

4 Hz

86 Hz

170 Hz

340 Hz

679 Hz

1.3 kHz

2.6 kHz

5.1 kHz

10.1 kHz

20 kHz

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1001101001101111001010011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010010001010101
00110101101100111000100111001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101
110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
0010100111001101001111000101001010101110101010100000101010100011010111001100100011100101001010010

№ 3 (45) Т.1 2019



Труды

Сибирского государственного университета
водного транспорта



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 3 (45) Т.1 2019 www.morintex.ru

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционный Совет

Сопредседатели

И.Г.Захаров, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора ЦМКБ «Алмаз»

Г.А. Туричин, д.т.н., Ректор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Члены Совета

Е.М. Апполонов, д.т.н. генеральный директор, "ЦКБ "Лазурит"

А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, генеральный директор, НИЦ "МОРИНТЕХ»

Г.Н. Муру, к.т.н., исполнительный директор, 51 ЦКТИ судоремонта

С.А. Огай, д.т.н., доцент, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и технологии, Норвегия

И.Г. Малыгин, д.т.н., профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, референт генерального директора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

С.П. Столяров, к.т.н., профессор, декан факультета корабельной энергетики и автоматизации, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта РАН

А.И. Фрумен, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет

П.А. Шауб, д.т.н., профессор, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ

Члены Редколлегии

А.В. Алексеев, д.т.н., профессор Санкт-Петербургский государственный университет

Р.В. Борисов, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Ю.А. Власов, к.ф.-м.н., преподаватель, Флоридский Международный Университет, Майами, США

М.В. Войлошников, д.т.н., профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

А.Н. Дядик, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет

В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация

Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Ф.Ф. Легуша, д.ф.-м.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

В.В. Родионов, к.т.н., с.н.с., ЗАО «Си Проект»

В.Ю. Семенова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский морской государственный университет

Н.А. Тарануха, д.т.н., профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

Периодичность издания — 4 номера в год

Журнал включен в систему Российского индекса

научного цитирования (РИНЦ) <http://vak.ed.gov.ru>

Журнал включен в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук и в международную реферативную базу данных Web of Science

Рукописи представляются в редакцию в электронном виде (на диске или по электронной почте: mit-journal@mail.ru)

Учредитель - издатель: Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС72-3345

Редакция в обязательном порядке осуществляет экспертную оценку всех материалов, публикуемых в журнале

190121 г.Санкт-Петербург, ул Лоцманская д.3

Телефон/факс +7 (812) 513-04-51

e-mail: mit-journal@mail.ru

Ответственность за содержание информационных и рекламных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы и рекламодатели.

Перепечатка допускается только с разрешения редакции. Мнение редакционного совета и членов редколлегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Редакционная деятельность научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» опирается, в частности, на рекомендации Комитета по этике научных публикаций, а также на ценный опыт авторитетных международных журналов и издательств.

<http://morintex.ru/ru/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова



MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 3 (45) V.1 2019 www.morintex.ru ISSN 2073-7173, ISSN 2588-0233

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

Editorial Board

Co-chairmen

I.G. Zakharov, Doctor of Engineering, Professor, Vice-CEO ZMKB "Almaz"

G.A. Turichin, Doctor of Engineering, Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University

Council Members

E.M. Appolonov, Doctor of Engineering, General Director, Lazurit Central Design Bureau JSC

A.I. Gajkovich, Doctor of Engineering, Professor, CEO, Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Malygin I.G, Doctor of Engineering, Professor, CEO, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

G.N. Muru, PhD, Executive Director, 51 CCIS

S.A. Ogai, Doctor of Engineering, Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi

Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

V.N. Polovinkin, Doctor of Engineering, Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre

K.V. Rozhdestvenskij, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University

S.P. Stoljarov, PhD, Professor, Dean of the Faculty of naval power and automation, Saint-Petersburg State Marine Technical University

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

A.I. Gaykovich, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

D. A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

A. I. Frumen, PhD, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

P. A. Shaub, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy

Members of Editorial Staff

A.V. Alekseev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

R. V Borisov, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

Yu.A. Vlasov, PhD, Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA

Voyloshnikov M.V., Doctor of Engineering, Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi

A.N. Dyadik, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

V. A. Evteev, Doctor of Engineering, United Shipbuilding Corporation

F.F. Legusha, Dr. Sci.Phys.-Math., professor, State marine technical university of Saint-Petersburg

Yu. I. Nechayev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

V. V. Rodionov, PhD, Senior Research Scientist, CJSC "Sea Project"

V.Yu. Semenova, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

D. A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

N. A. Taranukha, Doctor of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index <http://vak.ed.gov.ru>

The magazine is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published and in the international abstract Web of Science database.

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (on CD or via E-mail: mit-journal@mail.ru)

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-3345

Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg

190121, Russian Federation

Phone/fax +7 (812) 513-04-51

e-mail: mit-journal@mail.ru

The journal is included into the list of periodicals recommended for publishing doctoral research results <http://vak.ed.gov.ru>

Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Authors and advertisers are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.

Opinion of editorial staff and editorial board may not coincide with those of the authors of publications

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

EDITORIAL BOARD of the Scientific Journal «Marine Intellectual Technologies» bases its work, in particular, on the guidelines of the Committee of Publication Ethics, as well as on the practices of influential international journals and publishers.

<http://morintex.ru/en/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova



24 августа 2019 года АО «51 Центральный конструкторско-технологический институт судоремонта» исполняется 65 лет.

От лица редакции поздравляем Вас с Юбилеем! Примите наши искренние поздравления и пожелания в дальнейшем процветании. Желаем Вам дальнейшего развития, выгодных контрактов, новых проектов и интересных задач, устойчивого финансового положения, интересных плодотворных идей и возможностей для их воплощения.

Пусть удача, успех и признание всегда будут Вашими постоянными спутниками.

С Юбилеем!

Редакция журнала
«Морские интеллектуальные технологии»





51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

Санкт-Петербург
190000, Английская наб., д. 38
Тел./факс: (812) 315 4945

Санкт-Петербург, Ломоносов
198412, ул. Михайловская, д. 14
Тел./факс: (812) 423 1600

Выполнение функций проектанта по более чем 120 проектам кораблей и судов ВМФ иностранной постройки.

Разработка технической документации для обеспечения модернизации, ремонта и сервисного обслуживания кораблей и судов ВМФ.

Разработка документов по стандартизации (ГОСТ РВ, ОСТВ и др.).

Сбор и хранение копий технических условий на продукцию, разработанную по заказам Минобороны России и поставка их исполнителям ГОЗ.





ТРУДЫ
СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

| СОДЕРЖАНИЕ | стр |
|---|-----|
| О журнале..... | 8 |
| К 70-летию Александра Исааковича Фрумена | 10 |
| ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА | |
| Бимбереков П.А. Вариант выражений для оценки параметров пропульсивного комплекса при масштабном моделировании ходкости судов с использованием самоходных моделей с двигателем гребной винт..... | 11 |
| ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА | |
| Багаев С.Н., Грачев Г.Н., Смирнов А.Л., Токарев А.О., Хомяков М.Н. Формирование микроструктуры железо-углеродистых сплавов при лазерно-плазменной обработке..... | 18 |
| Зайко Т.И., Палагушкин Б.В., Кузьмин В.И., Гуляев И.П., Сергачёв Д.В., Корниенко Е.Е. Воздушно-плазменное напыление функциональных покрытий..... | 28 |
| ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) | |
| Барановский А.М., Викулов С.В. Система защиты от вибрации экипажей скоростных судов..... | 35 |
| Барановский А.М., Ришко Ю.И., Викулов С.В. Динамические свойства распределенной виброзащитной опоры..... | 39 |
| Лебедев Б.О., Глушков С.П., Кочергин В.И. Влияние параметров рабочих процессов судовых дизелей на процессы теплообмена в камерах сгорания..... | 42 |
| Лебедев Б.О., Глушков С.П., Кочергин В.И. Оптимизация температурного режима судовых энергетических установок..... | 47 |
| Юр Г.С., Пинясов С.В. Численное исследование процесса кавитации в капле жидкости..... | 53 |
| ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ | |
| Палагушкин Б.В., Дёмин Ю.В., Садовская Л.В., Кузнецов А.Ю., Реутов С.Н. Метод определения вероятностных характеристик напряжений заземляющего устройства..... | 57 |
| Палагушкин Б.В., Дёмин Ю.В., Садовская Л.В., Кузнецов А.Ю., Реутов С.Н. Оценка долговечности энергетического оборудования по параметрам среды..... | 62 |
| Палагушкин Б.В., Дёмин Ю.В., Реутов С.Н., Кузнецов А.Ю., Жаров А.В., Гросс В.Ю. Анализ развития технических систем сталь-алюминиевых проводов воздушных линий электропередач..... | 68 |
| Бик Ю.И., Дегтярева В.В., Приданова О.В., Коновалов В.В., Бобыльская В.А., Спиренкова О.В., Тушина А.С. Повышение несущей способности портовых причальных сооружений с помощью гибких армирующих полотнищ..... | 75 |
| Иванова Е.В., Романов М.Н., Сальников В.Г. Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи по медленному изменению напряжения в замкнутых сетях 10 кВ нефтегазовых транспортных терминалов Северных регионов России..... | 81 |

CONTENTS

page

| | |
|--|----|
| About journal | 8 |
| For Aleksander I. Frumen 's 70-th anniversary | 10 |

THEORY OF SHIP AND STRUCTURES

| | |
|--|----|
| Pavel A. Bimberekov. A variant of expressions for estimating of propulsion complex parameters during scale modeling of the vessels using self-propelled models with a ship propeller propulsor..... | 11 |
|--|----|

SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

| | |
|---|----|
| Sergey N. Bagaev, Gennadiy N. Grachev, Aleksandr L. Smirnov, Alexander O. Tokarev, Maksim N. Khomyakov Iron-carbon alloys microstructure formation by laser-plasma processing..... | 18 |
| Tat'yana I. Zayko, Boris V. Palagushkin, Viktor I. Kuz'min, Igor' P. Gulyaev, Dmitriy V. Sergachev, Elena E. Kornienko. Air plasma spraying of functional coatings..... | 28 |

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

| | |
|---|----|
| Aleksandr M. Baranovskiy, Stanislav V. Vikulov Vibration protection system for high-speed vessel crews..... | 35 |
| Aleksandr M. Baranovskiy, Yurii I. Rishko, Stanislav V. Vikulov Dynamic properties of distributed anti-vibration mounts..... | 39 |
| Boris O. Lebedev, Sergei P. Glushkov, Viktor I. Kochergin Influence of parameters of working processes of ship diesels on of heat exchange processes in combustion chambers..... | 42 |
| Boris O. Lebedev, Sergei P. Glushkov, Viktor I. Kochergin Optimization of temperature condition ship power stations..... | 47 |
| Gennadiy S. Yur, Sergey V. Pinyasov Numerical investigation of cavitation process in a drop of fluid..... | 53 |

PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION

| | |
|---|----|
| Boris V. Palagushkin, Yurii V. Demin, Lyudmila V. Sadovskaya, Aleksey Yu. Kuznetsov, Sergey N. Reutov Method for determining the probabilistic characteristics of voltage of the earthing device..... | 57 |
| Boris V. Palagushkin, Yurii V. Demin, Lyudmila V. Sadovskaya, Aleksey Yu. Kuznetsov, Sergey N. Reutov Evaluating durability of power equipment by environmental parameters..... | 62 |
| Boris V. Palagushkin, Yurii V. Demin, Sergey N. Reutov, Aleksey Yu. Kuznetsov, Aleksey V. Zharov, Vladimir Yu. Gross Analysis of the steel and aluminum overhead conductor technical systems development..... | 68 |
| Yurii I. Bik, Vera V. Degtyareva, Oksana V. Pridanova, Valery V. Konovalov, Viktoriya A. Bobyl'skaya, Ol'ga V. Spirenkova, Aleksandra S. Tushina Facilities using flexible reinforcing panels..... | 75 |
| Elena V. Ivanova, Mark N. Romanov, Vasilii G. Salnikov Slow voltage change dependent conducted low-frequency electromagnetic interference in 10kv ring circuit at oil and gas transport terminals of Northern regions of Russia..... | 81 |

О ЖУРНАЛЕ

Научный журнал «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» – это электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления.

Журнал включен в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Наш журнал включен в международную реферативную базу данных Web of Science.

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов»

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 года и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте www.morintex.ru

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2015 года и с № 4(30) 2015 полные выпуски размещены в научной электронной библиотеке.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал распространяется посредством подписки в и в редакции, а также на выставках, конференциях и симпозиумах.

Соответствие рубрик в научном журнале «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» номенклатуре научных специальностей ВАК, по которым присуждаются ученые степени

| Шифр | Отрасль науки, группа специальностей | по которым присуждается ученая степень |
|----------|--|--|
| 05.08.00 | Кораблестроение | |
| 05.08.01 | Теория корабля и строительная механика | Технические |
| 05.08.03 | Проектирование и конструкция судов | Технические |
| 05.08.04 | Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства | Технические, экономические |
| 05.08.05 | Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) | Технические |
| 05.08.06 | Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие | Технические, Физико-математические |
| 05.13.00 | Информатика, вычислительная техника и управление | |
| 05.13.01 | Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) | Технические, Физико-математические |
| 05.13.06 | Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) | Технические |
| 05.13.10 | Управление в социальных и экономических системах | Технические |
| 05.13.11 | Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей | Технические, Физико-математические |
| 05.13.12 | Системы автоматизации проектирования | Технические, Физико-математические |
| 05.13.17 | Теоретические основы информатики | Технические, Физико-математические |

ABOUT JOURNAL

New scientific developments, new research results, new methods, procedures and technologies in the area of ship building, information science, computer engineering and control are published in the magazine.

The magazine is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published.

Our log is included in the international abstract Web of Science database.

In the magazine the articles shall be reviewed by leading specialists in the field of the article.

The magazine is intended for a wide range of scientists and specialists, as well as heads of scientific research and design organizations, industry, educational institutions, navy, as well as teachers, postgraduate students and students of higher educational institutions.

Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.

The magazine is circulated in Russia and abroad by subscription in Interregional Subscription Agency and in editorial office, as well as in exhibitions, conferences and symposiums.

BY the organizations' request the magazine editorial office can send any magazine issue or the whole set of magazines in general.

The magazine subject corresponds to the following specialities of scientific workers according to the list of Supreme Attestation Commission: Ship Building, Theory of Ship and Structures, Ship Designing and Structure, Technology of Ship Building, Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production, Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary), Physical Fields of Ship, Ocean, Atmosphere and Their Interaction); Information Science, Computer Engineering and Control System Analysis, Control and Processing of Information, Automation and Control of Processes and Productions, Control in Social and Economic Systems, Software for Computers, Complexes and Computer Networks, Designing Automation Systems, Foundations of Information Science Mathematical Modelling, Numerical Procedures and Software Systems).

Basic Magazine Trends

- Intelligent technologies for designing of ships and vessels, computing of design process (control and organization of designing, automated designing systems). Marine History and Equipment.
- Intelligent technologies for ship and vessel building (advanced technologies for ship building, automated systems of production preparation, robot using).
- Intelligent technologies for ship and vessel operation (ship and vessel automation systems, automated control systems, problems in ergonomics, ecology).
- Intelligent technologies in applied researches (mathematical modelling and computer experiment, theory of structures, aerohydrodynamics, thermodynamics, physical fields of ship).
- Intelligent technologies in marine and ship power engineering. Energy-saving technologies.
- Intelligent technologies of marine instrument engineering.
- Artificial intelligence in marine technologies.
- Intelligent technologies in marketing researches
- Intelligent technologies in logistics

К 70-летию Александра Исааковича Фрумена

23 сентября 2019г. исполняется 70 лет заместителю главного редактора научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» Александру Исааковичу Фрумену.

Александр Исаакович Фрумен, с отличием окончил в 1972 году Ленинградский кораблестроительный институт (ныне СПбГМТУ), где прошел путь от инженера до профессора.

В 1979 году он защитил кандидатскую диссертацию, результаты которой внедрены в ЦНИИ им.

акад. А.Н. Крылова, на ЛМЗ и ряде КБ. В 1995г. получил звание доцента. Работал заведующим отраслевой НИЛ «Прочности и надежности судовых конструкций» (1978-1996), зам. декана по НР (1982-1991), заместителем исполнительного директора Ассоциации «Океанотехника» (1991-2001) и по совместительству, ученым



секретарем факультета (2001-2007) и университета (с 2007 по н/в). Являлся руководителем актуальных научных работ: «Технология-АТПМУ», «Прототип-Отгрузка» и «Глайдер-НДС».

В 2005 году был избран на должность профессора кафедры строительной механики корабля.

Области научной и практической деятельности: Расчеты корпусных конструкций глубоководной техники; Прочность и вибрация корабельных конструкций; Статические и динамические задачи механики; Надежность и безопасность конструкций и инженерных сооружений; Вычислительная механика. Имеет более 100 печатных научных трудов (включая 17 авторских свидетельств и патентов, монографию и учебник, учебные пособия). Являясь руководителем и ответственным исполнителем НИР оборонной и важной народнохозяйственной тематики, выпустил более 60 итоговых научных отчетов. Их результаты используются на «Севмашпредприятии», в «Крыловском ГНЦ» и ЦНИИ ТС, в ЦКБ МТ «Рубин» и СПМБМ «Малахит», НПО «Дальняя связь», ЦКБ «Алмаз», ЦКБ «Айсберг» и ЦКБ «ЦКБ Лазурит», в «Северном ПКБ», на заводах «Адмиралтейские верфи» и «Балтийский завод», на ЛМЗ и ряде других предприятий. Научно-преподавательскую деятельность осуществлял также в КнаАПУ, Польше, Китае, Вьетнаме, Германии, Норвегии. Участник и организатор целого ряда международных конференций-выставок по морской тематике и математическому моделированию.

В 2004 году он принят в действительные члены Международного института морских инженеров, ученых и технологов (IMarEST, UK) и получил сертификат Чартерного инженера (SEng, UK). Член бюро секции «Строительная механика» при Доме Ученых РАН, заместитель главного редактора научного журнала «Морские интеллектуальные технологии». С 2019 года избран в член-корреспонденты Международной Академии Холода (МАХ).

**Редколлегия журнала поздравляет А.И. Фрумена с Юбилеем
и желает дальнейших творческих успехов!**

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5.016:001.892

**ВАРИАНТ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ
ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ МАСШТАБНОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ ХОДКОСТИ СУДОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОХОДНЫХ МОДЕЛЕЙ С ДВИЖИТЕЛЕМ
ГРЕБНОЙ ВИНТ****Павел Александрович Бимберек**

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры Теории корабля, судостроения и технологии материалов,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»
630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: bimberekov@yandex.ru

Аннотация

Выбор параметров пропульсивного комплекса судна, в том числе согласование характеристик двигателя и движителя, наиболее надежно осуществляется с помощью масштабных модельных испытаний в опытовых бассейнах с использованием малых самоходных моделей. Известен ряд методов для пересчета результатов обремененных масштабными погрешностями модельных испытаний на натурные суда. В качестве альтернативы представлен вариант выражений для оценки (пересчета) результатов модельных испытаний путем введения поправочных коэффициентов в виде степенной функции масштаба модели.

Выражения строятся посредством выделения идеализированных параметров, лишенных масштабных эффектов, а желаемый результат получается путем добавления к ним поправок, нейтрализующих выявленные масштабные эффекты.

Сделан вывод о том, что предложенные выражения удовлетворительно представляют масштабные погрешности, позволяют установить возможности корректировки процедуры экспериментальных исследований и наметить возможные альтернативные варианты ведения модельного эксперимента с использованием потоков жидкостей разной плотности обтекающих корпус модели и её движителя.

Ключевые слова: пропульсивный комплекс, движитель, подобие, масштабные эффекты, опытовый бассейн, модельный эксперимент, самоходные испытания.

**A VARIANT OF EXPRESSIONS FOR ESTIMATING OF PROPULSION
COMPLEX PARAMETERS DURING SCALE MODELING OF THE VESSELS
USING SELF-PROPELLED MODELS WITH A SHIP PROPELLER
PROPULSOR****Pavel A. Bimberekov**

doctor of technology, associate professor,
Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia
Shhetinkina, 33, Novosibirsk 630099, Russian Federation
e-mail: bimberekov@yandex.ru

Abstract

The choice of parameters of the propulsion complex of a vessel, including the coordination of the characteristics of the engine and propulsion unit, is carried out most reliably with the help of large-scale model tests in experimental pools using small self-propelled models. A number of methods are known for recalculating the results of model tests on full-scale vessels burdened with large-scale errors. Alternatively, a variant of expressions for estimating (recalculating) the results of model tests by introducing correction factors in the form of a power function of the model scale is presented.

Expressions are built by highlighting idealized parameters that are devoid of scale effects, and the desired result is obtained by adding corrections to them that neutralize the scale effects that were found.

It was concluded that the proposed expressions satisfactorily represent large-scale errors, allow us to establish the possibility of adjusting the experimental research procedure and outline possible alternatives for conducting a model experiment using fluid flows of different densities around the model body and its propulsion.

Keywords: propulsion complex, propulsion unit, similarity, scale effects, experimental pool, model experiment, self-propelled tests.

Введение

В опытовом бассейне моделирование ходкости судов ведется по подобию числа Фруда. Практика

моделирования включает рассмотрение как буксировку винтов в свободной воде, буксировку несамоходных моделей корпуса судна, так и испытание самоходных моделей. В последнем

случае масштабные эффекты обтекания отдельно модели гребного винта накладываются на масштабные эффекты обтекания модели корпуса судна, привнося масштабные эффекты и во взаимодействие корпуса судна и движителя. Взаимное наложение некоторых масштабных эффектов зачастую принято считать нейтрализующими друг друга. В частности считают, что увеличение попутного потока у модели по сравнению с натурным судном компенсируется увеличением попутного потока у натурального судна вследствие шероховатости корпуса. Поэтому в практике проектирования винтов, а также в практике расчётов ходкости параметры попутного потока натурального судна не корректируют по сравнению с полученными в модельном эксперименте [1, С.87].

Для заглублённых геометрически подобных при отсутствии кавитации винтов требуется выполнить условие равенства относительных поступей модели и натуре [1, С.60...64], [2, С.52], [3, С.147], [4, С.19,31], [5, С.171]

$$J_M = J_H, \quad (1)$$

при выполнении условия достаточной величины чисел Рейнольдса, [2, С.52], по [99, С.204].

При моделировании по числу Фруда из (1), учитывая численный масштаб модели гребного винта, $1/M$, имеем (у натуре подстрочный индекс «н», у модели - «м»)

$$\begin{aligned} const = J_H = V_H / (n_H D_H) &= V_M \sqrt{M} / (n_H D_M M) = \\ &= V_M / (n_H D_M \sqrt{M}) = J_M = V_M / (n_M D_M), \end{aligned} \quad (2)$$

$$n_M = n_H \sqrt{M}. \quad (3)$$

Для коэффициента упора винта в свободной воде при оговоренных выше условиях соответственно в масштабе натурального и модельного судов существует равенство [2, С.52]

$$\begin{aligned} K_{TH} = f(J_H) &= T_H / (\rho_H n_H^2 D_H^4) = \\ &= T_{M0} / (\rho_M n_M^2 D_M^4) = f(J_M) = K_{TM}, \end{aligned} \quad (4)$$

где T_H и T_{M0} – упор винта в свободной воде соответственно натурального и модели (как будет оговорено ниже последний без учёта масштабных эффектов); ρ – плотность; n – частота вращения винта; D – диаметр винта; $J = V/(nD)$ – относительная поступь винта; K_T – коэффициент упора.

В действительности выражение (4) строго не выполняется из-за наличия масштабных эффектов обтекания модели, связанных с изменением характера течения в пограничном слое окружающим лопасть винта [3, С.149], включающем и изменение величины подъёмной силы лопасти [4, С.31]. При соблюдении требований к числу Рейнольдса, (1) масштабный эффект выражается преимущественно в изменении коэффициента трения. В [4, С.47...49] оговорен ряд поправок к искомому коэффициентам момента и упора натурального гребного винта в зависимости от частоты вращения и шагового отношения у его модели. По графическим зависимостям некоторых поправок для удобства ведения оценок получены аппроксимационные выражения [6].

Цель исследования. Представить вариант зависимостей пересчёта с натуре на модель и обратно, учитывающих масштабные поправки моделирования с использованием степенной зависимости от масштаба модели. При анализе получаемых зависимостей наметить варианты модернизации процедур ведения модельных экспериментальных исследований в опытовом бассейне.

