экзотермической смеси при наплавке порошковой проволокой /В.М. Карпенко, С.В. Жариков // Удосконалення процесів та обладнання тиском в металургії і машинобудуванні. Тематичний збірник наукових праць – Краматорськ-Слов'янськ, - 2000.- № С. 480-483.

7. Trembach B. et al. Influence of the core filler composition on the recovery of alloying elements during the self-shielded flux-cored arc welding/ Trembach, B., Grin, A., Makarenko, N., Zharikov, S., Trembach, I., & Markov, O. // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Т. 9. – №. 5. – С. 10520-10528.

8. Li H. L. et al. The effect of alumino-thermic addition on underwater wet welding process stability/ Li, H. L., Liu, D., Guo, N., Chen, H., Du, Y. P., Feng, J. C. // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Т. 245. – С. 149-156.

9. Физико-химические свойства окалина как компонента экзотермической смеси / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко, С. Г. Плис, А. И. Лещенко, А. М. Куций // Вісник ДДМА. Збірник наукових праць. 2006. №3(5). С. 158–163.

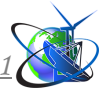
10. Trembach. Investigation of powder wire with the CuO / Al exothermic mixture / Bogdan Trembach, Aleksandr Grin, Sergey Zharikov, Ilya Trembach // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2018. — Vol 92. — No4. — P. 13–23.

11. Trembach B., Grin A. Study of the influence of the relationship of the components of exothermic mixture into FCAW-S on the melting indices // 9-th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus” // Proceedings. – Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic National University, 2019. pp. 146-152.

12. Гринь А.Г. Совершенствование самозащитной порошковой проволоки для сварки меди с сталью / А.Г. Гринь, С.В. Жариков, Д.И. Залесный // Вісник ДДМА. Збірник наукових праць. 2016. №2 (38). С.90-95.

13. Бабинец А. А. и др. Влияние режима на-плавки на формирование и геометрические размеры валиков, наплавленных самозащитной порошковой проволокой на плоские и цилиндрические детали //Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. 2016. №. 2. С. 33-37.

14. Рябцев И.А. Теория и практика наплавочных работ / И.А. Рябцев, И.К.



Сенченков. – Киев: Екотехнологія, 2013. – 400с.

15. Correa C. A., Mastelari N., Moreno J. R. S. Effect of welding parameters in flux core arc welding (FCAW) with conventional and pulsed current in the efficiency and fusion rate of melting coating // *Scientific Research and Essays*. – 2014. – Т. 9. – №. 23. – С. 976-983.

16. Park Y. D. Kang, N., Malene, S. H., & Olson, D. L. . Effect of exothermic additions on heat generation and Arc process efficiency in Flux-Cored Arc welding // *Metals and Materials International*. – 2007. – Т. 13. – №. 6. – С. 501-509.

17. Chigarev V. V., Zarechenskii D. A., Belik A. G. Optimisation of the composition and melting parameters of powder strips with the exothermic mixture in the filler // *Welding international*. – 2016. – Т. 30. – №. 7. – С. 557-559.

18. Жариков С.В. Влияние экзотермической смеси в составе сердечника самозащитной порошковой проволоки на параметры наплавленного валика // *Вісник ДДМА. Збірник наукових праць*. 2010. №2 (19). С.102-105.

Reference

1. Pokhodnya, I.K., Shlepakov, V.N., Maksimov, S. Yu., & Ryabtsev, I.A. (2010). Issledovanie i razrabotki IJeS im. E.O. Patona v oblasti jelektrodugovoj svarki i naplavki poroshkovoј provolokoj [Research and development of the I.E. EO Paton in the field of electric arc welding and surfacing with flux-cored wire (Review).] *Avtomaticheskaja svarka*, vol.12, pp. 34-42.

2. Grin A.G., Trembach B.O., Zharikov S. V., Trembach I.O. (2018) Perspektivnye napravlenija razrabotki samozashhitnyh poroshkovyх provolok s jelezotermicheskimi smesjami [Promising directions for the development of self-shielded flux-cored wires with exothermic mixtures]. *Proceedings of the Welding and related technologies are today and the future (Ukraine, Kiev, December 5 – 6, 2018)*, Kiev: International Welding Association. pp.30-31.