1 Построение общих выражений

Учитывая возможность существования ряда неучтённых ранее масштабных эффектов, отражающих влияние среды и процесса организации эксперимента, вместо (4), допустим наличие кроме указанных в [4, С.47...49] и прочих поправок:

$$\begin{aligned} K_{TH} = f(J_H) &= T_H / (\rho_H n_H^2 D_H^4) = T_{M0} / (\rho_M n_M^2 D_M^4) + \\ &+ \Sigma \Delta T_M / (\rho_M n_M^2 D_M^4) = \\ &= K_{TM}(J_M) + \Sigma \Delta K_{TM}(P_{PM}/D_M; n_M; C_{DM}; \text{прочие}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Sigma \Delta T_M$ - сумма поправок к упору винта модели (при нескольких движителях к суммарному упору движителей) в свободной воде, при движении движущей тележки с конкретной скоростью, вызванная масштабными эффектами от различных влияющих факторов: отклонения от геометрического подобия движителя (например, отдельных или комбинаций параметров, в частности: диаметра, D_M , значения шагового отношения, P_{PM}/D_M , от установки специальных турбулизаторов и т.д.); отклонение подобия кинематических характеристик (например, отдельных или комбинаций параметров, в частности: изменения пропорциональности скорости сходственных точек натуре и модели, изменения движения частиц жидкости в сходственных точках натуре и модели в обтекающей модели потоке, а также изменения подобия траектории частиц обтекающего потока модели по сравнению с натурой, например, скорости и направления движения частиц обтекающего движитель потока); отклонения подобия динамических характеристик (например, отдельных или комбинаций параметров, в частности: коэффициента сопротивления профиля, C_{DM} , коэффициентов упора и момента и т.д.) и прочих, в частности связанных с изменением параметров среды испытаний (например, отдельных или комбинаций параметров, в частности: вязкости, плотности, давления, изменения ускорения сил тяжести и т.д.); $\Delta K_{TM} = \Sigma \Delta K_{TM}(P_{PM}/D_M; n_M; C_{DM}; \text{прочие})$ - сумма масштабных поправок к коэффициенту упора у модели винта в свободной воде от различных влияющих факторов, перечисленных выше для $\Sigma \Delta T_M$.

Отметим, что при пересчёте сопротивления модели на натуре множителем, на который умножается сопротивление модели, является масштаб её моделирования $(1/M)$ в степени [-3,0;-2,5] [7], при этом у плохообтекаемых тел эта степень равна минус трём [8, С.330,331].

Введём степенную зависимость сопротивления от степени уменьшения модели при пересчёте сопротивления с несамходной модели, R_M , на натуру, R_H , и аналогичную зависимость для упора винта в свободной воде

$$R_H = R_M M^\theta, \quad (6)$$

$$T_H = T_M M^{\theta\epsilon}, \quad (7)$$

где θ - некоторый показатель степени ($\theta \leq 3$); T_H и T_M - упор винта и модели винта в свободной воде соответственно; $\theta\epsilon$ - некоторый показатель степени ($\theta\epsilon \leq 3$).

Возьмём во внимание, что сопротивление буксировки несамходной модели, R_M , может быть выражено суммой:

$$R_M = R_{MC} + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi}, \quad (8)$$

где R_{MC} - идеализированное сопротивление несамходной модели, без погрешностей, вызванных масштабными эффектами, например: от изменения коэффициента сопротивления трения корпуса; отклонения от полного геометрического подобия, в частности, отсутствия некоторых источников сопротивления натуре, таких как выступающие части – кронштейны, скуловые кили и т.д., присутствия дополнительных источников сопротивления и/или источников влияющих на сопротивление, например, вследствие установки специальных турбулизаторов, отсоса и подачи жидкости (возможно с изменёнными характеристиками относительно внешнего потока) в отдельных местах наружной обшивки испытуемой модели и т.д.; изменения ускорения сил тяжести; параметров набегающего потока, в частности, плотности, вязкости, предварительной турбулизованности,

наличия взвесей и т.д.; $\sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi}$ - сумма n поправок

к сопротивлению несамходной модели, вызванная масштабными эффектами, например, вследствие установки специальных турбулизаторов, изменения параметров среды испытаний (вязкости, плотности, давления), изменения ускорения сил тяжести, возможно, от отклонения от геометрического подобия модели и т.д., в частности включает усилие R_A , компенсирующее изменение коэффициента сопротивления модели по сравнению с соответствующим коэффициентом у натурального судна.

Для сопротивления самоходной модели, при движении буксирующей тележки с конкретной в общем случае и не масштабной скоростью, имеем:

$$R_{BM} = R_{MC} + \sum_{i=1}^{n+k} \Delta R_{Mi} = R_M / [1 - t_M(V_M)] = \left(R_{MC} + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} \right) / [1 - t_M(V_M)], \quad (9)$$

где $\sum_{i=1}^{n+k} \Delta R_{Mi}$ - сумма поправок к сопротивлению

несамходной модели с добавлением возможных k дополнительных поправок от взаимодействия движителей с корпусом модели и её движителей

между собой относительно $\sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi}$; $t_M(V_M)$ -

коэффициент засасывания у модели при скорости движения V_M , посредством которого принято оценивать влияние совокупности оговоренных k дополнительных поправок от взаимодействия движителей с корпусом модели.

Для упора движителя (суммарного упора движителей) модели в свободной воде, T_M , при движении буксирующей тележки с конкретной в общем случае не масштабной скоростью, имеем:

$$T_M = T_{M0} + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} - T_M = T_{M0} + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi}, \quad (10)$$

где $T_{M0} = K_{TH} \rho M^2 D_M^4$ - идеализированный упор движителя модели (при нескольких движителях берётся их суммарный упор) в свободной воде, при движении буксирующей тележки с конкретной скоростью при принятии равенства коэффициентов $K_{TM} = K_{TH}$, т.е. без погрешностей, вызванных

масштабными и прочими эффектами; $\sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi}$ -

сумма m поправок у модели винта в свободной воде (при нескольких движителях учитывается и поправка от их взаимодействия).

Для упора движителя (суммарного упора движителей) за корпусом самоходной модели, T_{BM} , при движении буксирующей тележки с конкретной в общем случае и не масштабной скоростью, обеспечивающей скорость V_{BM} в попутном потоке в месте установки движителя, имеем:

$$T_{BM}(V_{BM}) = T_{M0}(V_{BM}) + \sum_{i=1}^{m+f} \Delta T_{Mi} = \left(T_{M0}(V_{BM}) + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} \right) i_{TM}(V_M), \quad (11)$$

где $T_{M0}(V_{BM})$ - идеализированный без масштабных эффектов упор модели винта в свободной воде при скорости равной скорости подобного натуре набегающего на винт потока самоходной модели, V_{BM} , т.е. с учётом попутного

потока её корпуса; $\sum_{i=1}^{m+f} \Delta T_{Mi}$ - сумма m поправок

к упору модели винта (винтов) в свободной воде с добавлением возможных f дополнительных поправок от взаимодействия с корпусом (корпусами) модели и её движителей между собой, вызванных, в частности, масштабной неравномерностью сходящего на винт с корпуса модели потока (в существующей отечественной практике такая поправка принимается равной нулю [1, С.82]), изменением в этой связи взаимодействия движителей модели между собой по сравнению с

натурным объектом, возможно, дополнительного совместного эффекта от указанных источников частных поправок и т.д.; $\sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi}$ – то же, но без

учёта неравномерности сходящего на винт с корпуса модели потока, к которой отнесём и влияние всех прочих неучтённых поправок от взаимодействия с корпусом модели при оценке работы движителя за корпусом, поправки к сопротивлению которого, оценены коэффициентом засасывания, а также с учётом вызванных скоростей потока у корпуса; $i_{TM}(V_M)$ – значение коэффициента влияния неравномерности потока на упор движителя (движителей) в попутном потоке от корпуса судна модели при её скорости движения V_M (достаточно подробные сведения о коэффициентах неравномерности потока по упору, моменту и его смешанным оценкам по упору и моменту приведены, например, в [5, С.178,180,181,184]).

Для самоходных модели и натуре аналогично (6), (7) могут быть предложены выражения:

$$R_{HC} = R_{BM} M^{\theta_1}, \quad (12)$$

$$T_{HC} = T_{BM} M^{\theta_{e1}}, \quad (13)$$

где θ_1 и θ_{e1} - некоторые показатели степени.

Учтём, что при данной установившейся скорости судна, а у самоходной модели в режиме самохода полезная тяга (выражаемая через упор) движителя (движителей) равна сопротивлению

$$\begin{aligned} T_{HC}(J_{BH}) &\equiv T_H(J_{H1}) i_{TH}(V_H) = \\ &= R_{HC}(V_H) \equiv R_H(V_H) / [1 - t_H(V_H)], \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} T_{BM}(J_{BM}) &\equiv T_M(J_{M1}) i_{TM}(V_M) = \\ &= R_{BM}(V_M) \equiv R_M(V_M) / [1 - t_M(V_M)], \end{aligned} \quad (15)$$

где $J_{BH} = V_{BH} / (n_H D_H)$ и $J_{BM} = V_{BM} / (n_M D_M)$ - относительная поступь винта соответственно у натуре и модели с учётом попутного потока; $V_{BH} = V_H [1 - W_{TH}(J_H)]$ и $V_{BM} = V_M [1 - W_{TM}(J_M)]$

- скорость движения движителя относительно воды в зоне расположения за корпусом с учётом её изменения (падения) вследствие наличия попутного потока у натуре и модели соответственно; $J_{H1} = J_H [1 - W_{TH}(J_H)]$ и

$J_{M1} = J_M [1 - W_{TM}(J_M)]$ - относительная поступь винта соответственно для натуре и самоходной

модели с учётом попутного потока с коэффициентами $W_{TH}(J_H)$ и $W_{TM}(J_M)$ при скоростях движения V_H и V_M ; $i_{TH}(V_H)$ и $i_{TM}(V_M)$ – значения коэффициентов влияния неравномерности потока на упор движителя в попутном потоке от корпуса судна для натуре и модели соответственно при скоростях движения V_H и V_M , которые при идеализированном случае (при отсутствии масштабных эффектов) должны быть равны; $R_H(V_H)$ и $R_M(V_M)$ - сопротивление буксируемых натурного несамоходного судна без движителя и несамоходной модели соответственно при скоростях движения V_H и V_M ; $t_H(V_H)$ и $t_M(V_M)$ – коэффициенты засасывания соответственно у натуре и модели при скоростях движения V_H и V_M .

В процессе испытания буксируемой геометрически подобной самоходной модели в идеализированном случае, подразумевающим отсутствие масштабных эффектов, должна была бы иметь место зависимость для упора винта за корпусом модели, T_{BM0} :

$$\begin{aligned} T_{BM0} &= T_{M0}(J_{M1}) i_{TM}(V_M) = T_{M0}(J_{H1}) i_{TH}(V_H) = \\ &= -R_{MC}(V_M) / [1 - t_M(V_M)] = -R_{MC}(V_M) / [1 - t_H(V_H)]. \end{aligned} \quad (16)$$

Из (16), с учётом (14) имеем:

$$\begin{aligned} T_{M0}(J_{M1}) i_{TM}(V_M) &= -R_{MC}(V_M) / [1 - t_M(V_M)] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{T_{M0}(J_{M1}) i_{TM}(V_M)}{\rho_M n_M^2 D_M^4} &= \frac{-R_{MC}(V_M) / [1 - t_M(V_M)]}{\rho_M n_M^2 D_M^4} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow K_{TM}(J_{M1}) i_{TM}(V_M) &= \frac{-R_{MC}(V_M) / [1 - t_M(V_M)]}{\rho_M n_M^2 D_M^4}. \end{aligned} \quad (17)$$

При самоходных испытаниях натуре в режиме самохода и модели с масштабной по числу Фруда скоростью, опираясь на (5), учитывая (8), (11), (12), (13), (16), (17), получим взаимозависимость для коэффициентов упора винта за корпусом натурного судна K_{TBH} , за корпусом самоходной модели K_{TBM} и винта модели в свободной воде, с поступью, равной поступи винта за корпусом самоходной модели, т.е. при скорости движения самоходной модели скорректированной с учётом попутного потока, $K_{TM}(J_{M1})$:

$$\begin{aligned}
 K_{ТВН} &= \frac{T_{НС}}{\rho_H n_H^2 D_H^4} = \frac{-R_{НС}}{\rho_H n_H^2 D_H^4} \Leftrightarrow \frac{T_{ВМ} M^{\theta_{e1}}}{\rho_H n_H^2 D_H^4} = K_{ТВМ} M^{\theta_{e1}} = \frac{-R_{ВМ} M^{\theta_1}}{\rho_H n_H^2 D_H^4} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{переходя с учётом } W_T, i_T, t \text{ к эквивалентным параметрам} \\ \text{упора винта и сопротивления корпуса в свободной воде} \end{array} \right\} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \frac{T_H(J_{H1}) i_{TH}(V_H)}{\rho_H n_H^2 D_H^4} = K_{ТН}(J_{H1}) i_{TH}(V_H) = \frac{-R_H(V_H) / [1 - t_H(V_H)]}{\rho_H n_H^2 D_H^4} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \frac{T_M(J_{M1}) i_{TM}(V_M) M^{\theta_{e}(J_{M1})}}{\rho_H n_H^2 D_H^4} \frac{i_{TH}(V_H)}{i_{TM}(V_M)} = \frac{-R_M(V_M) M^{\theta(V_M)} / [1 - t_M(V_M)] [1 - t_M(V_M)]}{\rho_H n_H^2 D_H^4 [1 - t_H(V_H)]} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \frac{\left(T_{M0}(J_{M1}) + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} \right) i_{TM}(V_M) M^{\theta_{e}(J_{M1})}}{\rho_M (\rho_H / \rho_M) (n_M^2 M^{-1}) (D_M^4 M^4)} \frac{i_{TH}(V_H)}{i_{TM}(V_M)} = \\
 &= \frac{-\left(R_{MC}(V_M) + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} \right) M^{\theta(V_M)} / [1 - t_M(V_M)]}{\rho_M (\rho_H / \rho_M) (n_M^2 M^{-1}) (D_M^4 M^4)} \frac{[1 - t_M(V_M)]}{[1 - t_H(V_H)]} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \frac{T_{M0}(J_{M1}) \left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1}) \right) i_{TM}(V_M) M^{\theta_{e}(J_{M1})}}{\rho_M (\rho_H / \rho_M) n_M^2 D_M^4 M^3} \frac{i_{TH}(V_H)}{i_{TM}(V_M)} = \\
 &= \frac{-R_{MC}(V_M) \left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M) \right) M^{\theta(V_M)} / [1 - t_M(V_M)]}{\rho_M (\rho_H / \rho_M) n_M^2 D_M^4 M^3} \frac{[1 - t_M(V_M)]}{[1 - t_H(V_H)]} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow K_{TM}(J_{M1}) \frac{\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1}) \right) i_{TM}(V_M) M^{\theta_{e}(J_{M1})}}{(\rho_H / \rho_M) M^3} \frac{i_{TH}(V_H)}{i_{TM}(V_M)} = \\
 &= K_{TM}(J_{M1}) i_{TM}(V_M) \frac{\left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M) \right) M^{\theta(V_M)}}{(\rho_H / \rho_M) M^3} \frac{[1 - t_M(V_M)]}{[1 - t_H(V_H)]}. \tag{18}
 \end{aligned}$$

где $T_{НС}$ - упор винта за корпусом натурального самоходного судна с учётом попутного потока, соответствующий упору винта в свободной воде при относительной поступи величиной J_{H1} , т.е.

$T_{НС} = K_{ТН}(J_{H1} = J_H [1 - W_{ТН}(J_H)]) \rho_H n_H^2 D_H^4$; θ_1 - некоторый показатель степени у степени уменьшения модели, M , при пересчёте сопротивления корпуса самоходной модели на натуру, в первом приближении можно взять $\theta_1 \approx k_{\theta_1} \theta$ (k_{θ_1} - некоторый наперёд установленный из опыта коэффициент для данного типа корпуса, вероятно корректируемый с учётом параметров движительного комплекса); θ_{e1} - некоторый показатель степени у степени уменьшения модели, M , при пересчёте упора с модели винта самоходной модели на натуру, в первом приближении можно его взять как аналогичный у модели винта в свободной воде умноженный на некоторый наперёд установленный из опыта коэффициент $k_{\theta_{e1}}$, зависящий от параметров движительного комплекса, вероятно

корректируемый с учётом типа обводов корпуса судна; $\theta(V_M)$ - показатель степени у степени уменьшения модели, M , при пересчёте сопротивления корпуса самоходной модели на натуру с введением коэффициента засасывания через сопротивление несамоходной модели при скорости движения самоходной модели V_M ; $\theta_{e}(J_{M1})$ - показатель степени у степени уменьшения модели, M , при пересчёте упора с модели винта самоходной модели на натуру, через эквивалентный винт модели в свободной воде с учётом попутного потока корпуса самоходной модели, $W_{TM}(J_M)$, или что тоже при поступи эквивалентного винта модели в свободной воде величиной J_{M1} .

Отметим, что фиксируемое динамометрией буксировочной тележки усилие, обеспечивающее движение самоходной модели с масштабной скоростью должно быть также учтено.

2. Оценки параметров моделирования путём проработки общих выражений

Взяв в рассмотрение предпоследнее равенство из (18), учтя (16), получим:

$$\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right) \frac{i_{TH}(V_H)}{i_{TM}(V_M)} = \left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right) M^{\theta(V_M) - \theta_e(J_{M1})} \frac{[1 - t_M(V_M)]}{[1 - t_H(V_H)]}. \quad (19)$$

Разрешив (19) относительно степени уменьшения модели, имеем:

$$M^{\theta(V_M) - \theta_e(J_{M1})} = \left[\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right) / \left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right)\right] \frac{i_{TH}(V_H) [1 - t_H(V_H)]}{i_{TM}(V_M) [1 - t_M(V_M)]}. \quad (20)$$

Прологарифмировав (20) и выразив $\theta_e(J_{M1})$, приходим к равенству:

$$\theta_e(J_{M1}) = \theta(V_M) - (\lg M)^{-1} \times \lg \left[\frac{\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right) \frac{i_{TH}(V_H) [1 - t_H(V_H)]}{i_{TM}(V_M) [1 - t_M(V_M)]}}{\left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right)} \right]. \quad (21)$$

В режиме самохода модели и случае обычно принимаемого допущения о существовании равенств $t_H(V_H) = t_M(V_M)$, $i_{TH}(V_H) = i_{TM}(V_M)$ или равенстве совместного удельного влияния неравномерности потока на упор винта и эффекта засасывания у корпуса для натуре и модели, т.е. $i_{TH}(V_H)[1 - t_H(V_H)] = i_{TM}(V_M)[1 - t_M(V_M)]$, из (21) получим:

$$\theta_e(J_{M1}) = \theta(V_M) - \frac{1}{\lg M} \lg \left[\frac{\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right)}{\left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right)} \right] \quad (22)$$

В частном случае равенства поправок к упору модели винта в свободной воде при поступи J_{M1} (т.е. с учётом попутного потока с коэффициентом $W_{TM}(J_M)$ при скорости движения V_M) и поправок к сопротивлению несамоходной модели при

скорости V_M (считаем при этом, что влияние корпуса на винт ограничено коэффициентом неравномерности потока), т.е.

$$\sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1}) = \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M), \quad (23)$$

в квадратных скобках (22) получаем единицу, что приводит к равенству $\theta_e(J_{M1}) = \theta(V_M)$.

В общем случае, из (20) при известных значениях величин $\theta_e(J_{M1})$ и $\theta(V_M)$, и принятых из дополнительных соображений, величин двух из трёх дробей правой части равенства можно оценить третью дробь.

Выражения (20)-(22) могут служить основой для планирования модельных исследований по определению параметров пропульсивного комплекса судов.

Из зависимости (18) также выделим равенства:

$$\begin{aligned} K_{TH}(J_{H1}) i_{TH}(V_H) &= K_{TM}(J_{M1}) i_{TM}(V_M) \left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right) \frac{M^{\theta_e(J_{M1})}}{(\rho_H / \rho_M) M^3} \frac{i_{TH}(V_H)}{i_{TM}(V_M)} = \\ &= K_{TM}(J_{M1}) i_{TM}(V_M) \left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right) \frac{M^{\theta(V_M)}}{(\rho_H / \rho_M) M^3} \frac{[1 - t_M(V_M)]}{[1 - t_H(V_H)]}. \end{aligned} \quad (24)$$

Преобразовав зависимость (24) с использованием идеализированных для самоходной модели позиций по (1), (4), т.е. существования равенства $K_{TH}(J_{H1}) = K_{TM}(J_{M1} = J_{H1})$, получим выражение:

$$\begin{aligned} 1 &\equiv \frac{K_{TH}(J_{H1})}{K_{TM}(J_{H1})} = \left(1 + \frac{\Delta K_{TM}(J_{M1})}{K_{TM}(J_{H1})}\right) \frac{\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right)}{(\rho_H / \rho_M) M^{3 - \theta_e(J_{M1})}} = \\ &= \left(1 + \frac{\Delta K_{TM}(J_{M1})}{K_{TM}(J_{H1})}\right) \frac{\left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right)}{(\rho_H / \rho_M) M^{3 - \theta(V_M)}} \frac{i_{TM}(V_M) [1 - t_M(V_M)]}{i_{TH}(V_H) [1 - t_H(V_H)]}, \end{aligned} \quad (25)$$

где $\Delta K_{TM}(J_{M1}) = K_{TM}(J_{M1}) - K_{TM}(J_{H1})$ - фактическая разница между коэффициентами упора модели при поступи винта за её корпусом J_{M1} и поступью винта за натурным судном J_{H1} .

Принципиально возможно, исходя из (25) и предыдущего суждения о возможном равенстве показателей степени $\theta_e(J_{M1}) = \theta(V_M)$, заключить о возможности компенсировать выявленный масштабный эффект от наличия степеней

пересчёта значений сопротивления и упора модели на натуре со значением отличным от трёх увеличением плотности моделирующей среды по сравнению с натурными условиями в $M^{3 - \theta(V_M)}$ раз. Если же допустить возможность изменения плотности потока отдельно на корпусе модели и в зоне работы её винта, то таким образом можно достичь нивелирования масштабного эффекта от вариативного значения степеней пересчёта значений сопротивления и упора модели на натуре

и при отсутствии равенства показателей степени, т.е. при $\theta(J_{M1}) \neq \theta(V_M)$.

Заключение

Предложенные выражения, на наш взгляд, удовлетворительно представляют масштабные погрешности, позволяют установить возможности корректировки процедуры экспериментальных исследований и наметить возможные

альтернативные варианты ведения модельного эксперимента с использованием потоков жидкостей разной плотности обтекающих корпус модели и её движители.

Полученные выражения принципиально применимы для оценок модельного эксперимента не только для типа движителя гребной винт, но также и для других видов движителей работающих в зоне влияния корпуса судна.

Литература

1. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А.. Судовые движители учебник. Л.: Судостроение, 1988. – 296 с.
2. Эпштейн, Л.А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов. Л.: Судостроение, 1970. – 207 с.
3. Ван-Ламмерен, Троост, Конинг. [Lammeren W.P.A., Troost L., Koning J.G.]. Сопротивление, пропульсивные качества и управляемость судов: перевод с англ. Д.В. Дорогостайского, под ред. Ю.В. Кривцова и Г.А. Фирсова. Л.: Гос. союз. изд-во судпром, 1957. – 387 с.
4. Базилевский Ю.С. Исследование пропульсивных характеристик судов в опытовом бассейне. СПб.: Политехника, 2008. – 229 с.
5. Маннинг Дж., Давидсон К., Шоенхер К. [Manning G.C., Davidson K.S.M., Schoenherr K.E.] Основы корабельной архитектуры: перевод с англ. Д.В. Дорогостайского, под ред. Ю.В. Кривцова и Г.А. Фирсова. Т.2. Л.: Гос.из-во судостр. лит-ры, 1949. – 279 с.
6. Бимбереков П.А. Зависимость поправок коэффициентов упора и момента гребного винта вследствие изменения частоты вращения у моделей гребного винта // Материалы научно-практич. конф. проф.-препод. состава ун-та «Арктика-экология-транспорт». Новосибирск: Изд-во ФГБОУ ВО «СГУВТ», 2017. – С.11,12.
7. Бимбереков П.А., Паттахова Е.Р. Оценки значений степени пересчёта сопротивления с модели на натуру по значению степени уменьшения модели // Материалы научн.-практич. конф. проф.-препод. состава ун-та «Арктика-экология-транспорт». Новосибирск: Изд-во ФГБОУ ВО «СГУВТ», 2017. – С.28-30.
8. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.

References

1. Artyushkov L.S., Achkinadze A.SH., Rusetskiy A.A.. Sudovye dvizhiteli : uchebnik. L.: Sudostroenie, 1988. 296 p.
2. Ehpshteyn, L.A. Metody teorii razmernostey i podobiya v zadachakh gidromekhaniki sudov. L.: Sudostroenie, 1970. 207 p.
3. Van-Lammeren, Troost, Koning. [Lammeren W.P.A., Troost L., Koning J.G.]. Soprotivlenie, propulsivnye kachestva i upravlyaemost sudov : perevod s angl. D.V. Dorogostayskogo, pod red. YU.V. Krivtsova i G.A. Firsova. L.: Gos. soyuz. izd-vo sudprom, 1957. 387 p.
4. Bazilevskiy YU.S. Issledovanie propulsivnykh kharakteristik sudov v opytovom basseyne. SPb.: Politekhnik, 2008. 229 p.
5. Manning Dzh., Davidson K., Shoenkher K. [Manning G.C., Davidson K.S.M., Schoenherr K.E.] Osnovy korabel'noy arkhitektury: perevod s angl. D.V. Dorogostayskogo, pod red. YU.V. Krivtsova i G.A. Firsova. T.2. L.: Gos.iz-vo sudostr. lit-ry, 1949. 279 p.
6. Bimberekov P.A. Zavisimost popravok koehffitsientov upora i momenta grebnogo vinta vsledstvie izmeneniya chastoty vrashcheniya u modeley grebnogo vinta // Materialy nauchno-praktich. konf. prof.-prepod. sostava un-ta «Arktika-ehkologiya-transport». Novosibirsk: Izd-vo FGBOU VO «SGUVT», 2017. pp.11,12.
7. Bimberekov P.A., Pattakhova E.R. Otsenki znacheniy stepeni pereschyota soprotivleniya s modeli na naturu po znacheniyu stepeni umen'sheniya modeli // Materialy nauchn.-praktich. konf. prof.-prepod. sostava un-ta «Arktika-ehkologiya-transport». Novosibirsk: Izd-vo FGBOU VO «SGUVT», 2017. pp.28-30.
8. Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomakh. Tom 1. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli / Pod red. YA.I. Voytkunskogo. L.: Sudostroenie, 1985. 768 p.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.793.71.620.192.4, 621.763

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

Сергей Николаевич Багаев

Научный руководитель института
Институт лазерной физики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 15Б
e-mail: bagayev@laser.nsc.ru

Геннадий Николаевич Грачев

Заведующий лабораторией
Институт лазерной физики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 15Б
e-mail: grachev@laser.nsc.ru

Александр Леонидович Смирнов

Главный конструктор
Институт лазерной физики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 15Б
e-mail: asmir31@mail.ru

Александр Олегович Токарев

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Теории корабля, судостроения и
технологии материалов,
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: aot51@ngs.ru

Максим Николаевич Хомяков

Младший научный сотрудник
Институт лазерной физики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 15Б
e-mail: mnkhomy@laser.nsc.ru

Аннотация

Представлены результаты экспериментов по влиянию лазерно-плазменного (ЛП) воздействия на строение и микротвёрдость поверхности конструкционных сталей с различной структурой, колесной стали марки 2 для производства локомотивных бандажей и серого чугуна. В результате выявлено, что лазерно-плазменная обработка позволяет производить упрочнение поверхности конструкционных сталей до высокой (9,0-12,0 ГПа) твёрдости, на глубину около 0,8 мм. Применение ЛП обработки для упрочнения поверхности возможно на различных этапах технологического процесса изготовления или ремонта деталей машин: при обработке поверхности нормализованной или отожженной стали непосредственно после механической обработки, а также после объёмной термической обработки с различными видами отпуска на разную твёрдость, которая определяется назначением обрабатываемых изделий.

Важно, что для ЛП технологии характерно малое время теплового воздействия на поверхность, не приводящее к изменению фазовой структуры основного объёма металла и увеличению хладноломкости деталей. Предлагаемые технологии направлены на многократное увеличение ресурса наиболее ответственных деталей, определяющих основные характеристики и срок службы конечного продукта, его потребительские качества и конкурентоспособность.

Рассмотрены эффективность и перспективы внедрения лазерно-плазменных технологий в судостроительном и судоремонтном производстве для увеличения ресурса транспортных средств, оборудования и сооружений.

Ключевые слова: Лазерно-плазменная обработка, технологии упрочнения поверхности, конструкционная сталь, колесная сталь, серый чугун, поверхностная закалка

IRON-CARBON ALLOYS MICROSTRUCTURE FORMATION BY LASER-PLASMA PROCESSING

Sergey N. Bagaev

Scientific Leader of the Institute
Institute of laser physics SB RAS
630090, Novosibirsk, Ac. Lavrentyev Ave. 15B
e-mail: bagayev@laser.nsc.ru

Gennadiy N. Grachev

Head of laboratory
Institute of laser physics SB RAS
630090, Novosibirsk, Ac. Lavrentyev Ave. 15B
e-mail: grachev@laser.nsc.ru

Aleksandr L. Smirnov

Chief designer
Institute of laser physics SB RAS
630090, Novosibirsk, Ac. Lavrentyev Ave. 15B
e-mail: asmir31@mail.ru

Alexander O. Tokarev

Doctor of technology, associate professor,
Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk
630099, Novosibirsk, Shhetinkina Str. 33
e-mail: aot51@ngs.ru

Maksim N. Khomyakov

Junior researcher
Institute of laser physics SB RAS
630090, Novosibirsk, Ac. Lavrentyev Ave. 15B
e-mail: mnkhomy@laser.nsc.ru

Abstract

The results of experiments on influence of laser-plasma influence on structure and microhardness of surfaces of structural steels with various structures, wheel steel grade "2" for the production of railway wheels and grey cast iron are presented. As a result, it was revealed that laser-plasma treatment allows to make hardening of a surface of constructional steels up to 9.0-12.0 GPa of hardness, on depth about 0.8 mm. The application of laser-plasma treatment for surface hardening is possible at different stages of the technological process of manufacturing or repair of machine parts. It is important that for laser-plasma treatment technology is characterized by a small time of thermal impact on the surface, which does not lead to the change of the phase structure of the main volume of metal and increase cold brittleness. The offered technologies are directed on multiple increase of a resource of the most responsible details defining basic characteristics and service life of the final product, its consumer qualities and competitiveness. The efficiency and prospects of introduction of laser-plasma technologies in shipbuilding and ship-repairing production for increase of a resource of transport means, equipment and constructions are considered.

Key words: laser-plasma treatment, surface hardening technologies, structural steel, wheel steel, grey cast iron, surface quenching

Введение

Одним из наиболее перспективных путей решения проблемы увеличения полного и межремонтного ресурса транспортных средств является упрочнение поверхностных слоев металлов и сплавов, так как именно они определяют износостойкость пар трения, отвечающих за ресурс техники. В связи с этим, в судовом машиностроении активно развиваются и эффективно внедряются различные технологии упрочнения поверхности. Стимулом к активному исследованию и использованию в технологии металлообработки источников энергии высокой концентрации, в частности лазеров, являются новые возможности формирования поверхностной структуры, обеспечивающей повышенные эксплуатационные свойства.

В этом направлении в Институте лазерной физики СО РАН разработаны основы нового высокопроизводительного метода лазерно-плазменной (ЛП) упрочняющей модификации металлических поверхностей [1]. Лазерно-плазменный метод основан на применении пульсирующей лазерной плазмы, зажигаемой лучом CO₂-лазерной системы с высокой частотой следования импульсов (до 120 кГц).

Экспериментальными и теоретическими методами [2-4] показано, что пульсирующая

лазерная плазма обладает уникальным сочетанием свойств, недоступным для других источников энергии высокой концентрации (СВЧ, тлеющий, дуговой и непрерывный оптический разряды, пиролиз, горение). Периодическое действие лазерной плазмы на поверхность металла в легирующей атмосфере одновременно формирует:

- тепловую волну, вызывающую структурно-фазовые (например - мартенситные) превращения;
- волну диффузии, образование легированного слоя из соединений металла с легирующими элементами (нитриды, карбиды, бориды);
- гиперинтенсивный (амплитуда до 10-15 МПа) ультразвук, который создаёт термопластическое воздействие на микроструктуру в горячей зоне.

Цель работы - увеличение ресурса деталей судовой техники путём упрочнения поверхностных слоёв металлов и сплавов, так как именно они определяют усталостную прочность, износостойкость и коррозионную устойчивость деталей, отвечающих за ресурс техники и металлоконструкций.

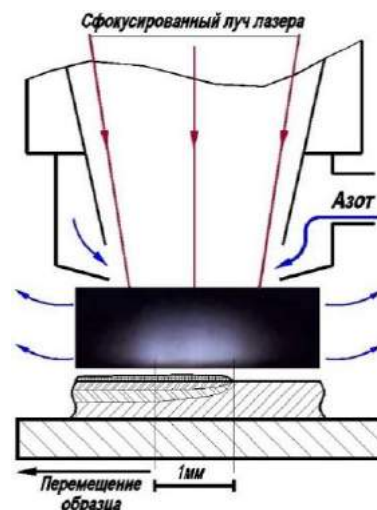
1. Методика экспериментального исследования

В качестве технологического оборудования для лазерно-плазменной обработки использовалась импульсно-периодическая CO₂-лазерная система генератор-усилитель на базе многофункционального лазера ЛОК-3МФ (рис. 1а). Применение для обработки импульсно-



а

периодического лазерного излучения средней мощностью около 2 кВт позволяет создавать на поверхности плотность мощности в десятки МВт/см². Повторяющиеся с высокой частотой следования лазерные импульсы зажигают пульсирующую лазерную плазму на поверхности обрабатываемого материала в потоке рабочего газа.



б

Рис. 1. Лазерно-плазменная технологическая установка: внешний вид (а) и схема обрабатывающей головки с наложением фотографии приповерхностной лазерной плазмы (б)

Лазерный луч, поворотными зеркалами, расположенными на перемещающихся портале и каретке программно-управляемого 2-х координатного стола, направляется на линзу лазерно-плазменной обрабатывающей головки и фокусируется на поверхности металла (рис. 1б). Такое техническое решение позволяет проводить лазерно-плазменную обработку непосредственно в атмосфере, что позволяет исключить из технологии дорогостоящие вакуумные системы.

Для увеличения глубины упрочненного слоя, повышения однородности структуры в нем, а также уменьшения доли зон отпуска обработка может проводиться со сканированием фокуса лазерного излучения в направлении перпендикулярном линейному перемещению образцов. Частота и амплитуда сканирования составляли 150-300 Гц и 3-6 мм соответственно.

Режимы лазерно-плазменного воздействия были выбраны с учётом литературных данных [5-9] и на основании результатов собственных предшествовавших исследований [2-4]. Энергия лазерного импульса составляла около 15 мДж при частоте следования импульсов 60 кГц. Излучение фокусировалось в пятно диаметром 0,8 мм, длительность пика лазерных импульсов на полувысоте составляла 0,2 мкс, таким образом пиковая интенсивность импульса достигала 14 МВт/см². В качестве рабочего газа использовался воздух или азот, давление газа на выходе из обрабатывающей головки составляло 2 атм. Скорость линейного перемещения обрабатывающей головки изменялась в пределах 5-25 мм/сек.

Область фазовых превращений в железоуглеродистых сплавах при ЛП обработке

распространяется на глубину до 0,8 мм. После прохождения луча нагретый участок оказывается в окружении холодного металла, что приводит к быстрому охлаждению и закалке [10 - 14].

Материалом исследований служили конструкционные стали и литейный чугун.

Были изготовлены образцы размером 12x60x3 мм. Микрошлифы для исследования микроструктуры после ЛП обработки готовили под углом 12° к плоскости обработанной поверхности. Поэтому на представленных микрофотографиях кажущаяся глубина рассматриваемого сечения и шероховатость поверхности увеличены в 5 раз. Твёрдость измеряли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке на индентор, создаваемой грузом 20 г, а также на сканирующем нанотвердомере НаноСкан-3D методом наноиндентирования с нагрузкой на индентор 50 мН.

2. Модификации поверхности конструкционных сталей со сканированием

Структурные превращения в дозвлектоидной стали при нагреве лазерным лучом определяются градиентом температур. На рис. 2 схематично представлен процесс структурных превращений по глубине сечения стали 40Х с феррито-перлитной структурой при ЛП обработке. На рис. 3 приведены фотографии микроструктур, полученных в характерных участках зоны лазерно-плазменного воздействия, на рис. 4 - графики изменения микротвердости по глубине зоны ЛП влияния для различных условий обработки.

Установлено, что в зоне ЛП влияния при нагреве до температур ниже Ас₁, фазовых превращений не происходит (рис. 3а).

В слое, в котором при нагреве в процессе ЛП обработки происходит неполное фазовое превращение, образование аустенита начинается по границам перлитных колоний (рис. 3б). При последующем охлаждении эти участки превращаются в мартенсит. Слои мартенсита окружают сохранившиеся перлитные участки.

К участкам, получившими закалку при охлаждении из твёрдого аустенитного состояния (ЗТС) с твёрдостью 6,0 – 7,0 ГПа, прилегает зона мартенсита, образованного закалкой из жидкого состояния (ЗЖС) с твёрдостью 11,0 – 13,0 ГПа (рис. 3в).

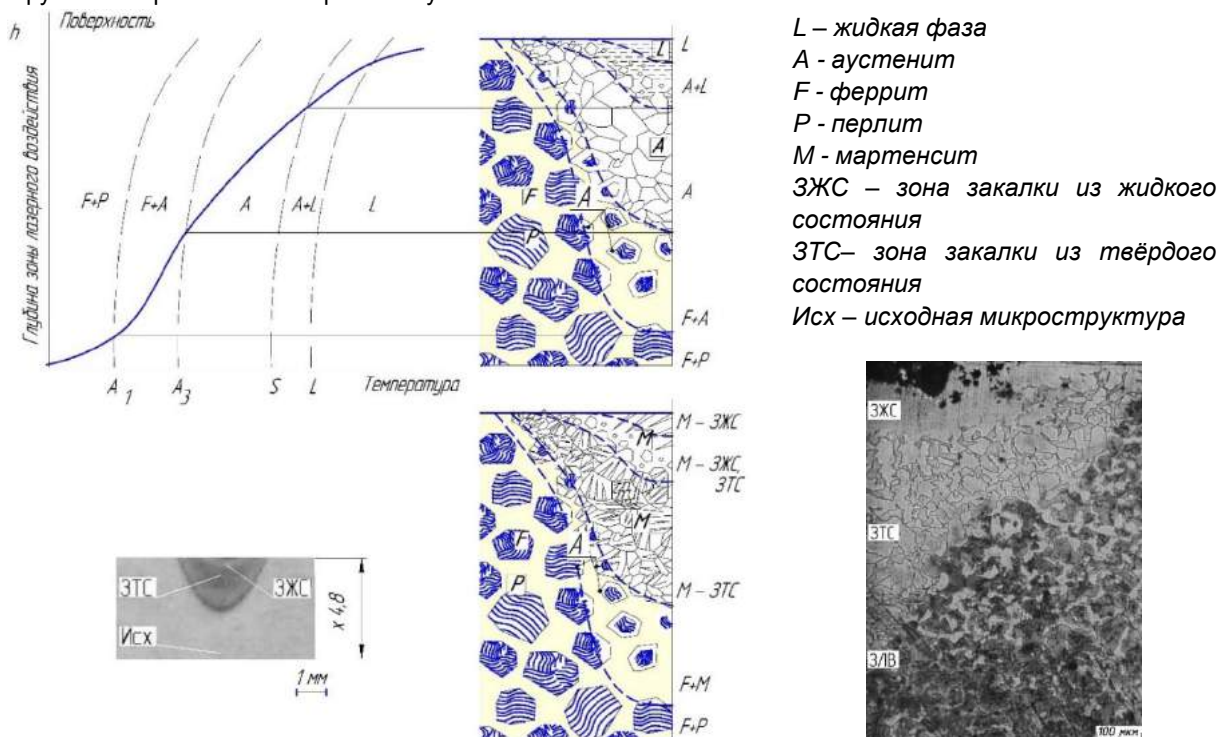


Рис. 2. Схема фазовых превращений в стали с феррито-перлитной структурой (сталь 40X) при лазерно-плазменном воздействии

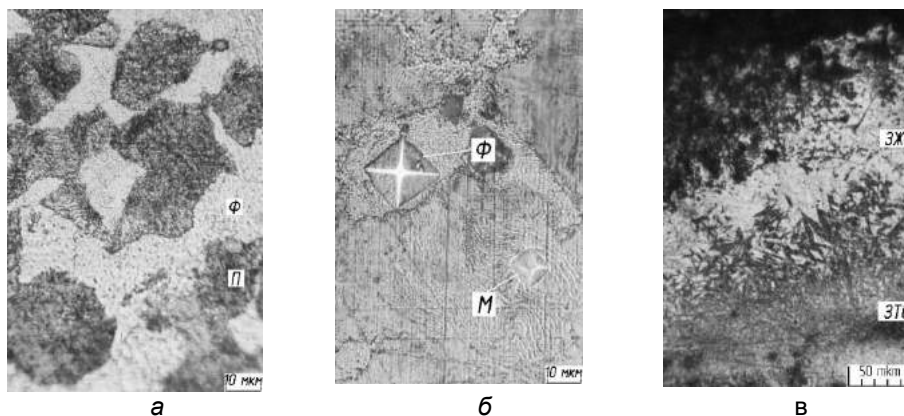


Рис. 3. Микроструктура характерных участков зоны лазерного влияния

Установленные закономерности формирования микроструктуры при ЛП обработке доэвтектоидных сталей характерны для сталей различного назначения: малоуглеродистых с высокой трещиностойкостью и хладостойкостью, конструкционных, рессорно-пружинных с высокой упругостью (рис. 5). Интересно отметить высокую твёрдость поверхностного слоя практически всех

исследованных сталей, в том числе и малоуглеродистых, которые не принимают объёмную закалку по традиционной технологии. Различия в глубине упрочнённого слоя связаны как с различной устойчивостью переохлаждённого аустенита, которая повышается при увеличении содержания углерода и легирующих элементов, так и с различиями в режимах обработки.

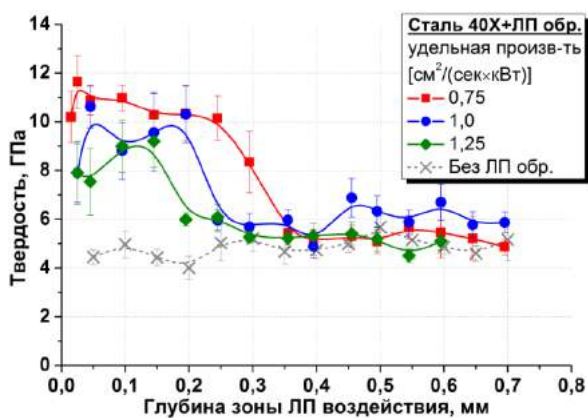


Рис. 4. Распределение твёрдости по глубине зоны ЛП воздействия для различных условий обработки (Наноскан-3D)

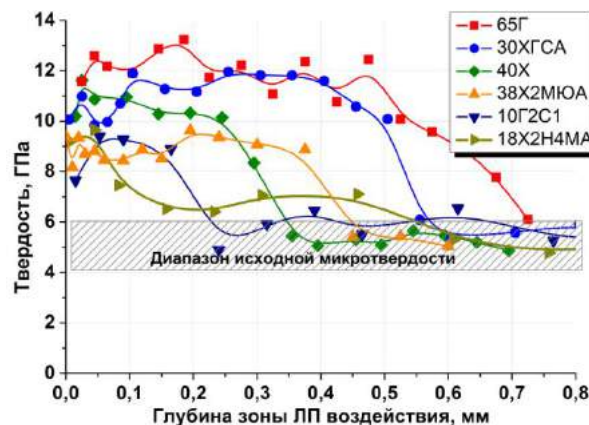


Рис. 5. Распределение твердости по глубине зоны ЛП воздействия для различных сталей (Наноскан-3D)

ЛП обработка малоуглеродистых сталей представляет особый интерес, поскольку позволяет получить твёрдый износостойкий слой на вязкой трещиностойкой поверхности основного металла. Для изучения влияния ЛП обработки на ударную вязкость сталей проведены эксперименты по ЛП упрочнению образцов низкоуглеродистых хладостойких сталей 10Г2С1 и 18Х2Н4МА с применением сканирования фокуса лазерного излучения. Из рис. 5 видно, что твердость упрочненного слоя этих сталей достигает величин 8-10 ГПа.

Измерения ударной вязкости проводили согласно ГОСТ 9454-78 на образцах типа 2 (10x7,5x55мм с концентратором U). ЛП обработка проводилась с фронтальной стороны образцов по отношению к направлению удара маятника копра. Измерения показали, что ЛП обработка не приводит к снижению ударной вязкости образцов из сталей 10Г2С1 и 18Х2Н4МА – рис. 6.

Изготовление и ремонт деталей машин с применением лазерно-плазменного упрочнения, также как и лазерной закалки, предусматривает применение этого высокоэнергетического воздействия на поверхность стальных изделий на разных этапах технологического процесса: при обработке поверхности нормализованной или

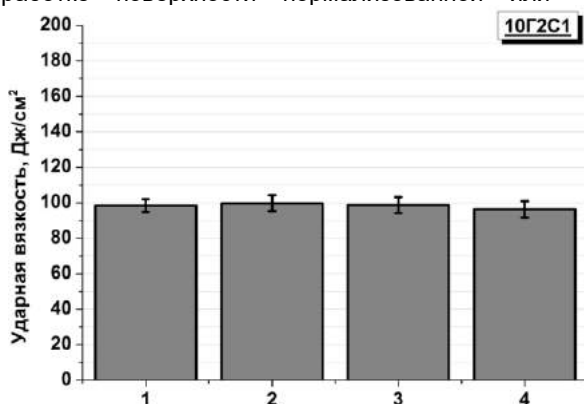
отожженной стали непосредственно после механической обработки [10- 14].

В связи с этим представляет интерес изучение влияния исходной структуры обрабатываемой стали на результат лазерно-плазменного воздействия.

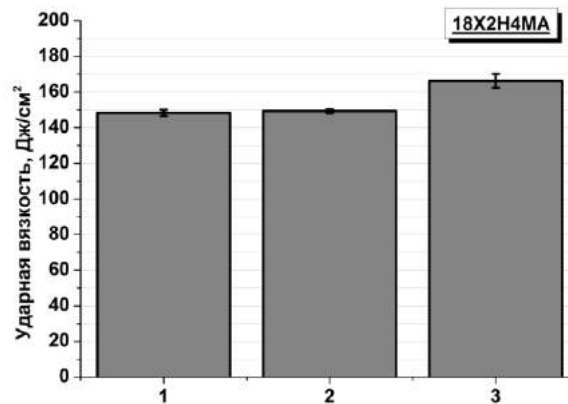
Материалом исследования служила низколегированная качественная конструкционная сталь 40ХН ГОСТ 4543-71 в состоянии поставки, а также после термической обработки закалкой с низким и высоким отпуском.

Исследования микроструктуры и микротвёрдости в закалённых зонах показали, что на их строение исходная структура заметного влияния не оказывает [15]. Эффект упрочнения получен на сталях с различной, характерной для разных этапов технологического процесса, структурой.

Таким образом, лазерно-плазменная обработка позволяет производить упрочнение поверхности конструкционной стали до высокой, 9,0- 12,0 ГПа, твёрдости, на глубину до 0,8 мм. Применение лазерно-плазменной обработки для упрочнения поверхности возможно на различных этапах технологического процесса изготовления или ремонта деталей машин.



а



б

Рис. 6. Работа удара хладостойких сталей в зависимости от удельной производительности процесса лазерно-плазменной обработки (S): 1) без ЛП обработки 2) S = 0,5 3) S = 0,3 4) S = 0,8 см²/(с·кВт)
а) сталь 10Г2С1 б) сталь 18Х2Н4МА

3. Модификации поверхности колесной стали

Проведено экспериментальное исследование по лазерно-плазменной модификации поверхности образцов изготовленных из колесной стали марки 2 по ГОСТ 398-2010 для производства бандажей колес железнодорожных локомотивов. Обработка велась со сканированием фокуса лазерного излучения. Распределение твердости по толщине упрочненного слоя в зависимости от условий обработки приведено на рис. 7а, микроструктура характерных участков в зоне ЛП воздействия на рис.7б. Исходная структура стали марки 2 представляет собой сорбит и феррит в виде разорванной сетки. В зоне неполного фазового превращения в интервале температур $A_{c1} - A_{c3}$, происходит образование мартенсита (Мзтс). По мере повышения температуры доля мартенсита увеличивается, при этом сохраняется небольшое количество феррита в виде отдельных раздробленных фрагментов. Наиболее высокая температура, вызывающая плавление материала, при ЛП обработке возникает на обрабатываемой поверхности. При быстром охлаждении в этом слое образуется мартенсит (Мзжс) с микротвёрдостью 11,0 – 15,0 ГПа.

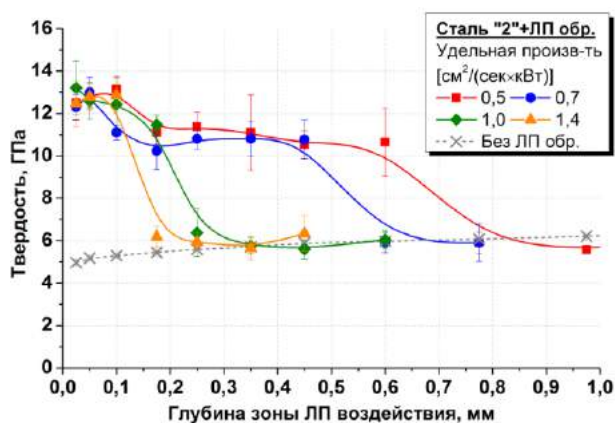
Для проведения лабораторного испытания на износ проводили ЛП обработку образцов из бандажа колеса железнодорожного локомотива в виде цилиндрических роликов диаметром 40 мм и толщиной 16 мм. Перед испытанием упрочненную поверхность роликов шлифовали до

шероховатости $Ra=0,32$ мкм. Кривые износа бандажных роликов с ЛП упрочнением и в исходном состоянии представлены на рис. 8а. Весовой износ бандажных и ответных рельсовых роликов показан на рис. 8б. Износостойкость упрочненных роликов превышает износостойкость сравнительных в ~ 10 раз, а фактический износ упрочненных образцов многократно меньше как на начальном этапе, так и за все время испытания.