3. Zharikov, S.V., Grin, A.G., & Vasilieva, L.V. (2016). Optimizacija rezhimov naplavki samozashhitnoj poroshkovoј provolokoj s jelezotermicheskoi smes'ju [Optimization of surfacing modes with self-shielded flux-cored wire with an exothermic mixture]. *Herald Donbass State Engineering Academy*, Vol. 2 , no. 44, pp. 116-120.

4. Zarechensky, A.V., Leshchinsky, L.K., & Chigarev, V.V. (1985). Osobennosti plavlenija poroshkovyх lent s termitnymi smesjami [Features of melting of flux-cored tapes with thermite mixtures], *Svarochnoe proizvodstvo*, Vol. 8, pp. 39-41.

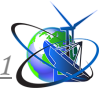
5. Ioffe I. S., Kuznetsov O. M., Pitetskiy V. M. (1980). Vlijanie titano-termitnoj smesi, vhodjashhej v jelektrodnoe pokrytie, na povyshenie proizvoditel'nosti svarki [Influence of titanium-thermite mixture included in the electrode coating on increasing welding productivity], *Svarochnoe proizvodstvo*, Vol. 3, pp. 26–28.

6. Karpenko VM, Zharikov SV (2000). Jefferektivnost' teplovydelenija jelezotermicheskoi smesi pri naplavke poroshkovoј provolokoj [Heat dissipation efficiency of exothermic mixture during flux-cored wire surfacing]. *Improvement of processes and pressure equipment in metallurgy and mechanical engineering*, pp. 480 – 483.

7. Trembach, B., Grin, A., Makarenko, N., Zharikov, S., Trembach, I., Markov, O. (2020). Influence of the core filler composition on the recovery of alloying elements during the self-shielded flux-cored arc welding. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol.9, no.5, pp. 10520-10528..

8. Li, H. L., Liu, D., Guo, N., Chen, H., Du, Y. P., Feng, J. C. (2017). The effect of alumino-thermic addition on underwater wet welding process stability, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 245, pp. 149-156.

9. Vlasov A.F., Karpenko V.M., Plis S.G., Leshchenko A.I., Kushchiiy A.M. (2006) Fiziko-himicheskie svoјstva okaliny kak komponenta jelezotermicheskoi smesi [Physicochemical properties of scale as a component of an exothermic mixture]. *Svarochnoe proizvodstvo*.. vol. 3, no.



5. pp. 158–163.

10. Trembach, B., Grin, A., Zharikov, S., & Trembach, I. (2019). Investigation of characteristic of powder wire with the CuO/Al exothermic mixture. *Scientific Journal of TNTU*, vol 92, no 4, pp. 13–23.

11. Trembach B., Grin A. Study of the influence of the relationship of the components of exothermic mixture into FCAW-S on the melting indices // 9-th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus” // Proceedings. – Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic National University, 2019. pp. 146-152.

12. Grin A.G., Zharikov S.V., Zalesny D.I. (2016). Sovershenstvovanie samozashhitnoj poroshkovej provoloki dlja svarki medi s stal'ju [Improvement of self-shielded flux-cored wire for welding copper to steel]. *Herald Donbass State Engineering Academy*, vol. 2, no. 38. pp. 90-95.

13. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A., Panfilov, A.I., & Peremitko, V.V. (2016). Vlijanie rezhima na-plavki na formirovanie i geometricheskie razmery valikov, naplavlennyh samozashhitnoj poroshkovej provolokoj na ploskie i cilindricheskie detali. [Influence of the on-melting regime on the formation and geometric dimensions of beads deposited with self-shielded flux-cored wire on flat and cylindrical parts]. *Zbìrnik naukovih prac' Dnìprodzeržins'kogo deržavnogo tehničnogo unìversitetu*. Vol. 2, pp. 33-37.

14. Рябцев И.А. Теория и практика наплавочных работ / И.А. Рябцев, И.К. Сенченков. – Киев: Екотехнологія, 2013. – 400с.

15. Correa, C. A., Mastelari, N., Moreno, J. R. S. (2014). Effect of welding parameters in flux core arc welding (FCAW) with conventional and pulsed current in the efficiency and fusion rate of melting coating. *Scientific Research and Essays*, Vol.9, no.23, pp. 976-983..