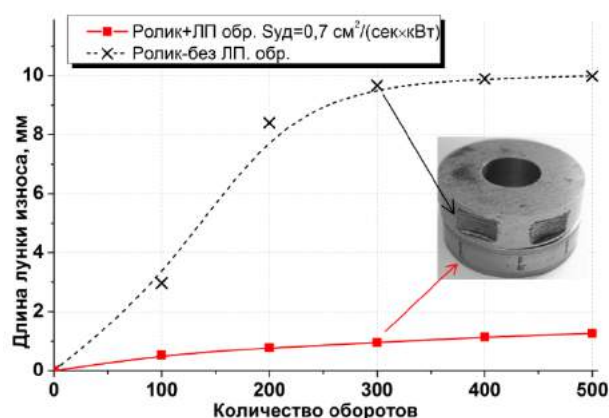
4. Модификации поверхности серого чугуна

Превращения, происходящие в металлической основе литейных чугунов, по закономерностям фазовых превращений в процессе лазерно-плазменного воздействия имеют некоторые общие закономерности с превращениями происходящим в сталях [16].

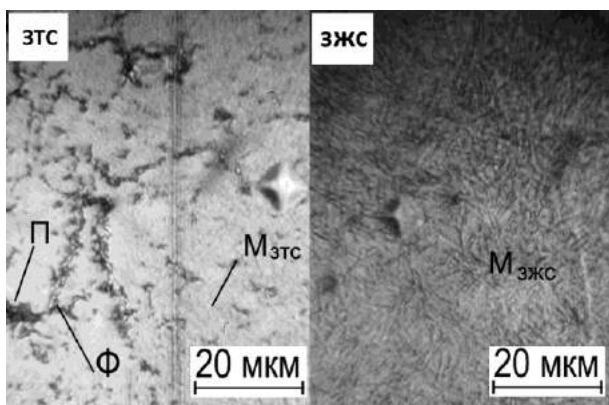
Исследование возможностей метода проведено для лазерно-плазменной модификации поверхности антифрикционного чугуна на перлитной основе марки СЧ25 с целью определения перспектив применения ЛП обработки для упрочнения втулок цилиндров двигателей внутреннего сгорания [17-18]. Для всех исследованных образцов наблюдалась модификация поверхности с образованием двух слоёв. Верхний наноструктурированный слой толщиной сотни нанометров (рис. 9а) становился высокоазотированным (до 15-25ат.% концентрации азота) и приобретал микротвёрдость в диапазоне 12-15 ГПа (рис. 10а).



а

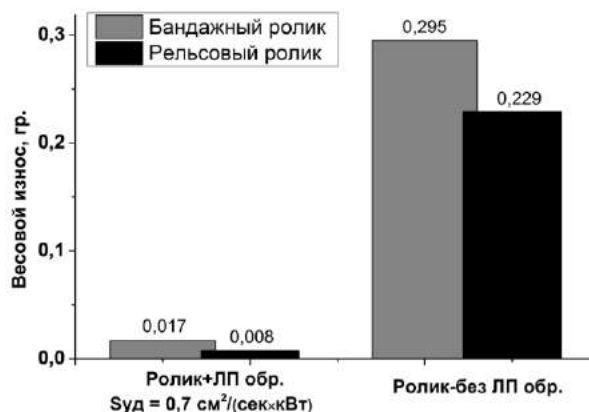


а



б

Рис. 7. а) Твердость поверхностного слоя стали марки «2» после лазерно-плазменной модификации со сканированием для различных скоростей обработки б) Микроструктура характерных участков в зоне ЛП воздействия
П - перлит, Ф - феррит, М - мартенсит

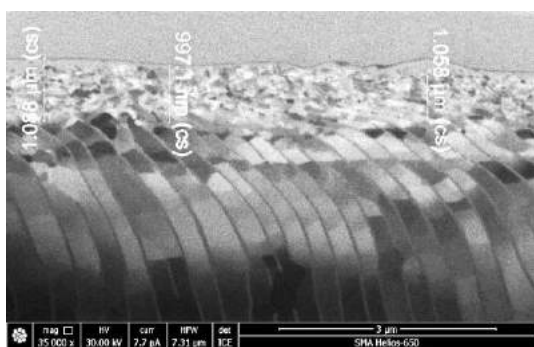


б

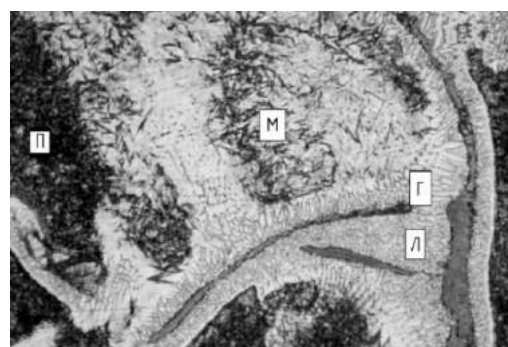
Рис. 8. а) Кривые износа бандажных роликов с ЛП упрочнением и сравнительных - без ЛП обработки и б) весовой износ бандажных и ответных рельсовых роликов после 500 циклов испытаний

К верхнему наноструктурированному слою (Рис.9б) примыкает слой, со структурой ледебурита (закалка из жидкого состояния) и мартенсита (закалка из твёрдого состояния). Причём фазовые превращения с плавлением металла начинаются закономерно вокруг графитовых включений. Это приводит к увеличению микротвёрдости до уровня 8-10 ГПа (в 3-4 раза твёрже основы) на толщине в десятки-сотни микрон. Сравнение удельной производительности лазерно-плазменной обработки чугуна СЧ25 с

традиционной лазерной закалкой непрерывным излучением показало, что производительность лазерно-плазменной обработки в 7-10 раз выше, чем у традиционной лазерной закалки [2] (рис. 10б), что объясняется 4-5 кратным превышением эффективности энергообмена между лазерной плазмой и металлом над прямым поглощением лазерного излучения и действием гиперинтенсивного ультразвука.



а



б

Рис. 9. Микроструктура чугуна СЧ25 после ЛППМ обработки: а - поперечное сечение поверхностного слоя (измерения на HELIOS NanoLab 650), б - микрошлиф в плане, на глубине ~ 80мкм (Г – графит, Л – ледебурит, М – мартенсит, П – перлит исходной структуры)

Износостойкость образцов оценивали при испытаниях на машине трения МИ-1 в паре трения «стальной диск – чугунная колодка» при смазке маслом М-14В2 ГОСТ 12337-84. Результаты испытаний представлены на рис. 11.

Лучшие триботехнические характеристики имели образцы, механически обработанные до

полного устранения шероховатостей поверхности, возникающих при ЛП обработке из-за плавления металла возле графитовых включений. В результате, для этих образцов скорость изнашивания уменьшилась в ~ 20 раз по сравнению с исходной (без ЛП обработки), а коэффициент трения уменьшился почти в два раза.

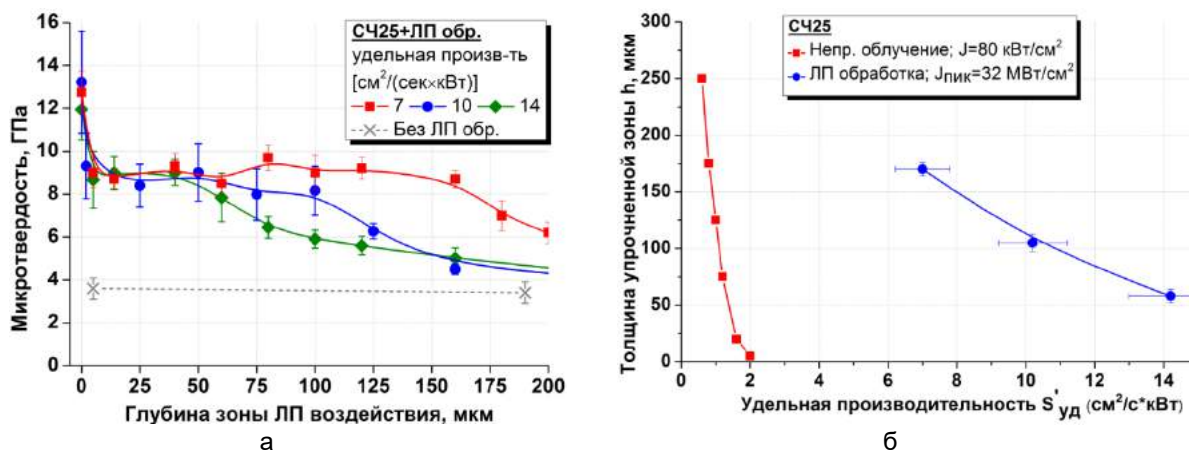


Рис. 10. Микротвёрдость (а) и глубина зоны (б) лазерно-плазменной модификации поверхности чугуна СЧ25 от удельной (на 1 кВт мощности лазера) скорости обработки (ПМТ-3М)

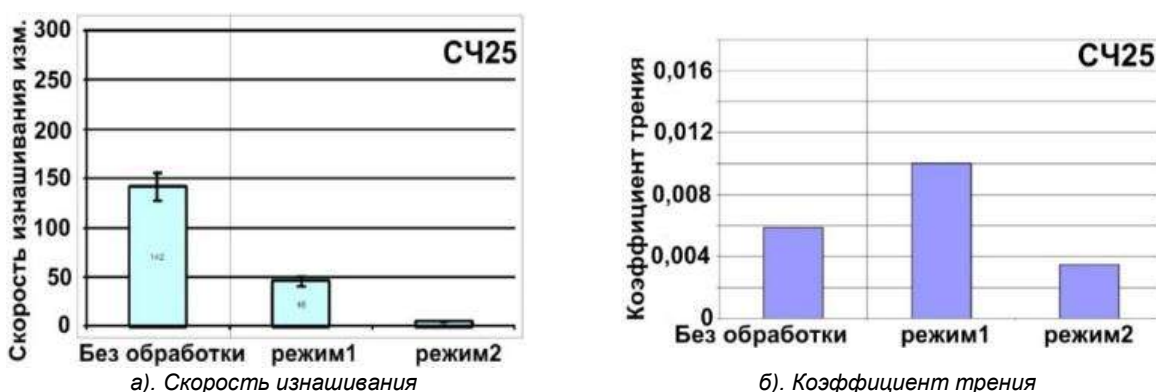


Рис. 11. Испытания на изнашивание и трение образцов из чугуна СЧ25; левый столбик - без ЛПМ обработки, режим 1 – образец после ЛПМ, режим 2 – образец после ЛПМ и механической обработки

Оценка себестоимости ЛПМ модификации поверхности втулки цилиндра двухтактных дизелей 2Д100 лазером показала, что при затратах на обработку, составляющих ~1,5% от стоимости втулки, можно получить новое качество двигателей с увеличенным до 4-5 раз ресурсом цилиндропоршневой группы [3].

Заключение

1) В результате ЛП обработки поверхности доэвтектоидных сталей различного предназначения: малоуглеродистых с высокой трещиностойкостью и хладостойкостью, конструкционных, рессорно-пружинных с высокой упругостью получен упрочненный слой с твердостью 9-12 ГПа, толщиной до 0,8 мм. Исследована микроструктура сталей после обработки.

2) При ЛП обработке поверхности хладостойких малоуглеродистых сталей 10Г2С1 и 18Х2Н4МА твердость упрочненного слоя составляет 8-10 ГПа, без снижения ударной вязкости образцов.

3) Результаты испытаний на износ показали, что бандажные образцы с лазерно-плазменным упрочнением поверхностного слоя существенно превосходят сравнительные образцы без упрочнения по характеристикам износостойкости.

Износостойкость упрочненных образцов превышает износостойкость сравнительных в 8-12 раз. Фактический износ упрочненных образцов многократно меньше как на начальном этапе, так и за все время испытания. Важно, что наличие на бандажных роликах ЛП упрочненного слоя не приводит к увеличению износа ответных рельсовых роликов, весовой износ которых также снижается в 15-27 раз т.е. наличие на бандажных роликах высокопрочного и износостойкого ЛП упрочненного слоя не приводит к увеличению износа ответных рельсовых роликов.

4) В результате ЛП модификации поверхности серого чугуна СЧ25 формируется уникальная композитная структура, состоящая из высокотвёрдого (12-15 ГПа) поверхностного слоя и промежуточного закалённого подслоя с микротвёрдостью 8-10 ГПа и толщиной в десятки сотни микрон. При этом на порядок увеличивается износостойкость и в ≈ 2 раза уменьшается коэффициент трения, что, безусловно, положительно влияет на к.п.д. двигателя и снижение расхода масла.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» проект №17-20-03197.

Литература

1. Багаев С.Н., Грачев Г.Н., Смирнов А.Л., Смирнов П.Ю. «Способ модификации металлических поверхностей и устройство» // Патент RU 425 907 С2. от 28.04.2009. Опубликовано: 10.08.2011 Бюл. № 22.
2. S.N. Bagayev, G.N. Grachev, A.G. Ponomarenko, A.L. Smirnov, V.N. Demin, A.V. Okotrub, A.M. Baklanov, A.A. Onischuk «A new method of laser-plasma synthesis of nanomaterials. First results and prospects» // Proc. SPIE, 2007, 6732-673206
3. Багаев, С.Н. О возможности использования технологии упрочнения поверхности металлов с применением лазерно-плазменной установки для наномодификации поверхностей металлов и синтеза сверхтвердых покрытий / С.Н.Багаев, Г.Н.Грачев, В.Н.Демин, А.Л.Смирнов, П.Ю.Смирнов, Т.П.Смирнова, М.Н.Хомяков // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД».- 2012.- №6.- С. 42-52
4. A.Tokarev, S. Bagaev, Z. Bataeva, G. Grachev, A. Smirnov, M. Khomyakov, A. Gerber "Laser-plasma treatment of structural steel" //Applied Mechanics and Materials, vol.788, 2015, pp.58-62.
5. Майоров В.С. Расчет параметров лазерной закалки со сканированием // Физика и химия обраб. материалов. — 1989. №1. — С.38-43.
6. Расчет размеров износостойких поверхностных слоев, получаемых лазерным упрочнением конструкционных сталей Текст. / Н.Н. Дорожкин [и др.] // Трение и износ. 1986. - Т.7, №6. - С. 1054-1061.
7. Кокора А.Н., Соболев Э.Н. Расчет толщины закаленного слоя при лазерной термообработке стали без оплавления поверхности // Инженерно-физический журнал. 1989. - Т.56, №4. - С. 632-639.
8. Гуреев Д.М., Ямщиков С.В. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов : учеб. пособие. - Самара: Изд-во «Са-мар. ун-т», 2001. - 392с.].
9. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов под ред. А.Г. Григорьянца. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. - 664с.
10. А.Н. Сафонов. Изучение структуры и твердости поверхности железоуглеродистых сплавов после их оплавления лазерным излучением. МИТОМ, 1999, №1, С. 7-10.
11. Лазерные технологии на машиностроительном заводе Текст. / Н.Г. Терегулов [и др.]. Уфа: АН Респ. Башкортостан, 1993. - 263с.
12. Об использовании технологии лазерной обработки материалов в судовом машиностроении / Г. Н. Гаврилов, Л. А. Чкалов, Э. В. Максимова, О. В. Горшков // Технология судостроения. 1989. - №5. - С. 51-52.
13. Садовский В.Д., Табатчикова Т.И., Салохин А.В., Малыш М.М. Фазовые и структурные превращения при лазерном нагреве стали. I. Влияние исходной структуры. ФММ. - 1982. - Т.3. - Вып. 1. - С. 88-94
14. Шатииков И.Р., Костромин С.В. Влияние исходной структуры стали 30ХГСА на строение и свойства поверхностного слоя после лазерного термоупрочнения //Фундаментальные и прикладные науки сего дня: Материалы Международной научно-практической конференции (Москва, 25-26 июля 2013 г.) — Т. 1. North Charleston: CreateSpace, 2013. - С. 117-120.
15. Багаев С.Н., Грачев Г.Н., Смирнов А.Л., Хомяков М.Н., Токарев А.О., Батаева З.Б., Гербер А.Ю. «Влияние предварительной термообработки конструкционной стали на эффект упрочнения при лазерно-плазменном воздействии» // Труды III Межд. научно-практической конф. «Актуальные проблемы в машиностроении», 30 марта 2016г., Новосибирск, С. 389-396.
16. С.Н.Багаев, Г.Н.Грачев, А.Л.Смирнов, М.Н.Хомяков, Л.Д.Макагон, А.О.Токарев, П.Ю.Смирнов «Применение метода лазерно-плазменной модификации поверхности металлов для улучшения триботехнических характеристик цилиндров двигателей внутреннего сгорания» //Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2014, №1(62), С. 14-23.
17. Токарев, А.О. Исследование формирования структуры рабочей поверхности цилиндров втулок судовых дизелей при лазерной обработке / А.О.Токарев, Л.Д.Макагон, Г.Н.Грачев, А.Л.Смирнов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. - 2006, №1, С. 194 – 198
18. Токарев, А.О. Улучшение триботехнических характеристик серого чугуна лазерной обработкой / А.О.Токарев //Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2012. - №1 (54). - С. 69-73.

References

1. Bagayev S.N., Grachev G.N., Smirnov A.L., Smirnov P.YU. «Sposob modifikatsii metallicheskih poverkhnostey i ustroystvo» // Patent RU 425 907 S2. ot 28.04.2009. Opublikovano: 10.08.2011 Byul. № 22.
2. S.N. Bagayev, G.N. Grachev, A.G. Ponomarenko, A.L. Smirnov, V.N. Demin, A.V. Okotrub, A.M. Baklanov, A.A. Onischuk «A new method of laser-plasma synthesis of nanomaterials. First results and prospects» // Proc. SPIE, 2007, 6732-673206
3. Bagayev, S.N. O vozmozhnosti ispol'zovaniya tekhnologii uprochneniya poverkhnosti metallov s primeneniym lazerno-plazmennoy ustanovki dlya nanomodifikatsii poverkhnostey metallov i sinteza sverkhkhtverdykh pokrytiy / S.N.Bagayev, G.N.Grachev, V.N.Demin, A.L.Smirnov, P.YU.Smirnov, T.P.Smirnova, M.N.KHomyakov // Byulleten' OUS ОАО «RZHD».- 2012.- №6.- S. 42 - 52
4. A.Tokarev, S. Bagaev, Z. Bataeva, G. Grachev, A. Smirnov, M. Khomyakov, A. Gerber "Laser-plasma treatment of structural steel" //Applied Mechanics and Materials, vol.788, 2015, pp.58-62.
5. Mayorov B.C. Raschet parametrov lazernoy zakalki so skanirovaniyem // Fizika i khimiya obrab. materialov. — 1989. №1. — S.38-43.
6. Raschet razmerov iznosostoykikh poverkhnostnykh sloyev, poluchayemykh lazernym uprochneniym konstruksionnykh staley Tekst. / H.H. Dorozhkin [i dr.] // Treniye i iznos. 1986. - T.7, №6. - S. 1054-1061.
7. Kokora A.N., Sobol' E.N. Raschet tolshchiny zakalennogo sloya pri lazernoy termoobrabotke stali bez oplavleniya poverkhnosti // Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 1989. - T.56, №4. - S. 632-639.

8. Gureyev D.M., YAmshchikov C.B. Osnovy fiziki lazerov i lazernoy obrabotki materialov : ucheb. posobiye. - Samara: Izd-vo «Sa-mar. un-t», 2001. - 392s.].
9. Grigor'yants A.G., SHiganov I.N., Misyurov A.I. Tekhnologicheskiye protsessy lazernoy obrabotki : ucheb. posobiye dlya vuzov pod red. A.G. Grigor'yantsa. - M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2006. - 664s.
10. A.N. Safonov. Izucheniye struktury i tverdosti poverkhnosti zhelezouglerodistykh splavov posle ikh oplavleniya lazernym izlucheniym. MiTOM, 1999, №1, s.7-10.
11. Lazernyye tekhnologii na mashinostroitel'nom zavode Tekst. / N.G. Teregulov [i dr.]. Ufa: AN Resp. Bashkortostan, 1993. - 263s.
12. Ob ispol'zovanii tekhnologii lazernoy obrabotki materialov v sudovom mashinostroyenii / G. N. Gavrilov, L. A. CHkalov, E. V. Maksimova, O. V. Gorshkov // Tekhnologiya sudostroyeniya. 1989. - №5. - S. 51 - 52.
13. Sadovskiy V.D., Tabatchikova T.I., Salokhin A.V., Malyshev M.M. Fazovyye i strukturnyye prevrashcheniya pri lazernom nagreve stali. I. Vliyaniye iskhodnoy struktury. FMM. - 1982. - T.3. - Vyp. 1. - S. 88 - 94
14. SHatikov I.R., Kostromin S.V. Vliyaniye iskhodnoy struktury stali 30KHGSA na stroyeniye i svoystva poverkhnostnogo sloya posle lazernogo termouprochneniya //Fundamental'nyye i prikladnyye nauki segodnya: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Moskva, 25—26 iyulya 2013 g.) — T. 1. North Charleston: CreateSpace, 2013. — S. 117—120.
15. Bagayev S.N., Grachev G.N., Smirnov A.L., KHomyakov M.N., Tokarev A.O., Batayeva Z.B., Gerber A.YU. «Vliyaniye predvaritel'noy termoobrabotki konstruktsionnoy stali na effekt uprochneniya pri lazerno-plazmennom vozdeystvii» // Trudy III Mezhd. nauchno-prakticheskoy konf. «Aktual'nyye problemy v mashinostroyenii», 30 marta 2016g., Novosibirsk, s. 389-396.
16. S.N.Bagayev, G.N.Grachev, A.L.Smirnov, M.N.KHomyakov, L.D.Makagon, A.O.Tokarev, P.YU.Smirnov «Primeneniye metoda lazerno-plazmennoy modifikatsii poverkhnosti metallov dlya uluchsheniya tribotekhnicheskikh kharakteristik tsilindrov dvigateley vnutrennego sgoraniya» //Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty), 2014, №1(62), s.14-23.
17. Tokarev, A.O. Issledovaniye formirovaniya struktury rabochey poverkhnosti tsilindrov vtulok sudovykh dizeley pri lazernoy obrabotke / A.O.Tokarev, L.D.Makagon, G.N.Grachëv, A.L.Smirnov // Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego vostoka. - 2006 №1. S. 194 – 198
18. Tokarev, A.O. Uluchsheniye tribotekhnicheskikh kharakteristik serogo chuguna lazernoy obrabotkoy / A.O.Tokarev //Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty). - 2012. - №1 (54). - S. 69-73.

УДК 621.793.71.620.192.4, 621.763

ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Татьяна Ивановна Зайко

кандидат педагогических наук, доцент, ректор
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: info@nsawt.ru

Борис Владимирович Палагушкин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Виктор Иванович Кузьмин

кандидат технических наук, доцент кафедры
Теории корабля, судостроения и технологии материалов
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Игорь Павлович Гуляев

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1
e-mail: Gulyaev@itam.nsc.ru

Дмитрий Викторович Сергачёв

кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1
e-mail: yosergach@gmail.com

Елена Евгеньевна Корниенко

Кандидат технических наук, доцент кафедры
Материаловедения в машиностроении
Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20
e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Аннотация

В настоящей работе представлены предварительные результаты разработки сверхзвукового воздушного плазмотрона для напыления порошковых материалов. Возможность реализации сверхзвукового режима истечения термической плазмы позволяет ликвидировать преимущества в получении высокоплотных покрытий таких высокоскоростных методов газотермического напыления, как детонационного и сверхзвукового газопламенного (HVOF и HVOF). А использование в качестве плазмообразующего газа обычного воздуха позволяет не только снизить стоимость и срок окупаемости оборудования, но и реализовать температурные и динамические характеристики напылительной струи, обеспечивающие условия нанесения качественных покрытий различных классов. Таким образом, работа над сверхзвуковым плазменным оборудованием направлена на создание доступной отечественной высокоскоростной технологии, способной заменить вышеуказанные методы.

Первые же эксперименты по измерению скорости частиц дисперсной фазы высокотемпературного гетерогенного потока показали, что использование сверхзвукового режима истечения термической плазмы позволило увеличить среднюю скорость напыляемых частиц более чем в 1,5 раза. Такое повышение скорости является существенным, так как приводит к увеличению кинетической энергии частиц в 3 раза. Также в работе приводится сравнение характеристик напылённых в дозвуковом и сверхзвуковом режимах покрытий из никелевых сплавов. Пористость покрытий из частиц порошка Ni-Al, сформированных со сверхзвуковыми скоростями, в 3 раза ниже, чем у покрытий, сформированных на дозвуковых режимах, и составляет менее 2%. Значительная пластическая деформация частиц порошка при соударении их с твердой подложкой или с уже затвердевшим материалом покрытия способствует также тому, что в покрытиях не наблюдаются исходных частиц.

Показана перспективность сверхзвуковых режимов напыления для получения высокоплотных покрытий. Намечены пути дальнейшего повышения скорости частиц при воздушно-плазменном напылении функциональных покрытий.

Ключевые слова: сверхзвуковой воздушный плазмотрон, гетерогенный поток, термическая плазма

Key words: supersonic air plasma jet, heterogeneous stream, thermal plasma

AIR-PLASMA SPRAYING OF FUNCTIONAL COATINGS

Tatyana I. Zayko

Ph.D. in Pedagogical Science, Associate Professor, Rector of Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: info@nsawt.ru

Boris V. Palagushkin

Dr.Sci.Tech, Professor, Department of Electric Equipment and Automation of Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Viktor I. Kuzymin

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Ship Theory, Shipbuilding and Materials Technology, Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Igor P. Gulyaev

Ph.D in Physics and Mathematics, Senior Researcher of Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 630090. Novosibirsk, st. Institutskaya, 4/1
e-mail: Gulyaev@itam.nsc.ru

Dmitry V. Sergachev

Ph.D in Physics and Mathematics, Junior Researcher of Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 630090. Novosibirsk, st. Institutskaya, 4/1
e-mail: yosergach@gmail.com

Elena E. Kornienko

Ph.D in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Materials Science in Machine-Building of Novosibirsk State Technical University 630073, Novosibirsk, K. Marx ave., 20 e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Abstract

This paper presents preliminary results of the development of a supersonic air plasmatron for spraying powder materials. The possibility of implementing a supersonic regime of thermal plasma outflow allows us to eliminate the advantages in obtaining high-density coatings of such high-velocity methods of thermal spraying, such as detonation and high-velocity oxy-fuel and air fuel spraying processes (HVOF and HVOF). And the use of ordinary air as a plasma-forming gas allows not only reducing the cost and payback period of equipment, but also realizing the temperature and dynamic characteristics of the spray jet, which ensure the conditions for applying high-quality coatings of various classes. Thus, work on supersonic plasma equipment is aimed at creating affordable domestic high-velocity technology that can replace the above methods.

The very first experiments on measuring the particle velocity of the dispersed phase of a high-temperature heterogeneous flow showed that the use of the supersonic mode of the outflow of thermal plasma made it possible to increase the average velocity of the sprayed particles by more than 1.5 times. Such an increase in velocity is significant, since it leads to an increase in the kinetic energy of particles by 3 times. The paper also compares the characteristics of nickel alloy coatings deposited in subsonic and supersonic modes. The porosity of coatings of Ni-Al powder particles formed at supersonic speeds is 3 times lower than that of coatings formed in subsonic modes and is less than 2%. Significant plastic deformation of the powder particles upon their collision with a solid substrate or with already hardened coating material also contributes to the fact that no ancestors are observed in the coatings.

The prospects of supersonic spraying modes for obtaining high-density coatings are shown. Ways to further increase the particle velocity during air-plasma spraying of functional coatings are outlined.

Keywords : supersonic air plasmatron, heterogeneous flow, thermal plasma

Введение

Газотермическое напыление является одним из наиболее быстроразвивающихся методов создания новых покрытий и материалов в прогнозируемом химическом, фазовом и структурном состоянии. Состав таких покрытий, их микроструктура и свойства определяются степенью неравновесности материала, зафиксированной на определенной стадии физико-химических превращений, протекающих в процессе его нагрева, плавления в потоке плазмы и последующей кристаллизации и охлаждении на подложке. Однако научные аспекты проблемы получения веществ в прогнозируемом неравновесном физико-химическом состоянии

исследованы недостаточно. Это связано как с большими трудностями в разработке теоретических основ формирования метастабильного состояния вещества, так и с отсутствием системных и воспроизводимых экспериментальных данных. Научная идея авторов состоит в системном анализе зависимости физических характеристик, а также фазового и структурного состояния покрытий от ключевых параметров газотермического напыления – скорости и температуры частиц перед контактом с основой.

К настоящему времени произошла специализация различных методов газотермического напыления по отдельным видам получаемых материалов и покрытий, связанная с достаточно узкими рамками реализуемых значений

скорости и температуры напыляемых частиц. Универсальность метода плазменного напыления, его высокая производительность, конкурентная стоимость оборудования и эксплуатации подтолкнули к разработке воздушного плазмотрона, генерирующего высокоскоростные плазменные потоки. Возможность реализации сверхзвукового режима истечения термической плазмы позволяет ликвидировать преимущества в получении высокоплотных покрытий таких высокоскоростных методов газотермического напыления, как детонационного и сверхзвукового газопламенного (HVOF HVAF). А использование в качестве плазмообразующего газа обычного воздуха позволяет не только снизить стоимость и срок окупаемости оборудования, но и реализовать температурные и динамические характеристики напылительной струи, обеспечивающие условия нанесения качественных покрытий различных классов.

Таким образом, работа над сверхзвуковым плазменным оборудованием направлена на создание доступной отечественной высокоскоростной технологии, способной заменить вышеуказанные методы.

В настоящей работе представлены предварительные результаты исследований по разработке сверхзвукового плазмотрона, начатые в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН в конце 2016 года.

Разработка сверхзвукового воздушного плазмотрона.

Работа по созданию высокоэффективного сверхзвукового плазмотрона ведётся на базе напылительного плазмотрона ПНК-50 (ИТПМ СО РАН), использующего в качестве плазмообразующего газа воздух [1]. Небольшое количество пропан-бутана или метана добавляется в воздух, который идёт на завесу анода плазмотрона и, при необходимости, в воздух, который используется в качестве транспортирующего и фокусирующего газов. Воздух представляет собой наиболее доступный и дешёвый рабочий газ, а добавка горючего газа предотвращает окисление анода плазмотрона и напыляемых металлических материалов. Ключевым элементом конструкции плазмотрона является оригинальный узел кольцевого ввода и газодинамической фокусировки порошка [2]. Данная схема инъекции обеспечивает ввод напыляемого порошка в осевую высокотемпературную и высокоскоростную часть плазменного потока, что значительно повышает эффективность нагрева и ускорения частиц, производительность напыления [3].

Для получения сверхзвукового потока была рассчитана геометрия узла кольцевого ввода порошка в виде сопла Лавала (рис. 1). Основные расчётные и экспериментальные характеристики исследованных вариантов сверхзвукового сопла Лавала представлены в таблице 1.

Использованные в работе варианты сопла Лавала отличались, как видно из данных таблицы, отношением диаметров выходного и критического сечений, а так же длиной критического сечения и участка ускорения потока плазмы. Так же вариант

сопла №3 отличался несколько большим давлением торможения потока плазмы на входе в сопло. При этом суммарные расходы рабочих газов (плазмообразующий, защитный (завеса анода), транспортирующий и фокусирующий) были одинаковы.

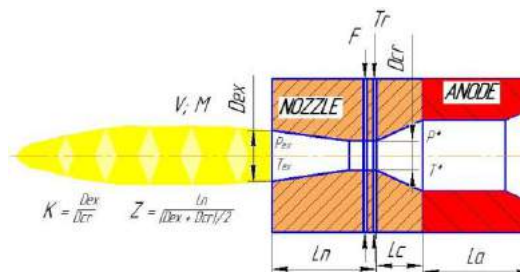


Рис. 1. Схема участка канала плазмотрона со сверхзвуковым соплом Лавала/ Обозначения: La - длина анода плазмотрона (const); Lc -длина конфузора сопла Лавала (const); Ln -длина критического сечения и участка ускорения потока плазмы; Dex -диаметр выходного сечения сопла Лавала; Dcr -диаметр критического сечения сопла Лавала; K -отношение выходного диаметра сопла Лавала к диаметру критического сечения; Z - отношение длины критического сечения и участка ускорения потока плазмы к среднему диаметру этого участка канала; V -скорость потока плазмы на срезе сопла Лавала, м/с; M -число Маха потока плазмы на срезе сопла Лавала; P* -давление торможения потока плазмы на входе в сопло Лавала, Па; T* -температура торможения потока плазмы на входе в сопло Лавала, К; Pex -давление потока плазмы на выходном срезе сопла Лавала, Па; Tex -температура потока плазмы на выходном срезе сопла Лавала, К; Tr -ввод порошка с транспортирующим газом; F -ввод фокусирующего газа

Таблица 1

Основные характеристики исследованных вариантов сопла Лавала

| № сопла | K | Z | P*, Па | T*, К | Pex, Па | Tex, К | V, м/с | M |
|---------|------|-----|---------------------|-------|---------------------|--------|--------|-----|
| 1 | 1,12 | 2,2 | 3,3×10 ⁵ | 4000 | 0,8×10 ⁵ | 3500 | 1850 | 1,5 |
| 2 | 1,12 | 4,1 | 3,3×10 ⁵ | 4000 | 0,8×10 ⁵ | 3500 | 1850 | 1,5 |
| 3 | 1,2 | 4,4 | 4,5×10 ⁵ | 4000 | 1,0×10 ⁵ | 3440 | 1870 | 1,6 |

Исследования пространственной структуры плазменной струи, а также измерения скорости и температуры дисперсной фазы в процессе напыления проводились с помощью оригинальной оптической системы экспресс-контроля, построенной на базе цифровой камеры и спектрометра видимого диапазона длин волн [4-6]. На рис. 2, а показан внешний вид струи в процессе напыления износостойкого материала Ni-Cr-Si-B-C дисперсностью 20-63 мкм. Можно видеть, что поток частиц имеет плотную структуру с углом расхождения не более 5 градусов. На рис. 2б приведено изображение начального участка струи (без порошка), на котором отчетливо видна

волновая структура сверхзвукового потока в осевой части.

Исследования характеристик напыляемых частиц в потоке термической плазмы проводились с использованием указанного выше износостойкого порошка. Мощность плазмотрона в экспериментах поддерживалась постоянной и составляла 52 кВт.

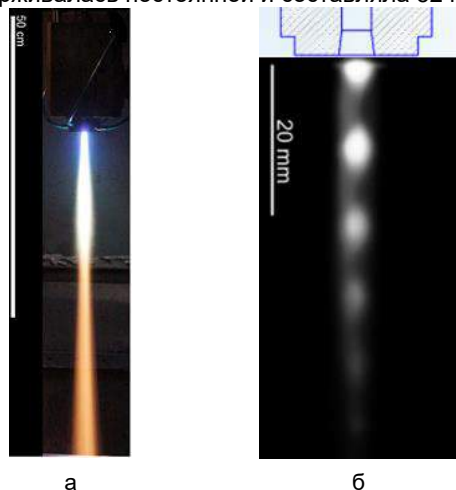


Рис. 2. Изображение сверхзвуковой плазменной струи: а-процесс напыления порошка Ni-Cr-Si-B-C, б-сверхзвуковая струя плазмы с дисками Маха

Полученные в экспериментах характеристики гетерогенного потока, на дистанции напыления (170-180 мм), представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные параметры напылительной струи на дистанции 170-180 мм

| Характеристика | Вариант сверхзвукового сопла | | |
|-----------------------|------------------------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Скорость частиц, м/с | 430 | 410 | 488 |
| Температура частиц, К | 2850 | 2730 | 2690 |
| Диаметр струи*, мм | 10,1 | 10,5 | 9,5 |

*-диаметр струи на дистанции напыления (170-180 мм), на который приходится 90% частиц

Как видно из представленных данных теплофизических исследований, отличия по температуре частиц крайне незначительны. Небольшое превышение скорости частиц получено для варианта сопла №3, что, в первую очередь, можно объяснить несколько большим давлением торможения на входе в сопло Лавалья. Таким образом, дальнейшего увеличения скорости напыляемых частиц можно добиться именно увеличением давления торможения потока плазмы, что так же следует из анализа закономерностей течения газа в сверхзвуковых соплах.

Так же необходимо отметить, что в проведённых ранее экспериментах на дозвуковом режиме, для этого же типа порошкового материала, на дистанции напыления получена скорость частиц порядка 280 м/с [7]. Таким образом, скорость частиц при сверхзвуковом режиме более чем в 1,5 раза превосходит дозвуковой режим. Такое повышение скорости является существенным, так как приводит к увеличению кинетической энергии частиц в 3 раза.

Измерения параметров частиц напыляемого материала были так же выполнены для интерметаллидного порошка системы Ni-Al (Ni – 85%, Al – 15%) фракции 40-100 мкм. Проведённые на идентичном режиме работы плазмотрона эксперименты показали, что по сравнению с дозвуковым режимом скорость частиц увеличилась практически в 1,4 раза и составила 340 м/с. Здесь необходимо отметить, что меньшие, по сравнению с частицами порошка системы Ni-Cr-Si-B-C, скорости можно объяснить значительно большей фракцией частиц.

Напыление и структура покрытий

Воздушно-плазменное напыление покрытий из порошков указанных выше материалов выполняли в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН при помощи плазмотрона ПНК-50 с узлом кольцевого ввода порошка, плазменный канал которого выполнен в виде сопла Лавалья. Напыление покрытий в сверхзвуковом режиме проводили с использованием сопла №3, т.к. именно эта геометрия канала обеспечивала наиболее стабильный режим работы.

В качестве подложки использовали образцы прямоугольной формы размером 30×10×10 мм из низкоуглеродистой стали марки 20. Ранее были определены оптимальные параметры работы плазмотрона для напыления выбранных порошков на дозвуковых режимах (таблица 3) [8; 9]. Напыление на сверхзвуковых режимах проводили аналогично. Перед напылением покрытий поверхность стальных заготовок очищали при помощи пескоструйной обработки. После напыления, для снижения уровня остаточных напряжений, проводили отжиг композиций «основной металл – покрытие» при температуре 300 °С в течение 5 часов.

Материал покрытий исследовали при помощи оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m. Объектами для структурных исследований являлись поперечные микрошлифы. Пористость оценивали при помощи программного обеспечения Axio Vision Multiphase (Carl Zeiss). Микротвердость структурных составляющих покрытий оценивали на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 10 г.

Таблица 3

Режимы плазменного напыления порошков Ni-Cr-Si-B-C и Ni-Al

| Порошок | Режимы напыления | | | |
|----------------|------------------|---------------|-------------------------|---|
| | Ток дуги, А | Напряжение, В | Дистанция напыления, мм | Состав газов |
| ПР-Н77Х15 СЗР2 | 140 | 265 | 170 | Плазмообразующий газ – воздух; защитный, транспортирующий и фокусирующий газы – смесь воздуха и пропан-бутана |
| ПН85Ю15 | 200 | 223 | 170 | транспортирующий, фокусирующий и плазмообразующий газы – воздух; защитный – смесь воздуха и пропан-бутана |

Изображение поперечного сечения полученных композиций представлено на рис. 3. Видно, что покрытия, полученные на дозвуковых режимах, состоят из расплавленных в плазменной струе или пластически деформированных частиц (рис. 3а и 3в). В покрытиях из интерметаллидного порошка Ni-Al, полученных на дозвуковом режиме, присутствуют также исходные (нерасплавленные и недеформированные) частицы (рис. 3в). Минимальная пористость, которую удалось сформировать на дозвуковых режимах, соответствует 2 % – для покрытий из порошка Ni-Cr-Si-B-C (рис. 3, а) и 6 % - для покрытий из порошка Ni-Al (рис. 3, в). Стоит отметить, что получить подобные результаты при напылении с использованием точечного поперечного ввода порошка в плазменную струю не удастся. Кроме пор, по границам сплэтов в покрытиях наблюдались оксидные пленки, что характерно для материалов, полученных термическими способами напыления.

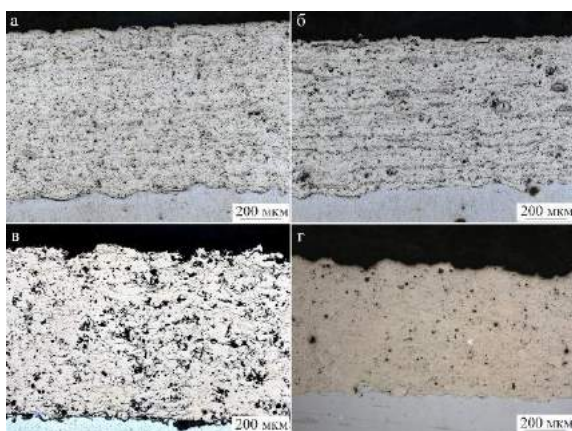


Рис. 3. Структура плазменных покрытий из порошка Ni-Cr-Si-B-C (а, б) и Ni-Al (в, г), сформированных на дозвуковых (а, в) и сверхзвуковых (б, г) режимах.

Предполагалось, что увеличение скорости частиц при плазменном напылении позволит получить более плотный материал покрытий. Это, в свою очередь, должно сопровождаться увеличением твердости, и, как следствие, износостойкости. Из-за эффекта динамического прессования пористость покрытий должна быть закрытой, что позволит повысить такие характеристики, как коррозионную стойкость и жаростойкость.

Изображение покрытий, полученных на сверхзвуковых режимах, представлено на рис. 3б и 3г. Видно, что пористость покрытий из порошка Ni-Cr-Si-B-C, полученных на сверхзвуковых режимах, осталось на том же уровне – около 2% (рис. 3б). Стоит отметить, что поры расположены не только в стыках между сплэтами. Отчетливо видно, что между напыляемыми слоями расположены протяженные дорожки из микропор. Это может свидетельствовать о перегреве материала в плазменной струе.

Пористость покрытий из частиц порошка Ni-Al, сформированных со сверхзвуковыми скоростями, в 3 раза ниже, чем у покрытий, сформированных на дозвуковых режимах, и составляет менее 2% (рис. 3г). Значительная пластическая деформация частиц порошка при соударении их с твердой подложкой или с уже затвердевшим материалом покрытия способствует также тому, что в покрытиях не наблюдается исходных частиц.

Микротвердость покрытий из порошка Ni-Cr-Si-B-C не изменяется и составляет 600...700 HV. Результаты дюрометрических испытаний показали, что значения микротвердости покрытий из порошка Ni-Al, полученных на дозвуковых режимах, достигают 470 HV, тогда как на сверхзвуковых режимах они ниже – 353 HV. Более высокие значения микротвердости покрытий, полученных на дозвуковых режимах можно объяснить присутствием фазы Ni₅Al₃, которая характеризуется более высокими характеристиками твердости.

Промышленная реализация результатов исследований

На базе плазмотрона «ПНК-50» разработана и изготовлена полнокомплектная промышленная установка плазменного напыления «Термоплазма 50-03» (рис. 4), которая может реализовывать возможности сверхзвукового воздушно-плазменного напыления. Установка включает в себя источник питания, пульт управления, модуль переключений с блоком запуска, два порошковых дозатора и блок автономного охлаждения плазмотронов. Установка комплектуется двумя плазмотронами, которые могут использоваться как в ручном, так и в механизированном вариантах. Канал одного из плазмотронов собран для напыления металлических порошков, второго плазмотрона – для напыления керамических порошков. Переключение электропитания, охлаждения, газоснабжения, блока запуска и подачи порошка с одного плазмотрона на другой производится дистанционно с пульта управления.



Рис. 4. Установка плазменного напыления порошковых материалов «Термоплазма 50-03»

Выводы

Разработана конструкция электродугового плазмотрона для напыления порошковых материалов, реализующего сверхзвуковой режим истечения плазменной струи. Работа выполнена на основе напылительного плазмотрона ПНК-50, оснащенного узлом кольцевого ввода порошка. В качестве плазмообразующего газа используется воздух. Небольшое количество пропан-бутана или метана добавляется в воздух, который идет на завесу анода плазмотрона и, при необходимости, в воздух, который используется в качестве транспортирующего и фокусирующего газов. Показана перспективность сверхзвуковых режимов напыления для получения высокоплотных покрытий. Намечены пути дальнейшего повышения скорости частиц при воздушно-плазменном напылении функциональных покрытий.

Литература

- 1 Кузьмин, В.И. Новые возможности технологии плазменного напыления износостойких покрытий / В.И. Кузьмин, С.Н. Григорьев, О.Б. Ковалёв, А.А. Михальченко, Н.А. Руденская, Н.Г. Соколова, В.М. // -Трение и износ. -2013. -Т.34. -№3. -С. 221-226.
- 2 Kuzmin, V.I. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V.I. Kuzmin, A.A. Mikhal'chenko, O.B. Kovalev, E.V. Kartaev, N.A. Rudenskaya // -Journal of Thermal Spray Technology. -2012. -21. -P.159-168.
- 3 Solonenko, O.P. Interphase momentum and heat exchange in turbulent dust-laden plasma jet under continuous radial powder injection / O.P. Solonenko, A.V. Smirnov, and A.L. Sorokin, // Flow Dynamics: The Second International Conference on Flow Dynamics, 16-18 November, 2005, M. Takuyama and S. Maruyama Ed., AIP Conference Proceedings, Vol. 32, Malville, New York, 2006, p 375-382.
- 4 Dolmatov, A.V. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A.V. Dolmatov, I.P. Gulyaev, P.Yu. Gulyaev, V.I. Jordan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, V. 110, 012058
- 5 Ермаков, К.А., Система оптического контроля скорости и температуры частиц в технологиях газотермического напыления / К.А. Ермаков, А.В. Долматов, И.П. Гуляев // -Вестник Югорского государственного университета. -2014. -№ 2 (33). -С.56-68.
- 6 Долматов, А.В. Автоматизация теплофизических исследований процесса газотермического напыления покрытий / А.В. Долматов, И.П. Гуляев, Е.А. Лысков, В.О. Москаленко // -Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. -2016. -№6. -С. 192-201.
- 7 Dolmatov, A.V. Analysis and optimization of gas-thermal spray process in terms of condensed phase velocity and temperature / A.V. Dolmatov, I.P. Gulyaev, V.I. Kuzmin, E.A. Lyskov, K.A. Ermakov // -Thermophysics and Aeromechanics. -2017. -Vol. 24. -No. 1. -pp. 83-94.
- 8 Kornienko, E. Researches structure and properties of self-fluxing coating, obtained by air-plasma / E. Kornienko, A. Smirnov, V. Kuz'min // *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 698, pp. 405-410. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.405.
- 9 Kornienko, E.E. Effect of plasma spraying regimes on structure and properties of Ni₃Al coatings / E.E. Kornienko, D.O. Mul', O.A. Rubtsova, S.P. Vaschenko, V.I. Kuzmin, I.P. Gulyaev, D.V. Sergachev // *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, Vol. 23, iss. 6, pp. 919-927. doi: 10.1134/S0869864316060147.

References

1. Kuz'min, V.I. Novye vozmozhnosti tekhnologii plazmennogo napyleniya iznosostoykikh pokrytiy / V.I. Kuz'min, S.N. Grigor'ev, O.B. Kovalev, A.A. Mikhal'chenko, N.A. Rudenskaya, N.G. Sokolova, V.M. // -Trenie i iznos. -2013. -T.34. -№3. -S. 221-226.
2. Kuzmin, V.I. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V.I. Kuzmin, A.A. Mikhal'chenko, O.B. Kovalev, E.V. Kartaev, N.A. Rudenskaya // -Journal of Thermal Spray Technology. -2012. -21. -P.159-168.
3. Solonenko, O.P. Interphase momentum and heat exchange in turbulent dust-laden plasma jet under continuous radial powder injection / O.P. Solonenko, A.V. Smirnov, and A.L. Sorokin, // Flow Dynamics: The Second International Conference on Flow Dynamics, 16-18 November, 2005, M. Takuyama and S. Maruyama Ed., AIP Conference Proceedings, Vol. 32, Malville, New York, 2006, p 375-382.
4. Dolmatov, A.V. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A.V. Dolmatov, I.P. Gulyaev, P.Yu. Gulyaev, V.I. Jordan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, V. 110, 012058
5. Ermakov, K.A., Sistema opticheskogo kontrolya skorosti i temperatury chastits v tekhnologiyakh gazotermicheskogo napyleniya / K.A. Ermakov, A.V. Dolmatov, I.P. Gulyaev // -Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. -2014. -№ 2 (33). -S.56-68.

6. Dolmatov, A.V. Avtomatizatsiya teplofizicheskikh issledovaniy protsessa gazotermicheskogo napyleniya pokrytiy / A.V. Dolmatov, I.P. Gulyaev, E.A. Lyskov, V.O. Moskalenko // -Mnogoyadernye protsessory, paral-lel'noe programmirovaniye, PLIS, sistemy obrabotki signalov. -2016. -№6. -S. 192-201.
7. Dolmatov, A.V. Analysis and optimization of gas-thermal spray process in terms of condensed phase velocity and temperature / A.V. Dolmatov, I.P. Gulyaev, V.I. Kuzmin, E.A. Lyskov, K.A. Ermakov // -Thermophysics and Aeromechanics. -2017. -Vol. 24. -No. 1. -pp. 83-94.
8. Kornienko, E. Researches structure and properties of self-fluxing coating, obtained by air-plasma / E. Kornienko, A. Smirnov, V. Kuz'min // *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 698, pp. 405-410. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.405.
9. Kornienko, E.E. Effect of plasma spraying regimes on structure and properties of Ni₃Al coatings / E.E. Kornienko, D.O. Mul', O.A. Rubtsova, S.P. Vaschenko, V.I. Kuzmin, I.P. Gulyaev, D.V. Sergachev // *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, Vol. 23, iss. 6, pp. 919-927. doi: 10.1134/S0869864316060147.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 629.12

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРАЦИИ ЭКИПАЖЕЙ СКОРОСТНЫХ СУДОВ

Александр Михайлович Барановский

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
теоретической и прикладной механики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: baranovsky@rambler.ru

Станислав Викторович Викулов

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сопротивления материалов и подъёмно-
транспортных машин
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: vikulov-51@mail.ru

Аннотация

Приводятся исследования весьма интересных виброизолирующих опор, обладающих достаточной жесткостью и при том парадоксально эффективных, особенно в зоне высоких частот (выше 90 Гц). Кроме того, к значительному преимуществу таких устройств можно отнести их цельнометаллическую конструкцию, что выгодно выделяет их из ряда резинометаллических и резиновых виброизоляторов. Однако, приведенные факторы, влияющие на их эффективность, не кажутся исчерпывающими, что создает сложности с выбором направления для повышения эффективности таких подвесок. Статья ставит целью дополнить проведенные исследования и определить ключевые направления для улучшения распределенных опор.