16. Park, Y. D., Kang, N., Malene, S. H., Olson, D. L. (2007). Effect of exothermic additions on heat generation and Arc process efficiency in Flux-Cored Arc welding. *Metals and Materials International*, Vol.13, no. 6, pp. 501-509.

17. Chigarev, V. V., Zarechenskii, D. A., Belik, A. G. (2016). Optimisation of the composition and melting parameters of powder strips with the exothermic mixture in the filler. *Welding international*, Vol. 30, no. 7, pp. 557-559.

18. Zharikov S.V. (2010) Vlijanie jekzotermicheskoj smesi v sostave serdechnika samozashhitnoj poroshkovej provoloki na parametry naplavlennogo valika. [Influence of exothermic mixture in the core of self-shielded flux-cored wire on the parameters of the deposited bead]. *Herald Donbass State Engineering Academy*, vol. 2, no. 19. pp.102-105.

Abstract. It is determined that the development of new and research of existing self-shielded flux-cored wires electrode with the addition of exothermic mixtures to their composition is an urgent task facing modern researchers. According to a literature review among a variety of exothermic mixtures, the CuO - Al system is of considerable interest. The influence of the ratio of oxidant to reducing agent of the exothermic mixture CuO / Al and some hardfacing parameters on the geometry of the deposited bead was studied in the article. It is determined that the best geometrical indicators are observed at CuO / Al with a higher content of aluminum (reducing agent).

Ключові слова: hardfacing, self-shielded flux-cored wire, exothermic mixture, parameters, weld bead, geometry bead.



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/meit13-01-055> 6

SIMULATION THE FLOW AROUND A CYLINDER TO DETERMINE THE COEFFICIENT OF INDUCTIVE RESISTANCE

Medvid A. M., Panchenko V. O.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit13-01-070> 13

MATHEMATICAL MODEL OF THE DISSOLUTION OF THE CORE IN THE CLADDING LAYER OF PARTICLES DURING PLASMA SPRAYING OF COMPOSITE POWDERS

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ ЯДРА У ПЛАКУВАЛЬНІЙ ОБОЛОНЦІ ЧАСТОК ПРИ ПЛАЗМОВОМУ НАПИЛЮВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКІВ

Shevchenko O.V. / Шевченко О.В.

Engineering instruments, meters, etc. Industrial instrumentation**Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы**

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit13-01-024> 18

METHODS OF REDUCING THE DURATION OF PULSE HEAT MEASUREMENT

МЕТОДИ СКОРОЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ІМПУЛЬСУ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ

Vorobiov L.Y. / Воробйов Л.Й., Dekusha L.V. / Декуша Л.В.

Dekusha O.L. / Декуша О.Л., Ivanov S.O. / Иванов С.О., Kovtun S.I. / Ковтун С.І.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit13-01-040> 31

WAYS TO FIX THE PIEZOELECTRIC ELEMENT IN THE CONSTRUCTION OF THE PIEZOGRAVIMETER

СПОСОБИ ЗАКРІПЛЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕМЕНТА У КОНСТРУКЦІЇ П'ЄЗОГРАВІМЕТРА

Bezvesilna O.M. / Безвесільна О.М., Kyrychuk Y.V. / Киричук Ю.В.

Nazarenko N.M. / Назаренко Н.М.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit13-01-041> 37

ERROR COMPENSATION FOR ACCELERATION OF VERTICAL ACCELEROMETER AND HORIZONTAL ACCELEROMETER USING NEURAL NETWORK

КОМПЕНСАЦІЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ТА ГОРИЗОНТАЛЬНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Bezvesilna O.M. / Безвесільна О.М., Kyrychuk Y.V. / Киричук Ю.В.