Для повышения эффективности подобных подвесок представляется целесообразным изучать и оптимизировать именно основания, их конструкцию, распределение масс и способы крепления к фундаментам с целью управления параметрами собственных частот.

Ключевые слова: распределенная виброзащитная опора, цельнометаллическая конструкция; резинометаллические и резиновые виброизоляторы.

VIBRATION PROTECTION SYSTEM FOR HIGH-SPEED VESSEL CREWS

Aleksandr M. Baranovskiy

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: baranovsky@rambler.ru

Stanislav V. Vikulov

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: vikulov-51@mail.ru

Abstract

The research focuses on a navigator's seat of a planing boat or a hydrofoil vessel. On modern vessels, an operator's and passenger's position can be modified by adjusting the angle of slope of the back and the seat of a chair. When sitting the upper part of the body rests firmly on the seat, which can lead to spinal injuries in case of unexpected vertical shakes. This problem makes the operator fend off these shakes, which involves the tension of large muscle groups and causes quick fatigue. That can be the cause of accidents as it distracts the navigator. Besides fewer workers and passengers wish to use these vessels. Existing seat protectors consist of a spring and a vibration damper or based on the polyurethane mass. Coulomb friction in any damper depends on the design and can be the cause of a strong vibration at high frequencies, fatiguability and occupational health diseases of the blood vessels and nervous system.

The attached mass of the protective device in terms of density and elastic modulus corresponds to the dynamic characteristics of a person in a sitting position, and being involved into the vibration, works as an impulse neutralizer with distributed parameters in a wide range of frequencies.

Key words: vessel vibration, navigator's seat, containment vessel, liquid sloshing, vessel vibroprotection

Введение

Для решения проблемы виброизоляции на скоростных судах необходимо устройство, состоящее из упругой оболочки заполненной жидкостью и газом и находящейся в плотном контакте с оператором. Оболочка располагается под оператором и составляет единое целое с его массой. Энергоёмкость соединения массы оператора и массы оболочки резко возрастает, и ударные нагрузки становятся неопасными. Давление жидкости в оболочке создаётся гидростатическим напором из расширительной ёмкости расположенной над оператором.

Исследования показали [1, 4, 5], что частоты наибольших колебаний тела образуют три группы. Низкочастотная область включает массивные части тела и по своим проявлениям является общей вибрацией.

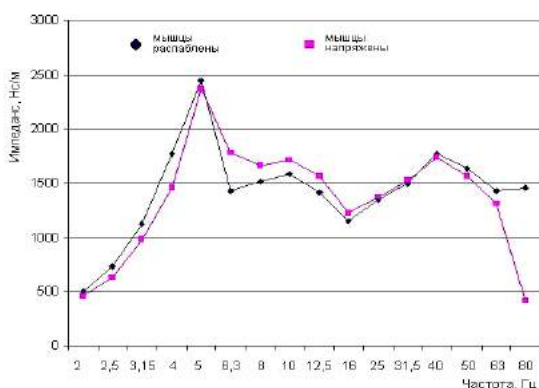


Рис. 1. Импеданс сидящего человека

Моделирование методом конечных элементов даёт близкий результат. Закрепление модели проводилось по сиденью и по ступням и показало формы и частоты, приведенные на рис. 2.

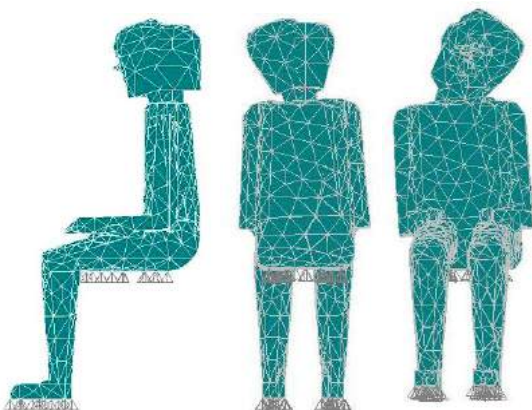


Рис. 2. Продольные колебания корпуса (7,93 Гц); поперечное раскачивание головы (10,32 Гц); вращение головы (21,1 Гц)

Импеданс показывает работу сил вязкого сопротивления и характеризует амплитуду колебаний оператора в целом. Наиболее опасным

и неприятным является диапазон частот 4-6 Гц, затем выделяется диапазон 8-10 Гц и диапазон 30-50 Гц. Именно снижение общей вибрации сидящего человека является объектом исследования.

Для снижения вибрации оператора используем динамическое гашение колебаний. Из конструкций пригодных для виброзащиты рассмотрим оболочку тора. Для тора, лежащего на сиденье оператора наиболее характерно сжатие в направлении оси совпадающей с направлением веса.

Жесткость, обусловленная деформацией сечения [2] равна

$$c = P \pi D.$$

Предварительная оценка эффективности сиденья с диаметром тора 0,4 м, при давлении 10000 Па, что соответствует высоте водяного столба 1 м показала жесткость 12560 Н/м, собственную частоту колебаний оператора 2 Гц. Частотное отношение для первого резонанса равно 2,5, эффективность защиты более 6. Для последующих резонансов также находится соответствующая частота собственных колебаний.

Внутреннее давление в упругом элементе можно создать жидкостью поступающей из расширительного объема. Размер упругого элемента должен соответствовать области использования и не превышать габарит сиденья в плане [3]. Для упругого элемента в виде тора целесообразно применить камеру колеса легкового автомобиля (рис. 3).

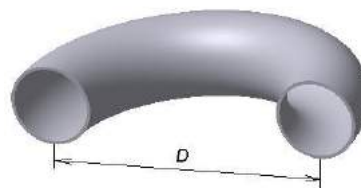


Рис. 3. Сечение тора

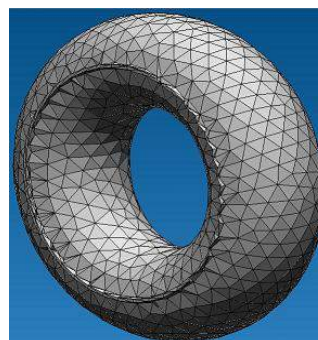
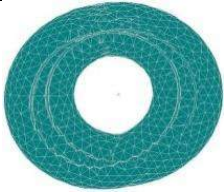

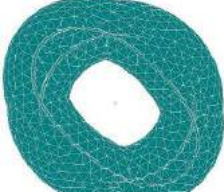


Рис. 4. Сетка модели антивибратора

Рассмотрим спектр собственных частот. При совпадении вынуждающей частоты с одной из собственных частот развиваются внутренние колебания, которые рассеивают энергию. Используем модель из конечных элементов (рис. 4) для получения спектра. Внутренний объем модели заполнен массой жидкости.

Таблица 1
Частоты антивибратора

| № | Частота, Гц | Форма колебаний |
|------|-------------|---|
| 1 | 5,318 |  |
| 2, 3 | 7,082 |  |
| 4 | 8,16 |  |

Общая характеристика спектра показывает уплотнение высоких частот и усложнение соответствующих форм. Это является предпосылкой широкополосной виброизоляции оператора.

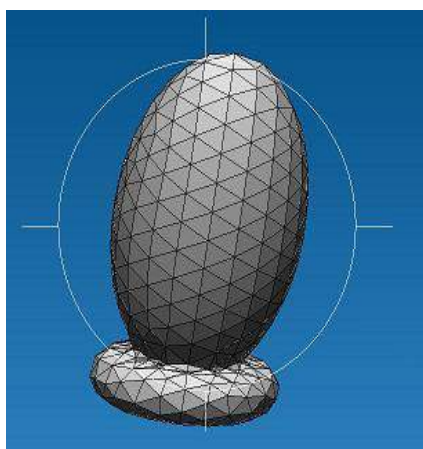


Рис. 5. Конечно-элементная модель интегрированной системы защиты

Принцип построения системы интегрированной с человеческим телом использует непрерывные вязкоупругие модели. В работе [2] показано, что человеческое тело в положении сидя может быть заменено эллипсоидом вращения. Критерий выбора формы был основан на хорошем совпадении спектра частот эллипсоида и экспериментального спектра человека. Модели оператора заменим конечным числом элементов

для расчета основной частоты колебаний. Рассмотрим систему из двух инерционно-упругих тел соединенных между собой. Подготовленная к расчету модель состоит из объемных конечных элементов (рис. 5).

Закрепим модель по нижнему основанию, на котором предусмотрено специальное место, и проведем расчет собственных частот. Результаты расчета поместим в табл. 2

Таблица 2
Частоты защитного устройства

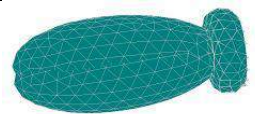
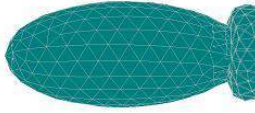

| № | Частота, Гц | Форма колебаний |
|---|-------------|---|
| 1 | 0,675 |  |
| 2 | | |
| 3 | 1,927 |  |
| 4 | 3,22 |  |



Рис. 6. Общий вид кресла

Из результатов моделирования видно, что защитное устройство понижает первую частоту. Весь спектр частот смещается вниз и не пересекается с частотами вынуждающих сил. Частоты 1- 4 характеризуются раскачиванием корпуса оператора. Частоты 5 и 6 соответствуют колебаниям головы. Частоты 7-9 связаны с колебаниями внутренних органов. Частоты 10-16 нельзя сопоставить с антропоморфной моделью оператора из-за сложности формы, но можно предположить, что это колебания поворотного типа и колебания верхних конечностей.

Литература

1. ГОСТ 12.4.094-88 ССБТ. Вибрация. Динамические характеристики тела человека при воздействии вибрации. Методы определения.
2. Пахомова, Л.В. Интегрированная система снижения вибрации рабочего места оператора: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05: защищена 12.11.09: утв. 24.06.10 / Пахомова Людмила Владимировна. -Новосибирск: 2010. - 134 с. -Библиогр.: с. 127-131. -04201052268.
3. ГОСТ 21889-76. СЧМ. Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования
4. ГОСТ ИСО 10326-1-2002 Вибрация. Оценка вибрации сидений транспортных средств по результатам лабораторных испытаний. Часть 1. Общие требования.
5. ИСО 5982:2001 Вибрация и удар - Диапазон идеализированных характеристик для описания биодинамического отклика сидящего человека на воздействие вибрации в вертикальном направлении.

References

1. GOST 12.4.094-88 SSBT. Vibratsiya. Dinamicheskie kharakteristiki tela cheloveka pri vozdeystvii vibratsii. Metody opredeleniya.
2. Pakhomova, L.V. Integrirovannaya sistema snizheniya vibratsii rabocheho mesta operatora: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.08.05: zashchishchena 12.11.09: utv. 24.06.10 / Pakhomova Lyudmila Vladimirovna. -Novosibirsk: 2010. -134 s. -Bibliogr.: s. 127-131. -04201052268.
3. GOST 21889-76. SChM. Kreslo cheloveka-operatora. Obshchie ergonomicheskie trebovaniya
4. GOST ISO 10326-1-2002 Vibratsiya. Otsenka vibratsii sideniy transportnykh sredstv po rezul'ta-tam laboratornykh ispytaniy. Chast' 1. Obshchie trebovaniya.
5. ISO 5982:2001 Vibratsiya i udar - Diapazon idealizirovannykh kharakteristik dlya opisaniya bio-dinamicheskogo otklika sidyashchego cheloveka na vozdeystvie vibratsii v vertikal'nom napravlenii.

УДК 629.12

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ ОПОРЫ

Александр Михайлович Барановский

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
теоретической и прикладной механики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: baranovsky@rambler.ru

Юрий Иванович Ришко

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов и подъёмно-транспортных машин

Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: rishko@nsawt.ru

Станислав Викторович Викулов

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сопротивления материалов и подъёмно-транспортных машин

Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: vikulov-51@mail.ru

Аннотация

Приводятся исследования весьма интересных виброизолирующих опор, обладающих достаточной жесткостью и при том, парадоксально эффективных, особенно в зоне высоких частот (выше 90 Гц). Кроме того, к значительному преимуществу таких устройств можно отнести их цельнометаллическую конструкцию, а также отсутствие необходимости подвода какой либо энергии для их работы, что выгодно выделяет их из ряда как резинометаллических и резиновых виброизоляторов, так и множества пневматических и гидравлических виброизолирующих и шумоизолирующих систем. Однако, известные факторы, влияющие на их эффективность, не кажутся исчерпывающими, что создает сложности с научным объяснением, управлением свойств и выбором направления для повышения эффективности таких подвесок. Статья ставит целью дополнить проведенные исследования и определить ключевые направления для улучшения распределенных опор.

Для повышения эффективности подобных подвесок, по мнению авторов, представляется целесообразным изучать и оптимизировать именно основания, их конструкцию, распределение масс и способы крепления к фундаментам с целью управления параметрами собственных частот всех элементов подвески, исключения их совокупной синхронизации и рассогласованию фаз их колебаний.

Ключевые слова: распределенная виброзащитная опора, цельнометаллическая конструкция; резинометаллические и резиновые виброизоляторы.

DYNAMIC PROPERTIES OF THE DISTRIBUTED VIBRATION ISOLATING MOUNT

Alexander M. Baranovskiy

Dr.Sci.Tech, Professor, Department of Theoretical and Applied Mechanics of Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: baranovsky@rambler.ru

Yuri I. Rishko

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Resistance of Materials and Hoisting Machines, Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: rishko@nsawt.ru

Stanislav V. Vikulov

Ph.D. in Engineering Science, Professor, Department of Resistance of Materials and Hoisting Machines, Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: vikulov-51@mail.ru

Abstract

Investigations of highly interesting vibration-isolating mounts with sufficient stiffness and paradoxical effectiveness herein, especially in the high-frequency zone (above 90 Hz), are presented. Besides, a significant advantage of such devices can be attributed to their all-metal design, as well as the lack of necessity to supply any power for their operation, which favorably distinguishes them from the range of both rubber-metal and rubber vibration dampers, as well as many pneumatic and hydraulic vibration isolating and soundproofing systems. However, the known factors affecting their effectiveness do not seem to be exhaustive, which creates difficulties with scientific explanation, control of properties and

choice of direction to increase the effectiveness of such suspensions. The article aims to complement the performed research and identify key areas for improving the distributed mounts.

To increase the effectiveness of such suspensions, according to the authors, it seems appropriate to study and optimize precisely the bases, their design, mass distribution and methods of attachment to the foundations with the aim of controlling the parameters of the natural frequencies of all suspension elements, eliminating their combined synchronization and mismatch of their oscillation phases.

Key words: distributed vibration isolating mount, all-metal construction; rubber-metal and rubber vibration dampers.

Рассмотрим одну из известных конструкций распределенной виброизолирующей опоры, выполненной в виде массива витых цилиндрических пружин между двумя жесткими основаниями (рис. 1).

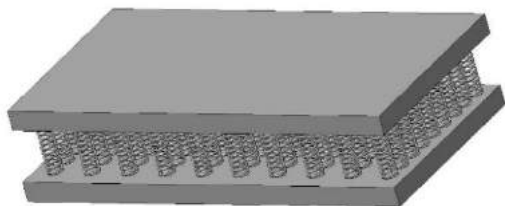


Рис. 1. Распределенная виброзащитная опора

В качестве динамической модели для такого устройства в случае предположения абсолютной жесткости оснований можно использовать следующую упруго-массовую схему.

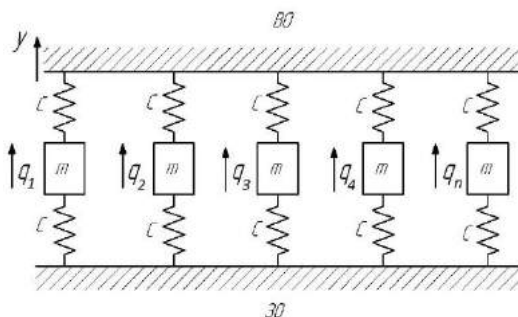


Рис. 2. Динамическая модель распределенной опоры

Тогда при одноосных колебаниях вибрирующего объекта (ВО) все упругие элементы жесткостью C синхронно передадут движение на защищаемый объект (ЗО) и массы (m), всех упругих элементов приобретут синхронное и равное ускорение при любых параметрах вибрации. Следовательно, импульсы, со стороны отдельных упругих элементов, действующие на защищаемый объект (ЗО) будут суммироваться. Таким образом, действие распределенных упругих элементов может быть заменено действием одного упругого элемента соответствующей жесткостью и массой. Отсюда сравнительного повышения эффективности распределенной опоры при использовании любых расчетных методик не следует.

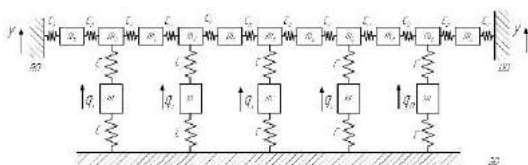


Рис. 3. Модель упругой распределенной подвески

Фактически, не зависимо от конструкции, способов крепления и материалов оснований их жесткость не может быть бесконечно велика, потому более точная динамическая модель (рисунок 3) должна учитывать упругость оснований. В этом случае картина возбуждения колебаний существенно изменится. К примеру, если закрепить хотя бы одно из оснований распределенной опоры к объекту вибрации в двух крайних точках, получим упругооперную однопролетную балку некоторой жесткости.

Количество точек крепления может быть изменено и зависит от фактического расположения и крепления опор. Упругим может быть как верхнее или нижнее основание, так и оба одновременно.

Уравнения динамики, описывающие данную модель, в случае 11-ти верхних и 5-ти нижних масс, будут выглядеть следующим образом:

$$q''_{01} = \frac{C_0 (y - q_{01}) + C_0 (q_{02} - q_{01})}{m_0};$$

$$q''_{02} = \frac{C_0 (q_{01} - q_{02}) + C_0 (q_{03} - q_{02}) + C (q_1 - q_{02})}{m_0};$$

$$q''_{03} = \frac{C_0 (q_{02} - q_{03}) + C_0 (q_{04} - q_{03})}{m_0};$$

$$q''_{04} = \frac{C_0 (q_{03} - q_{04}) + C_0 (q_{05} - q_{04}) + C (q_2 - q_{04})}{m_0};$$

$$q''_{05} = \frac{C_0 (q_{04} - q_{05}) + C_0 (q_{06} - q_{05})}{m_0};$$

$$q''_{06} = \frac{C_0 (q_{05} - q_{06}) + C_0 (q_{07} - q_{06}) + C (q_3 - q_{06})}{m_0};$$

$$q''_{07} = \frac{C_0 (q_{06} - q_{07}) + C_0 (q_{08} - q_{07})}{m_0};$$

$$q''_{08} = \frac{C_0 (q_{07} - q_{08}) + C_0 (q_{09} - q_{08}) + C (q_4 - q_{08})}{m_0};$$

$$q''_{09} = \frac{C_0 (q_{08} - q_{09}) + C_0 (q_{10} - q_{09})}{m_0};$$

$$q''_{10} = \frac{C_0 (q_{09} - q_{10}) + C_0 (q_{11} - q_{10}) + C (q_5 - q_{10})}{m_0};$$

$$q''_{11} = \frac{C_0 (q_{10} - q_{11}) + C_0 (y - q_{11})}{m_0};$$

$$q''_1 = \frac{C (q_{02} - q_1) + C q_1}{m};$$

$$q''_2 = \frac{C (q_{04} - q_2) + C q_2}{m};$$

$$q''_3 = \frac{C (q_{06} - q_3) + C q_3}{m};$$

$$q_4'' = \frac{C(q_{08} - q_4) + Cq_4}{m};$$

$$q_5'' = \frac{C(q_{10} - q_5) + Cq_5}{m}.$$

где q_{01}'' , q_{02}'' и т.д. – ускорения масс m_0 (рис. 3 – верхний ряд масс слева направо);

q_1'' , q_1'' и т.д. – ускорения масс m (рис. 3);

q_{01} , q_{02} и т.д. – перемещения масс m_0 (рис. 3 – верхний ряд масс слева направо);

q_1 , q_2 и т.д. – перемещения масс m (рис. 3).

Величину реакций на ЗО со стороны отдельных упругих элементов можно определить по следующим формулам

$$r_1 = Cq_1; r_2 = Cq_2; r_3 = Cq_3; r_4 = Cq_4; r_5 = Cq_5.$$

Суммарная величина динамической силы, передаваемой на защищаемый объект, определится как

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5.$$

Вышеуказанные уравнения могут быть решены в любой программе, позволяющей работать с дифференциальными уравнениями второго порядка. В нашем случае была использована программа SIMNON. Пример решения такой задачи отражен в виде графика (рис. 4).

Из графика видно, что импульсы, передающиеся с различных пружин подвески (r_1 , r_2 , r_3 , r_4 , r_5) не совпадают по фазе и суммарная сила r , передающаяся на защищаемый объект оказывается значительно меньшей суммы их абсолютных величин.

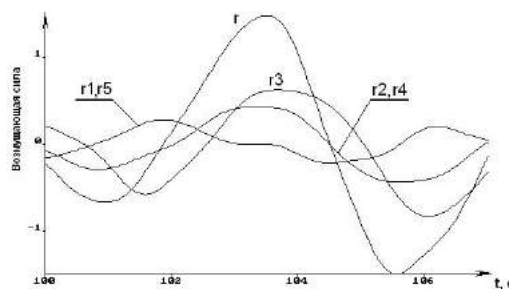


Рис. 4. Динамические силы на гибком основании

Вышеизложенный результат позволяет сделать вывод, что гибкое основание под действием вынужденных колебаний испытывает волновые процессы, что вызывает разнофазовые реакции в отдельных упругих элементах подвески. Понятно, что волновые процессы в упругом основании наиболее ярко выражены непосредственно в резонансе, а также на частотах близких к нему, в дорезонансном диапазоне данный эффект проявляется мало. Этим обстоятельством теоретически может быть объяснена эффективность многoprужинных виброзащитных подвесок с весьма жесткими основаниями в области высоких частот.

Таким образом, для повышения эффективности подобных подвесок представляется целесообразным изучать и оптимизировать именно основания, их конструкцию, распределение масс и способы крепления к фундаментам с целью управления параметрами собственных частот.

Литература

- 1 Потянихин, А.Н. Проблемы снижения структурной вибрации речных судов / А.Н. Потянихин, М.К. Романченко, А.М. Барановский // -Судостроение. -2009. -№4. -С.48-49.
- 2 Барановский, А.М. Защита корпуса от структурной вибрации / А.М. Барановский, М.А. Федосеева // -Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока. -2011. -№2. -С.167-169.

References

- 1 Potyanikhin, A.N. Problemy snizheniya strukturnoy vibratsii rechnykh sudov / A.N. Potyanikhin, M.K. Romanchenko, A.M. Baranovskiy // -Sudostroenie. -2009. -№4. -S.48-49.
- 2 Baranovskiy, A.M. Zashchita korpusa ot strukturnoy vibratsii / A.M. Baranovskiy, M.A. Fedoseeva // -Nauchnye problemy Sibiri i Dal'nego Vostoka. -2011. -№2. -S.167-169.

УДК 621.43

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Борис Олегович Лебедев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
судовые энергетические установки
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: lebedevbo@list.ru

Сергей Павлович Глушков

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
судовые энергетические установки
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: rcpl@ngs.ru

Виктор Иванович Кочергин

кандидат технических наук, доцент, докторант
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: vkplus2011@yandex.ru.

Аннотация

Масляная пленка в сопряжении «втулка цилиндра-поршневое кольцо» должна обеспечивать не только минимальный износ сопряженных деталей, но и эффективность уплотнения от прорыва газов, охлаждение и очистку трущихся поверхностей. Поэтому именно она является одним из основных элементов, определяющих процессы теплообмена в камере сгорания дизельного двигателя. Исследования показали, что динамика прогрева поверхности масляной пленки на различных участках внутренней поверхности цилиндрической втулки качественно идентична, но количественные показатели в различных по сечению гильзы поясков существенно отличаются. Наибольшее значение температуры достигается в верхнем пояске. Основными параметрами, определяющими скорость испарения масляной пленки в цилиндрах двигателя, являются ее толщина, температура охлаждающей жидкости и режим работы дизеля. В статье приведены расчетные зависимости интенсивности испарения масла от толщины масляного слоя и температуры стенки. Изменение параметров рабочего тела в камере сгорания приводит к изменению интенсивности и характера процессов теплообмена и к увеличению расхода масла на угар, существенное снижение которого возможно посредством более интенсивного охлаждения верхней части цилиндрических втулок. На процессы теплообмена в камере сгорания дизельного двигателя оказывают влияние и кинетические процессы горения топлива. Одной из основных причин изменения кинетики сгорания топлива является изменение величины задержки воспламенения, на величину которой, в том числе, оказывает влияние и техническое состояние дизеля.

Ключевые слова: дизельный двигатель, теплообмен, масляная пленка, кинетика горения топлива

INFLUENCE OF PARAMETERS OF WORKING PROCESSES OF SHIP DIESELS ON OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN COMBUSTION CHAMBERS

Boris O. Lebedev

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: lebedevbo@list.ru

Sergei P. Glushkov

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: rcpl@ngs.ru

Viktor I. Kochergin

Candidate of Engineering Sciences, doctoral candidate
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: vkplus2011@yandex.ru

Abstract

The oil film in the liner-piston ring interference must provide not only the minimum wear of mating components, but also efficiency of sealing to avoid blowby, cooling and cleaning of the rubbing surfaces. Therefore, it is one of the basic elements having influence on heat exchange processes in combustion chamber of the diesel engine. Multiple tests showed that dynamics of oil film surface warm up on various sites of inner surface of the sleeve is qualitatively identical, but quantitative indices in various sleeve sections significantly differ. The greatest value of temperature is reached in the upper section. The critical parameters determining the oil film evaporation rate in cylinders are thickness, coolant temperature of and diesel operating mode. The article gives the estimated dependences of intensity of evaporation of oil on oil layer thickness and temperature of liner wall. Change of parameters of working fluid in combustion chamber leads to change of intensity and nature of processes of heat exchange and to increase of oil consumption as well, which can be reduced by means of more intensive cooling of the upper part of the sleeves. Kinetic processes of fuel burning can vary the characteristics of heat exchange processes in the combustion chamber. One of the main reasons for change of kinetics of combustion of fuel is a change of ignition delay, on which technical condition of the diesel can have a significant effect.

Key words: diesel engine, heat exchange, oil film, fuel combustion kinetics

Введение

На показатели надежности и экологической безопасности судовых дизелей значительное влияние оказывают условия работы и тепловой режим деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), непосредственно контактирующих с внутренним объемом камер сгорания энергетических установок. В первую очередь, это относится к деталям сопряжений «втулка цилиндра – поршневое кольцо». Данные детали в процессе работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) разделяются масляной пленкой, толщина которой зависит от множества конструктивных и эксплуатационных факторов, таких, как конструкция, материал и расположение поршневых колец; скорость поршня; способ подвода и свойства масла; качество рабочей поверхности втулки цилиндра; температура и давление газов в цилиндре; интенсивность отвода тепла от цилиндрической втулки [1, 2, 3]. Кроме того, на толщину масляной пленки оказывает влияние и степень деформации цилиндрической втулки, изменяющаяся, например, в зависимости от степени затяжки анкерных шпилек [4].

Масляная пленка должна обеспечивать не только минимальный износ сопряженных деталей, но и эффективность уплотнения от прорыва газов, охлаждение и очистку трущихся поверхностей. Поэтому при разработке мероприятий, способствующих повышению эффективности эксплуатации судовых энергетических установок, необходимо обратить особое внимание на вопросы взаимного влияния параметров рабочих процессов судовых дизелей и процессов теплообмена в камерах сгорания.

1 Закономерности процессов тепломассообмена в масляной пленке

Изучение процессов тепломассообмена в масляных пленках представляется особенно важным с учетом стремления некоторых производителей смазочных материалов и двигателей внутреннего сгорания к внедрению технологий так называемого усиления масляной пленки и минимизации суммарной площади поверхностей трения. Это также необходимо при использовании в целях повышения экономичности тепловых двигателей покрытий внутренних поверхностей камер сгорания материалами с

низким коэффициентом теплопроводности [5] и пониженным уровнем трения, а также при анализе перспектив применения альтернативных видов топлива [6].

Исследования показывают, что динамика прогрева поверхности масляной пленки на различных участках внутренней поверхности цилиндрической втулки качественно идентична, но количественные показатели существенно отличаются [3]. Если разделить данную поверхность на условные характерные пояски, открываемые поршнем при 0, 20, 40 и 60 градусах поворота коленчатого вала дизеля от верхней мертвой точки, получим зависимости изменения температур поверхности масляной пленки от угла поворота коленчатого вала ФПКВ, представленные на рис. 1. Полученные данные свидетельствуют о неравномерности прогрева камер сгорания и, в частности, смазочного слоя в дизельных ДВС. Наибольшее значение температуры достигается в верхнем пояске, а некоторое отличие характера кривой в этом сечении можно объяснить заметным уменьшением толщины пленки.

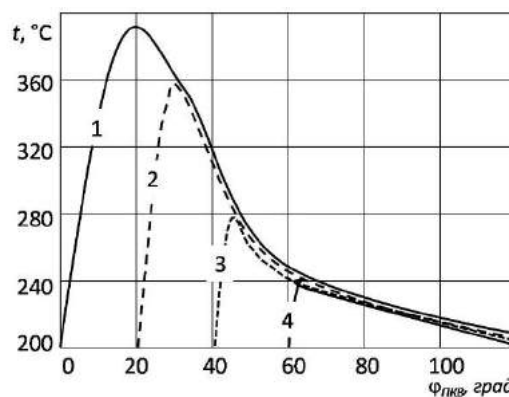


Рис. 1. Изменение температур поверхности масляной пленки в различных поясках цилиндрической втулки: 0°-линия 1; 20°-линия 2; 40°-линия 3; 60°-линия 4

Чтобы оценить динамику расхода масла на угар с внутренней поверхности втулки цилиндра, построим зависимость относительного количества испарившегося масла В с определенной площадки цилиндрической втулки от угла поворота коленчатого вала (рис. 2).

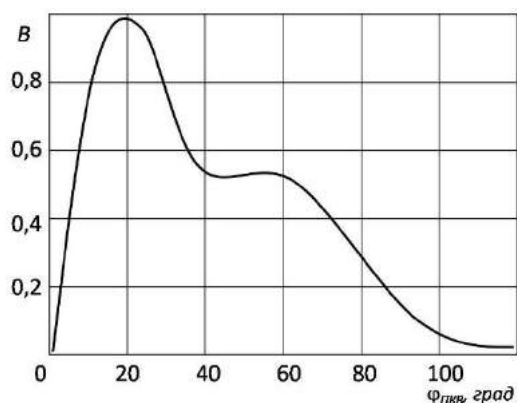


Рис.2. Динамика расхода масла на угар

Здесь V-это отношение количества испарившегося моторного масла с площадки, относящейся к *i*-му характерного пояску, к количеству испарившегося масла с участка, где испарение наиболее интенсивно. Как видно из представленного графика, наибольшая скорость фазовых превращений наблюдается в верхних поясках, но максимум испарения смещен вниз от верхней мертвой точки. В дальнейшем исследуемый показатель приближается к нулю. Такая динамика данного процесса объясняется тем, что верхний участок цилиндровой втулки открывается в начале хода поршня и процесс испарения продолжается практически на протяжении всего такта, а нижний условный поясок, соответствующий углу поворота коленвала $\varphi = 180^\circ$ ПКВ, не открывается вовсе. Некоторое увеличение параметра в средней части зависимости связано с неравномерностью размеров площадок испарения: ближе к середине части втулки они максимальны, а по мере приближения к мертвым точкам их значения уменьшаются.

2 Влияние рабочего процесса дизеля на испарение масляной пленки

Изменение параметров рабочего тела находящегося в камере сгорания, например, повышение температуры при увеличении нагрузки на дизель, приводит к изменению интенсивности и характера процессов теплообмена и, в итоге, к увеличению расхода масла на угар. Это связано с инициацией теплоотдачи от газа к стенке цилиндра и повышением температуры масляной пленки.

Изменение частоты вращения коленчатого вала может оказывать влияние на испарение масляной пленки по нескольким направлениям. Во-первых, обратно пропорционально увеличению частоты вращения уменьшается цикловое время контакта и наоборот. Во-вторых, изменение величины среднего индикаторного давления способствует изменению баланса составляющих теплообмена в камере сгорания в части доли лучистого теплообмена в его суммарном значении. В итоге, с увеличением частоты вращения расход масла на угар несколько возрастает.

Геометрические размеры камеры сгорания в целом не могут оказать существенного влияния на интенсивность испарения масляной пленки, но при изменении величины хода поршня, как следствие,

изменяется его средняя скорость, что приводит к вариации коэффициента теплоотдачи от газов к стенке.

Изменяются процессы теплообмена в камере сгорания и при изменении толщины масляной пленки, на величину которой, в свою очередь, влияет множество факторов от температурного режима работы дизеля до технического состояния деталей ЦПГ. Расчетные зависимости интенсивности испарения масла от толщины масляного слоя δM и температуры стенки t_{cm} для верхнего пояска втулки цилиндра приведены на рис. 3 [3].

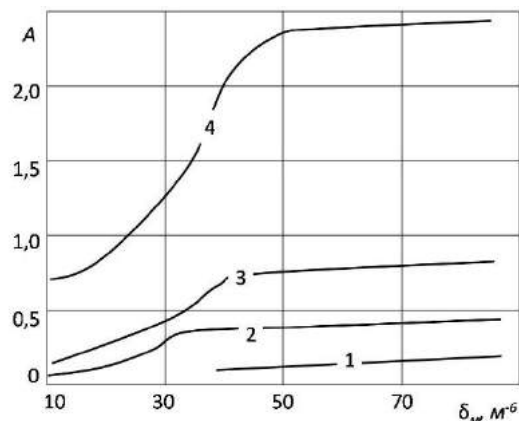


Рис.3. Зависимости интенсивности испарения масла от толщины масляной пленки и температуры стенки: $t_{cm} = 100^\circ C$ – линия 1; $t_{cm} = 150^\circ C$ – линия 2; $t_{cm} = 200^\circ C$ – линия 3; $t_{cm} = 250^\circ C$ – линия 4

Интенсивность испарения в данном случае оценивается посредством относительного показателя A, определяемого отношением количества испарившегося с *i*-го характерного пояска цилиндровой втулки масла к количеству масла, испаренного с участка с максимальным расходом на угар.

Из рис. 3 следует, что испарение масла в значительной степени зависит от температуры стенки, но при достижении определенного значения перестает зависеть от толщины масляного валика. Это объясняется тем, что термическое сопротивление масляной пленки становится настолько большим, что при заданной частоте вращения влияние данного параметра на испарение и отвод теплоты элиминируется.

3 Влияние кинетики горения топлива на процессы теплообмена в камерах сгорания

В дизельных двигателях внутреннего сгорания после впрыска и воспламенения топлива начинают повышаться давление и температура в камере сгорания. Но продолжительность и скорость горения топлива по ряду причин могут существенно изменяться и, тем самым, влиять на процессы теплообмена и на параметры рабочих процессов энергетических установок [7, 8].

Одной из основных причин изменения кинетических процессов сгорания топлива и вытекающих из этого факта последствий является изменение величины задержки воспламенения. Задержка по времени наступления эффекта

самовоспламенения в дизельных ДВС приводит к изменению временных и скоростных параметров распространения фронта пламени и нарастания давления в цилиндрах. В том числе, в данном случае изменяются и процессы тепломассообмена в масляной пленке, где, как показано выше, температурный режим в значительной степени зависит от угла поворота коленчатого вала.

Параметры кинетики горения топлива зависят и от технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя. На рис. 4 показан характер индикаторных диаграмм в координатах изменения давления в камере сгорания от величины угла поворота коленчатого вала с герметичной (линия 1) и негерметичной камерой сгорания (линия 2) [9]. Из представленных зависимостей следует, что снижение максимальных значений давления p в цилиндрах ДВС с негерметичной камерой сгорания вызывает увеличение угла задержки воспламенения топлива φ_3^1 по отношению к нормальному значению φ_3 .

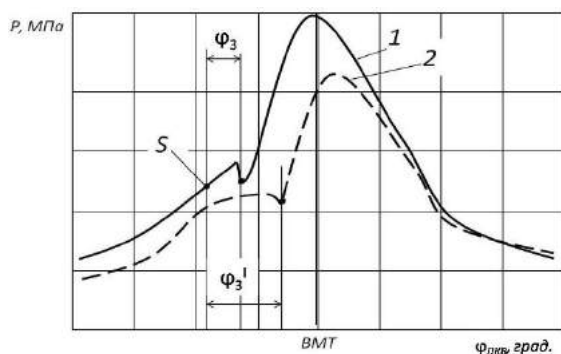


Рис. 4. Характер индикаторной диаграммы дизельного двигателя с герметичной (линия 1) и негерметичной камерой сгорания (линия 2)

Угол задержки самовоспламенения на представленных индикаторных диаграммах измеряется между точкой начала впрыска топлива S и точками, соответствующими моментам начала возгорания дизельного топлива.

Заключение

Результатом проведенных исследований следует считать следующие научные положения.

1 Для обеспечения эффективности эксплуатации судовых дизелей необходима оптимизация температурного режима работы цилиндровых втулок.

2 Масляная пленка в сопряжении «поршневое кольцо – стенка втулки цилиндра» является одним из основных элементов, определяющих процессы теплообмена в камере сгорания дизельного двигателя.

3 Основными параметрами, определяющими скорость испарения масляной пленки в цилиндрах двигателя, являются ее толщина, температура охлаждающей жидкости и режим работы дизеля.

4 Существенное снижение расхода моторного масла на угар возможно посредством более интенсивного охлаждения верхней части цилиндровых втулок.

5 На процессы теплообмена в камере сгорания дизельного ДВС оказывают влияние кинетические процессы горения топлива и техническое состояние элементов ЦПГ.

Литература

1. Кузнецов Г.К., Дудко П.П. Движение масла в камеру сгорания поршневого двигателя // Двигателестроение. 1983. № 4. С. 24-26.
2. Лебедев Б.О. Влияние характеристики тепловыделения на процесс испарения масляной пленки со стенки цилиндрической втулки // Труды НИИВТа. 1982. Вып. 161. С. 57-63.
3. Лебедев Б.О. Теплофизические основы процесса угара масла в дизелях и разработка эксплуатационных мероприятий по его сокращению: автореферат дисс. ... д-ра техн. наук: 05.04.02. Барнаул, 2001. 32 с.
4. Белов А.С. Влияние деформации цилиндра на толщину масляной пленки в сопряжении «поршень-цилиндр» // Фундаментальные исследования. 2011. № 8-3. С. 603-606.
5. Лебедев О.Б., Глушков С.П., Лебедев Б.О., Сириков Д.А., Геращенко А.А. Утилизация тепла в судовых энергетических установках // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 2. С. 179-181.
6. Лебедев Б.О., Глушков С.П., Кочергин В.И. Особенности использования альтернативных видов топлива для судовых энергетических установок // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4(42). Т. 4. С. 139-143.
7. Глушков С.П., Косенко Д.Ю., Кочергин В.И., Красников В.В. Влияние кинетики горения топлива на параметры неравномерности вращения судовых энергетических установок // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 2(36). С. 35-41.
8. Глушков С.П., Кочергин В.И., Красников В.В. Влияние использования альтернативных видов топлива на характеристики рабочих процессов ДВС // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2018. № 1. С. 24-32.
9. Натарзан В.М., Синий В.Ф. Обеспечение своевременности воспламенения топлива в цилиндрах дизелей // Управление технологическими процессами при эксплуатации машинно-тракторного парка: науч.-техн. бюлл. СО ВАСХНИЛ. 1988. Вып. 3. С. 13-16.

References

- 1 Kuznetsov G.K., Dudko P.P. Dvizhenie masla v kameru sgoraniya porshneвого dvigatelya [The movement of oil in combustion chamber of the piston engine]. Dvigatellestroenie, 1983, no. 4, pp. 24-26.
- 2 Lebedev B.O. Vliyaniye kharakteristiki teplovydeleniya na protsess ispareniya maslyanoy plenki so stenki tsilindrovoy vtulki [Influence of characteristic of heat release on process of evaporation of oil film from wall of the cylinder barrel]. Trudy NIIVTa, 1982, no. 161, pp. 57-63.
- 3 Lebedev B.O. Teplofizicheskie osnovy protsessa ugara masla v dizelyakh i razrabotka ehkspluatatsionnykh meropriyatiy po ego sokrashcheniyu [Heatphysical bases of process of waste of oil in diesels and development of operational actions for its cutting-down]. Abstr. Diss. ... Dr. techn. sci. Barnaul, 2001. 32 p.
- 4 Belov A.S. Vliyaniye deformatsii tsilindra na tolshchinu maslyanoy plenki v sopryazhenii «porshen'-tsilindr» [The impact of deformation of cylinder on thickness of oil film in interface "bucket cylinder"]. Fundamental'nye issledovaniya, 2011, no. 8-3, pp. 603-606.
- 5 Lebedev O.B., Glushkov S.P., Lebedev B.O., Sibrikov D.A., Gerashchenko A.A. Utilizatsiya tepla v sudovykh ehnergeticheskikh ustanovkakh [Utilization is warm in ship power stations]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka, 2015, no. 2, pp. 179-181.
- 6 Lebedev B.O., Glushkov S.P., Kochergin V.I. Osobennosti ispol'zovaniya al'ternativnykh vidov topliva dlya sudovykh ehnergeticheskikh ustanovok [Features of use of alternative types of fuel for ship power stations]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2018, no. 4(42), pp. 139-143.
- 7 Glushkov S.P., Kosenko D.Iu., Kochergin V.I., Krasnikov V.V. Vliyaniye kinetiki goreniya topliva na parametry neravnomernosti vrashcheniya sudovykh energeticheskikh ustanovok [Influence of kinetics of burning of fuel on parameters of irregularity of rotation of ship power stations]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2017, no. 2(36), pp. 35-41.
- 8 Glushkov S.P., Kochergin V.I., Krasnikov V.V. Vliyaniye ispol'zovaniya al'ternativnykh vidov topliva na kharakteristiki rabochikh protsessov DVS [Influence of use of alternative types of fuel on characteristics of working processes of internal combustion engines]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya, 2018, no. 1, pp. 24-32.
- 9 Natarzan V.M., Siniy V.F. Obespecheniye svoevremennosti vosplamneniya topliva v tsilindrakh dizeley [Ensuring timeliness of ignition of fuel in cylinders of diesels]. Upravleniye tekhnologicheskimi protsessami pri ehkspluatatsii mashinno-traktornogo parka. Nauchno-tekhnicheskii byulleten' SO VASKHNIL. 1988, no. 3, pp. 13-16.

УДК 621.43

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Борис Олегович Лебедев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
судовые энергетические установки
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: lebedevbo@list.ru

Сергей Павлович Глушков

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
судовые энергетические установки
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: rcpl@ngs.ru

Виктор Иванович Кочергин

кандидат технических наук, доцент, докторант
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: vkplus2011@yandex.ru.

Аннотация

Эксплуатационные показатели судовых энергетических установок в значительной мере зависят от обеспечения необходимого температурного режима двигателей внутреннего сгорания. Оптимизация температурного режима включает в себя проведение тепловой подготовки перед запуском двигателя, поддержание рабочей температуры и обеспечение равномерности отвода тепла. Повышение температуры охлаждающей жидкости позволяет повысить коэффициент полезного действия двигателя, но приводит и к некоторым негативным последствиям. При эксплуатации судов в условиях холодного климата необходимы мероприятия по предпусковому подогреву энергетических установок. Особенно актуальным это является при освоении арктических районов Российской Федерации. В качестве наиболее перспективного и экологически безопасного предлагается способ предпускового подогрева на основе каталитических нагревательных элементов. Для оптимизации условий трения и динамических нагрузок на основные детали двигателя внутреннего сгорания выполнено исследование влияния температурного режима работы судовой энергетической установки на характер процессов теплообмена в масляных пленках на стенках цилиндрических втулок. Необходимо обеспечение равномерного распределения отводимой теплоты по всей длине цилиндрической втулки двигателя внутреннего сгорания. С этой целью могут быть использованы покрытия из материалов с различными коэффициентами теплопроводности. Некоторое снижение температуры охлаждающей жидкости изменяет температурные режимы испарения и окисления масляной пленки и может способствовать уменьшению расхода топлива судовыми энергетическими установками.

Ключевые слова: температурный режим, тепловая подготовка, каталитический обогреватель, теплообмен, масляная пленка

MARINE PROPULSION PLANTS' THERMAL MODE OPTIMIZATION

Boris O. Lebedev

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: lebedevbo@list.ru

Sergei P. Glushkov

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: rcpl@ngs.ru

Viktor I. Kochergin

Candidate of Engineering Sciences, doctoral candidate
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: vkplus2011@yandex.ru

Abstract

Marine propulsion plants' performance indicators largely depend on the required thermal mode provided for internal combustion engines. The thermal mode optimization includes conducting thermal

preparation before starting the engine, maintaining the working temperature and ensuring uniform heat dissipation. Increasing the coolant temperature allows to increase the engine efficiency, but on the other hand it leads to some negative consequences. Vessel operating in low temperature environments requires preheating of propulsion plants. It is especially important when developing the Arctic regions of the Russian Federation. The preheating method based on catalytic heating elements is proposed as the most promising and environmentally friendly. To optimize the conditions of friction and dynamic loads on the internal combustion engine main parts the investigation on the influence of the marine propulsion plants' thermal mode on the heat exchanging processes in oil films on the walls of cylinder liners was conducted. It is necessary to ensure the uniform heat dissipation along the entire length of the internal combustion engine cylinder liners. Coatings made of materials with different thermal conductivity can be used for that purpose. A slight decrease in the coolant temperature changes the oil film evaporation and oxidation thermal mode and can contribute to the reduction in fuel consumption by marine propulsion plants.

Key words: thermal mode, thermal preparation, catalytic heater, heat exchange, oil film

Введение

Технико-экономические показатели судовых энергетических установок (СЭУ) в значительной мере зависят от обеспечения необходимого температурного режима эксплуатации. Например, при изменении температуры окружающего воздуха, напрямую влияющей на величину плотности поступающего в цилиндры воздуха, изменяется и мощность судовой энергетической установки. В зависимости от изменения температуры расход топлива дизельными двигателями внутреннего сгорания (ДВС) может варьировать от уменьшения на 12,7% до увеличения на 33% по сравнению с номинальными значениями. Аналогичным образом понижение или повышение температуры в течение рейса может способствовать изменению расхода моторного масла в диапазоне уменьшения до 22,4% и увеличения до 35,5% [1]. Понижение температуры атмосферного воздуха оказывает также отрицательное воздействие и на энергетическую эффективность паротурбинных и газотурбинных энергетических установок [2].

Оптимизация температурного режима работы СЭУ включает в себя проведение тепловой подготовки перед запуском, поддержание рабочей температуры двигателя в требуемых пределах и обеспечение равномерности отвода тепла. Для судовых дизелей рабочим обычно является диапазон температур 65...85 °С, а наиболее приемлемым значением температуры воды на выходе из двигателя с проточной системой охлаждения – 65 °С. Повышение температуры охлаждающей среды позволяет повысить КПД двигателя, но, в то же время, приводит к уменьшению коэффициента наполнения цилиндров, возможному ухудшению экологических показателей энергетических установок и негативному влиянию на процессы лакообразования, нагарообразования и окисления масла.

1 Влияние температуры на рабочие процессы энергетических установок

При эксплуатации судовых энергетических установок в условиях холодного климата необходимо решение задач по предпусковому подогреву и обогреву СЭУ в режимах горячего отстоя. На речном транспорте данные режимы неизбежно возникают в период продления навигации, составляющего в некоторых случаях значительную часть валового времени рейса. В

отношении морских судов аналогичные проблемы характерны для ледокольного флота и для случаев нахождения судов в ожидании разгрузки, а также при эксплуатации технических судов и плавучих кранов [3].

Отрицательное влияние низких температур на рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания наиболее заметно проявляется во время пуска. Изменение рабочих зазоров оказывает влияние на характер смазывания, трения и износа сопрягающихся деталей ДВС деталей, поскольку при пуске холодного двигателя смазка деталей некоторое время может производиться только за счёт остаточной масляной плёнки.

Оценить влияние изменения сил трения в подшипниках коленчатого вала на износостойкость деталей кривошипно-шатунного механизма и степень неравномерности вращения коленчатого вала возможно на основе использования обобщенного показателя смазочного процесса – интегральной степени существования смазочного слоя [4]. В условиях эксплуатации и также при работе энергетической установки в условиях низких температур этот показатель зависит от большого числа факторов:

$$E_g = f(M, n, \Delta, \mu(T_m), T_{мп}, p_m, h_{кр}, \dots); \quad (1)$$

где n – частота вращения коленчатого вала; M – крутящий момент; Δ – диаметральный зазор в подшипниках; $\mu(T_m)$ – характер зависимости динамической вязкости масла μ от температуры масла T_m ; $T_{мп}$ – значения температуры масла на входе в подшипник; p_m – давление масла в подшипниковом узле; $h_{кр}$ – критическая величина толщины смазочного слоя.

На величину уровня трения влияют параметры шероховатости поверхности и трибологические характеристики материалов пар трения, в значительной мере проявляющие себя при снижении температуры трущихся поверхностей. В итоге, изменение сил трения оказывает влияние на характер внутрициклового углового ускорения коленчатого вала энергетической установки, поскольку его текущее значение ε описывается выражением:

$$\varepsilon = \varepsilon_{компл} + \varepsilon_{газ} - \varepsilon_{ин} - \varepsilon_{тр} - \varepsilon_{наер}; \quad (2)$$

где $\varepsilon_{компл}$ – компрессионная составляющая суммарного углового ускорения; $\varepsilon_{газ}$ – газовая

составляющая; $\varepsilon_{ин}$ – составляющая от сил инерции; $\varepsilon_{тпр}$ – компонента углового ускорения, учитывающая влияние сил трения; $\varepsilon_{нагр}$ – влияние изменения внешней нагрузки на двигатель.