**Electrical engineering. Electronics. Nuclear engineering****Энергетика**<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit13-01-004>

41

**MODERN RESEARCH STATUS AND RESULTS ANALYSIS OF
CONDENSATE RECOVERY ENHANCEMENT***АНАЛІЗ СТАНУ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІЗ ПРОБЛЕМ
ПІДВИЩЕННЯ КОНДЕНСАТОВИЛУЧЕННЯ**Burachok O.V. / Бурачок О.В.*<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit13-01-010>

58

**ANALYSIS OF ASYMMETRIC MODES IN ELECTRICAL NETWORKS WITH
VOLTAGE UP TO 1 kV***АНАЛІЗ АСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ
НАПРУГОЮ ДО 1 кВ**Iegorov O. / Єгоров О.Б., Kundenko M. / Кунденко М.П., Iegorova O. / Єгорова О.Ю.*<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit13-01-035>

64

**INVESTIGATION OF THERMOCHEMICAL CONVERSION OF CARBON-
CONTAINING WASTE***ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОХІМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ ВУГЛЕМІСТКИХ ВІДХОДІВ*
*Sklyarenko E.V. / Скляренко Є.В., Vorobiov L.Y. / Воробйов Л.Й***Mining engineering. Metallurgy****Металлургия и материаловедение**<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit13-01-069>

76

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE RATIO OF EXOTHERMAL
MIXTURE CUO / AL IN CORE FILLER OF THE FLUX-CORED WIRE
ELECTRODE ON GEOMETRY BEAD***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДНОШЕННЯ ЕКЗОТЕРМІЧНОЇ СУМІШІ CUO/AL У
НАПОВНЮВАЧІ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ НА ГЕОМЕТРІЮ ВАЛИКУ**Trembach B.O. / Трембач Б.О.*



International periodic scientific journal

MODERN ENGINEERING AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Heutiges Ingenieurwesen und
innovative Technologien

Indexed in
INDEX COPERNICUS
high impact factor (ICV: 84.35)

*Issue №13
Part 1
September 2020*

Development of the original layout - Sergeieva&Co

Signed: 24.10.2020

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



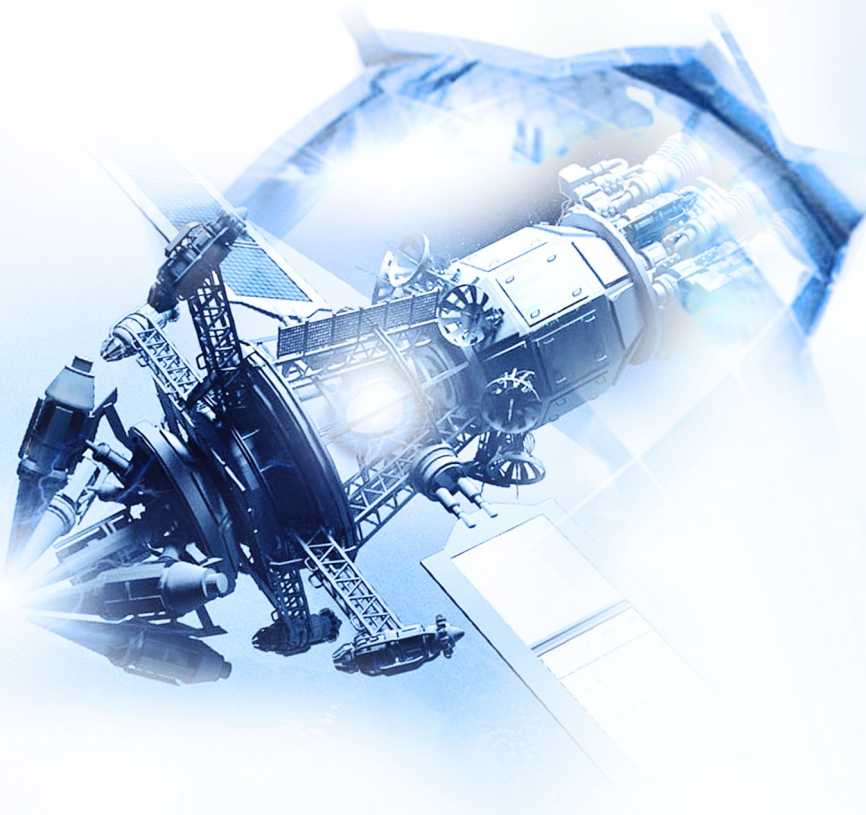
*The publisher is not responsible for the reliability of the
information and scientific results presented in the articles*

With the support of International research
project SWorld
www.sworld.education



ISSN 2567-5273





www.scientifictrends.de

e-mail: orgcom@scientifictrends.de