При этом степень неравномерности колебаний рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД) дизеля, измеренная посредством анализа изменения величины напряжения на выходе индуктивного датчика, закрепленного на поводке рейки ТНВД, в диапазоне температур окружающего воздуха от 0 до минус 20 °С увеличивается примерно в 3,5 раза. Примеры перемещения рейки топливного насоса высокого давления в переходных режимах, вызванных набросом нагрузки на дизель-генераторную установку, оснащенную двигателем 1С47,5/8,2, при различных температурах окружающего воздуха приведены на рис. 1 и 2.

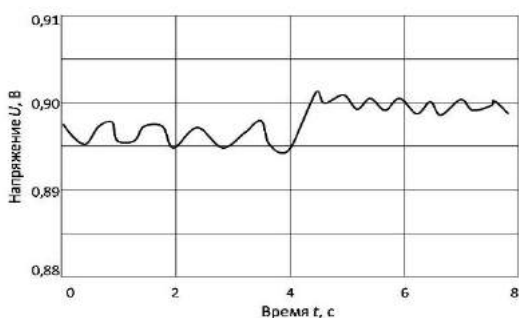


Рис. 1. Перемещение рейки ТНВД двигателя 1С47,5/8,2 при набросе нагрузки в условиях температуры окружающего воздуха +20 °С

Кроме увеличения сил трения, при пуске холодного двигателя внутреннего сгорания в цилиндры ДВС поступает обогащенная топливная смесь, не успевающая полностью воспламениться. При этом избыток топлива попадает в камеру сгорания в виде капель и смывает масло со стенок цилиндра, что также существенно ухудшает условия работы поршня в непрогретом двигателе и приводит в ряде случаев к появлению задиров.

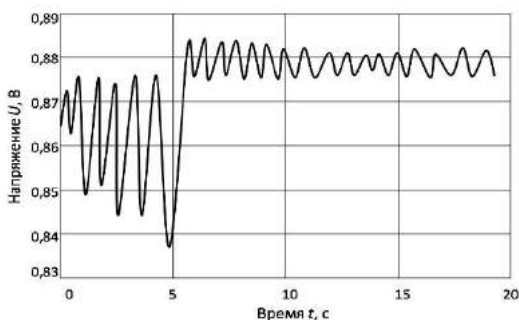


Рис. 2. Перемещение рейки ТНВД двигателя 1С47,5/8,2 при набросе нагрузки в условиях температуры окружающего воздуха минус 15 °С

Низкие температуры окружающего воздуха требуют, как правило, проведения мероприятий по применению соответствующих марок применяемого топлива с целью обеспечения бесперебойной работы СЭУ. В итоге, это приводит к изменению качественных показателей дизельного топлива, что, в свою очередь, вызывает

изменение характера кинетических процессов горения в цилиндрах ДВС, условий работы пар трения кривошипно-шатунного механизма и параметров неравномерности валов и валопроводов энергетической установки [5].

Следовательно, обеспечение надежного пуска ДВС и поддержание необходимой температуры энергетических установок является актуальной научной задачей, особенно с учетом необходимости решения приоритетных задач развития речного и морского флота Российской Федерации, таких, как обеспечение северного завоза и освоение Арктики.

2 Перспективные методы тепловой подготовки СЭУ

Наиболее предпочтительным с точки зрения эффективности, безопасности эксплуатации и экологических характеристик представляется метод проведения тепловой подготовки судовых энергетических установок на основе использования устройств с каталитическими нагревательными элементами. Следует отметить, что существующие нормативные документы, регламентирующие требования экологической безопасности в части содержания вредных веществ в отработавших газах энергетических установок, не содержат требования к величинам вредных выбросов предпусковыми подогревателями. Каталитические технологии предпускового подогрева, помимо возможности окисления топлива без открытого пламени и практически полного отсутствия вредных веществ в отходящих газах (при условии работы в пределах установочного диапазона мощности), отличаются работой при меньших по сравнению с традиционными методами тепловой подготовки температурах, что положительно сказывается на долговечности узлов и агрегатов [6, 7].

Каталитические нагревательные устройства, прототипы которых разработаны и успешно прошли ресурсные испытания, могут использоваться в качестве топлива как природный газ или пропан-бутановые газовые смеси, так и жидкое дизельное топливо [6, 7]. Во втором случае процесс каталитического окисления становится более сложным ввиду необходимости наличия оригинальных технических решений, обеспечивающих предварительное испарение жидкого топлива, распределение полученного газового потока внутри устройства и протекание окислительных реакций на поверхности катализатора.

Для реализации данных задач предлагается представленная на рис. 3. конструкция каталитического нагревательного элемента со встроенным испарителем. В данном варианте имеются детали для подачи газообразного топлива с целью обеспечения пускового режима работы каталитического обогревателя, поскольку вначале для выхода на штатный режим работы катализатора необходимо разогреть его до рабочей температуры испарения и каталитического горения жидкого топлива. При ее достижении подача газа прекращается и дальнейшее выделение теплоты происходит только за счет окисления дизельного топлива. В

эксплуатационных условиях воспламенение может быть реализовано с помощью электрической запальной свечи или иным путем.

Главным опасением при реализации предложенного перспективного метода предпускового подогрева было наличие значительного количества серы в большинстве видов применяемого отечественного дизельного топлива. Однако проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что каталитические источники тепла, работающие как на эталонных, так и на стандартных видах дизельного топлива, способны обеспечить приемлемый ресурс работы без «отравления» катализатора соединениями серы.

Подвижные механические элементы судовой энергетической установки и термодинамическую систему двигателя внутреннего сгорания следует рассматривать как совокупность систем, в равной степени влияющих на эффективность процессов эксплуатации СЭУ. Свое, достаточно значительное влияние на данные процессы в условиях неустановившихся нагрузок оказывает и система автоматического регулирования частоты вращения. В связи с этим, необходимо обеспечить не только своевременный выход энергетической установки после пуска двигателя на рабочий температурный режим, но и оптимизацию условий трения и динамических нагрузок основных деталей кривошипно-шатунного механизма. Для этого, в первую очередь, требуется исследование влияния температурного режима работы СЭУ на характер процессов теплообмена в масляных пленках на стенках цилиндрических втулок ДВС.

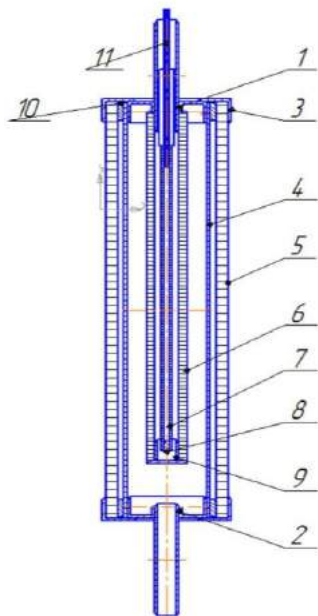


Рис. 3. Устройство каталитического нагревательного элемента: 1-втулка с патрубком для подачи жидкого топлива; 2-втулка с газовым патрубком; 3-колпачок; 4-распределительный блок; 5-каталитический блок; 6-испарительный блок; 7-капиллярный блок; 8-заглушка капиллярного блока; 9-заглушка испарительного блока; 10-вставка дистанцирующая; 11-втулка капиллярного подвода жидкого топлива

Это связано с тем, что одной из важных особенностей протекания рабочих процессов в ДВС является неравномерное поступление и испарение масла с отдельных участков поверхности деталей цилиндро-поршневой группы, в результате чего в наихудших условиях находится верхняя часть цилиндрической втулки, соответствующая положению первого поршневого кольца в верхней мертвой точке (ВМТ) [8, 9].

3 Исследование процессов теплообмена в цилиндрических втулках ДВС

Повысить экономичность тепловых двигателей возможно посредством эффективного использования тепла, уносимого выхлопными газами и уходящего в систему охлаждения, например, уменьшением отдачи тепла в систему охлаждения ДВС при использовании внутреннего покрытия камеры сгорания материалами с низким коэффициентом теплопроводности [10].

При этом необходимо обеспечить равномерность отвода тепла с учетом конструкции цилиндрической втулки. Процессы теплообмена в цилиндрических втулках (гильзах цилиндров) ДВС представляют собой сложные комплексные процессы теплопередачи, которые характеризуются термическим сопротивлением теплоотдачи от горячего флюида камеры сгорания к цилиндрической стенке, теплопроводностью стенки цилиндра и термическим сопротивлением теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю. Линейное термическое сопротивление для стенки цилиндра, имеющей n слоев разной толщины с различными физическими свойствами, может быть определено с помощью следующего выражения [11]:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}; \quad (3)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи; λ_n – коэффициент теплопередачи n -го слоя; d_i и d_{i+1} – внутренний и наружный диаметры i -го слоя.

Все факторы, влияющие на процессы теплообмена масляной пленки, можно разделить на две группы. К первой относятся эксплуатационные и конструкционные параметры ДВС, а ко второй – физические свойства смазочного масла. При работе двигателя расположенные на разной высоте внутренней поверхности цилиндрической втулки участки масляной пленки подвергаются различному по интенсивности и продолжительности воздействию со стороны рабочего тела, что влияет на характер ее прогрева и испарения. При этом по мере удаления от ВМТ тепловое состояние масляной пленки в отдельных поясках значительно улучшается.

Если разбить каждый характерный поясok гильзовой втулки на m слоев и предположить, что все частицы одного слоя имеют равную температуру, то тепловое состояние каждого слоя будет определяться количеством теплоты, пошедшей на изменение энтальпии масла m -го слоя, количеством теплоты, полученной от слоя предыдущего посредством теплопроводности и

количеством теплоты, отдаваемой последующему слою.

На рис. 4 приведены зависимости изменения температур по толщине масляной пленки Δt , находящейся в районе верхнего расчетного пояса, при различных углах поворота коленчатого вала (ПКВ). Прогрев в начале процесса характеризует кривая 1, затем наступает квазистационарный теплообмен (кривая 2), далее происходят процессы охлаждения (кривые 3, 4) [8].

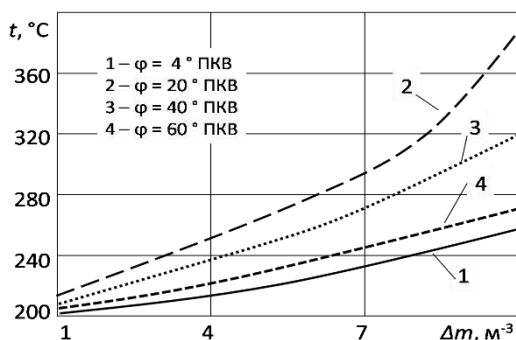


Рис. 4. Зависимость изменения температуры по толщине масляной пленки в зависимости от угла поворота коленчатого вала

Повышение температуры масла способствует повышенному испарению и увеличению расхода масла на угар. В результате некоторое снижение температуры охлаждающей жидкости по отношению к принятому обычно в качестве

номинального значению 80 °С может способствовать увеличению экономичности дизельного двигателя. Наибольший положительный эффект при этом отмечается для изношенных двигателей [8].

Заключение

1 Поддержание температурного режима в оптимальном диапазоне, зависящим от конструктивных особенностей двигателя и типа применяемых смазочных материалов, способствует повышению технико-экономических показателей судовых энергетических установок.

2 Освоение арктических территорий Российской Федерации требует обеспечения качественной тепловой подготовки судовых дизелей.

3 Наиболее перспективным и экологически безопасным способом предпускового подогрева энергетических установок является использование каталитических нагревательных устройств.

4 Необходимо обеспечение равномерного распределения отводимой теплоты по всей длине цилиндрической втулки ДВС. С этой целью могут быть использованы покрытия из материалов с различными коэффициентами теплопроводности.

5 Некоторое снижение температуры охлаждающей жидкости изменяет температурные режимы испарения и окисления масляной пленки и может способствовать уменьшению расхода топлива двигателями внутреннего сгорания.

Литература

- 1 Соболенко, А.Н. Определение расхода топлива и моторного масла судовыми дизелями с учетом изменения внешних условий эксплуатации / А.Н. Соболенко, Р.Р. Симашов, Д.К. Глазюк, В.В. Маницын // -Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. -2017. - № 3. -С. 62-73.
- 2 Борейко, Р.М. Расчет энергетической эффективности парогазовых установок при отрицательной температуре атмосферного воздуха / Р.М. Борейко // -Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. -2017. -№ 3-4. -С. 109-111.
- 3 Сычушкин, И. В. Регулирование теплового состояния судовой энергетической установки в режиме горячего отстоя транспортного средства: автореф. дисс ... канд. техн. наук: 05.08.05, 05.09.03. -Ниж. Новгород, 2006. -28 с.
- 4 Калимуллин, Р.Ф. Научные основы поддержания работоспособности автомобильных двигателей методами трибодиагностики: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.22.10. Оренбург, 2016. -34 с.
- 5 Глушков, С.П. Влияние кинетики горения топлива на параметры неравномерности вращения судовых энергетических установок / С.П. Глушков, Д.Ю. Косенко, В.И. Кочергин, В.В. Красников // -Морские интеллектуальные технологии. -2017. -№2(36). -С.35-41.
- 6 Кочергин, В.И. Перспективные направления обеспечения экологичности предпускового подогрева транспортных средств в условиях эксплуатации / В.И. Кочергин, И.К. Далюк, А.В. Порсин, А.В. Куликов, В.Н. Рогожников // -Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. -2014. -№3. -С. 156-160.
- 7 Porsin A., Kulikov A., Dalyuk I., Rogozhnikov V., Kochergin V. Catalytic reactor with metal gauze catalysts for combustion of liquid fuel // Chemical Engineering Journal. 2015. No. 282. P. 233-240.
- 8 Лебедев, Б.О. Теплофизические основы процесса угара масла в дизелях и разработка эксплуатационных мероприятий по его сокращению: автореферат дисс. ... д-ра техн. наук: 05.04.02. Барнаул, 2001. 32 с.
- 9 Зубаков, А.С. Анализ процессов изнашивания в судовых среднеоборотных двигателях внутреннего сгорания / А.С. Зубаков, В.И. Одинцов // -Вестник молодежной науки. -2016. -№3(5). -С.1-5.
- 10 Лебедев, О.Б. Утилизация тепла в судовых энергетических установках / О.Б. Лебедев, С.П. Глушков, Б.О. Лебедев, Д.А. Сибриков, А.А. Герашенко // -Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2015. -№2. -С.179-181.
- 11 Расторгуева, О.В. Исследование проблем теплопередачи в двигателях внутреннего сгорания опасных производственных объектов / О.В. Расторгуева, Д.О. Седелников // -Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. -2016. -№5. -С. 62-70.

References

- 1 Sobolenko, A.N. Opredelenie raskhoda topliva i motornogo masla sudovymi dizelyami s uchetom izmeneniya vneshnikh uslovii ekspluatatsii / A.N. Sobolenko, R.R. Simashov, D.K. Glazyuk, V.V. Manitsyn // -Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. -2017. -№ 3. -S. 62-73.
- 2 Boreiko, R.M. Raschet energeticheskoi effektivnosti parogazovykh ustanovok pri otritsatel'noi temperature atmosfernogo vozdukha / R.M. Boreiko // -Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'ne-go Vostoka. -2017. -№ 3-4. -S. 109-111.
- 3 Sychushkin, I. V. Regulirovanie teplovogo sostoyaniya sudovoi energeticheskoi ustanovki v rezhime goryachego otstoya transportnogo sredstva: avtoref. diss ... kand. tekhn. nauk: 05.08.05, 05.09.03. -Nizh. Novgorod, 2006. -28 s.
- 4 Kalimullin, R.F. Nauchnye osnovy podderzhaniya rabotosposobnosti avtomobil'nykh dvigatelei metodami tribodiagnostiki: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.10. Orenburg, 2016. -34 s.
- 5 Glushkov, S.P. Vliyaniye kinetiki goreniya topliva na parametry neravnomernosti vrashcheniya sudo-vykh energeticheskikh ustanovok / S.P. Glushkov, D.Yu. Kosenko, V.I. Kochergin, V.V. Krasnikov // -Morskoe intelektual'nye tekhnologii. -2017. -№2(36). -S.35-41.
- 6 Kochergin V. I., Dalyuk I. K., Porsin A. V., Kulikov A. V., Rogozhnikov V. N. Perspektivnyye napravleniya obespecheniya ehkologichnosti predpuskovogo podogreva transportnykh sredstv v usloviyakh ehkspluatatsii [Perspective directions of ensuring environmental friendliness of prestarting heating up of vehicles under operating conditions]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka, 2014, no. 3, pp. 156-160.
- 7 Porsin A. Kulikov A., Dalyuk I., Rogozhnikov V., Kochergin V. Catalytic reactor with metal gauze catalysts for combustion of liquid fuel // Chemical Engineering Journal. 2015. No. 282. P. 233-240.
- 8 Lebedev, B.O. Teplofizicheskie osnovy protsessa ugara masla v dizelyakh i razrabotka ekspluata-tcionnykh meropriyatii po ego sokrashcheniyu: avtoreferat diss. ... d-ra tekhn. nauk: 05.04.02. Barnaul, 2001. 32 s.
- 9 Zubakov, A.S. Analiz protsessov iznashivaniya v sudovykh sredneoborotnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya / A.S. Zubakov, V.I. Odintsov // -Vestnik molodezhnoi nauki. -2016. -№3(5). -S.1-5.
- 10 Lebedev, O.B. Utilizatsiya tepla v sudovykh energeticheskikh ustanovkakh / O.B. Lebedev, S.P. Glushkov, B.O. Lebedev, D.A. Sibrikov, A.A. Gerashchenko // -Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. -2015. -№2. -S.179-181.
- 11 Rastorgueva, O.V. Issledovanie problem teploperedachi v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov / O.V. Rastorgueva, D.O. Sedel'nikov // -Vestnik Permskogo na-tSIONal'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Bezopasnost' i upravlenie riskami. -2016. -№5. -S. 62-70.

УДК 621.431.74-44

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ В КАПЛЕ ЖИДКОСТИ

Геннадий Сергеевич Юр

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
Судовых энергетических установок
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: ksdvs@nsawt.ru

Сергей Владимирович Пинясов

аспирант кафедры
Судовых энергетических установок
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: ksdvs@nsawt.ru

Аннотация

Выполнен анализ рабочего процесса в судовых дизелях при работе на тяжелых топливах. Показано, что одним из наиболее эффективных способов интенсификации смесеобразования и горения распыленного топлива является применение процесса внутрикапельной кавитации. Гидродинамические, кумулятивные, тепловые и другие эффекты, имеющие место в процессе кавитации обладают большой разрушительной силой. В процессе кавитации происходит газификация жидких высокомолекулярных соединений с образованием химически активных элементов, которые являются промоторами процесса горения. На основе предложенной математической модели проведено численное исследование траектории движения границы парогазового пузырька, находящегося внутри капли топлива. Определено, что для захлопывания пузырька необходимо преодолеть порог кавитационной прочности жидкости. Для принятых для расчета внешних условий, амплитуда пульсаций газовой среды для капли жидкости, в которой находится парогазовый пузырек должна превышать 0,2 МПа.

Ключевые слова: капля, парогазовый пузырёк, пульсации газовой среды, кавитация, порог кавитационной прочности жидкости

NUMERICAL RESEARCH OF THE CAVITATION PROCESS IN A DROP OF LIQUID

Gennady S. Yur

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Department of Marine Power Plants of Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: ksdvs@nsawt.ru

Sergey V. Pinyasov

Post-graduate Student, Department of Marine Power Plants of Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: ksdvs@nsawt.ru

Abstract

The analysis of the working process in marine diesel engines when operating on heavy fuels is performed. It is shown that one of the most effective ways to intensify the mixture formation and combustion of atomized fuel is the use of the process of intra-droplet cavitation. Hydrodynamic, cumulative, thermal and other effects that occur during cavitation have a great destructive force. In the process of cavitation, gasification of liquid macromolecular compounds occurs with the formation of chemically active elements that are promoters of the combustion process. Based on the proposed mathematical model, a numerical study of the trajectory of the boundary of a vapor-gas bubble inside a drop of fuel is carried out. It is determined that for the bubble to collapse, it is necessary to overcome the threshold of the cavitation strength of the liquid. For the external conditions accepted for the calculation, the amplitude of the pulsations of the gaseous medium for the liquid drop in which the vapor-gas bubbles are located should exceed 0.2 MPa.

Keywords: drop, vapor-gas bubble, pulsations of the gaseous medium, cavitation, threshold of cavitation strength of the liquid

Введение

По определению, кавитацией называется процесс образования в жидкости, в области пониженного давления, пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью [1].

Кавитационный парогазовый пузырек является своеобразным трансформатором энергии. Накопление энергии в фазе расширения сравнительно медленно происходит процесс накопления энергии, а в фазе сжатия значительно быстрее происходит её отдача [2].

Скорость движения границы пузырька в фазе сжатия может достигать скорости звука, а давление газа в пузырьке в процессе сжатия более 250 кг/см², а температура 10000 К [3].

Гидродинамические, кумулятивные, тепловые и другие эффекты, имеющие место в процессе кавитации обладают большой разрушительной силой.

Экспериментальные исследования, проведенные на проточно-импульсной установке подтвердили эффективность применения процесса кавитации для газификации жидкого углеводородного сырья [4]. Основными химическими элементами, полученными в ходе опытов из мазута, которые составили 30% об., являлись низшие олефины, такие, как этилен, пропилен и бутадиев являющихся химически активными элементами. Известно, что эти химические соединения относятся к промоторам, инициирующим процесс горения. Следовательно, осуществление процесса кавитации в каплях распыленного топлива, при прочих равных условиях, будет увеличивать скорость и полноту процесса сгорания.

Граница перехода жидкости от кипения к кавитации определяются «кавитационным порогом» и зависит от параметра, который носит название кавитационной прочности жидкости [5].

Для создания камер сгорания дизеля, использующих процесс кавитации, необходимо определить значения кавитационной прочности углеводородных топлив, которые применяются в судовых дизельных энергетических установках.

Математическая модель парогазового пузырька, находящийся внутри капли жидкости

В качестве основы для математической модели для численного исследования используем дифференциальное уравнение движения границы газовой сферы, находящейся в бесконечной жидкости плотностью ρ [3].

$$R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{d\tau} \right)^2 = \frac{1}{\rho} P(\tau), \quad (1)$$

где R – текущий радиус парогазового пузырька;
 τ – время;

P – давление газа в пузырьке.

Рассмотрим динамику изменения размера парогазового пузырька находящегося внутри капли жидкости, которая взвешена в газовой среде.

В этом случае необходимо учитывать влияние силы поверхностного натяжения жидкости на границе жидкость и окружающая каплю газовая среда σ . Силы поверхностного натяжения увеличивают давление внутри парогазового пузырька.

С учетом силы поверхностного натяжения, уравнение (1) запишется в виде

$$R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{d\tau} \right)^2 = \frac{1}{\rho} \left[P_a + \frac{2\sigma}{R_a} + \frac{2\sigma}{R_x} \right]. \quad (2)$$

При проведении численного исследования примем следующие начальные условия:

– текущий радиус парогазового пузырька равен R_0 ;

– текущее давление примем равным P_0

$$P = P_0. \quad (3)$$

При расчёте введем следующие допущения:

- жидкость несжимаема;
- масса газа в объеме парогазового пузырька, в течение исследуемого отрезка времени постоянна;
- диаметр парогазового пузырька значительно меньше длины звуковой волны;
- пульсации давления газовой среды одномерны;
- капля топлива неподвижна и не увлекается пульсациями газовой среды.

Пульсации давления газовой среды определяются уравнением

$$P(t) = P_a - P_0 \sin \omega t, \quad (4)$$

где P_a – внешнее давление;

P_0 – амплитуда переменного давления;

ω – круговая частота газодинамических колебаний.

Тогда уравнение движения границы газовой пузырька, находящегося в капле жидкости, которая помещена в осциллирующую газовую среду примет вид

$$R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{d\tau} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[\frac{2\sigma}{R_0} + \frac{2\sigma}{R_x} \right] = -\frac{1}{\rho} [P_a - P_0 \sin \omega \tau] \quad (5)$$

Численное исследование будем проводить в безразмерных параметрах, для чего введем безразмерные переменные.

Для радиуса парогазового пузырька

$$\bar{R} = \frac{R}{r}, \quad (6)$$

где R – текущий радиус пузырька;

r – характерный радиус пузырька.

Для времени

$$\bar{t} = \frac{\tau}{t}, \quad (7)$$

где τ – текущее время;

t – характерное время.

Коэффициент поверхностного натяжения жидкости σ будем определять по известной формуле [6]

$$\sigma = \sigma_0 \frac{1 - \frac{T_2}{T_k}}{1 - \frac{T_0}{T_k}}, \quad (8)$$

где σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения жидкости при исходной температуре;

T_0 – исходная температура;

T_k – критическая температура;

T_2 – температура жидкости.

Частоту пульсаций газовой среды будем определять по формуле приведенной в работе [7]

$$\omega = 2\pi f = \frac{\pi n c}{D}, \quad (9)$$

где f, ω – частота колебаний;

n – целое число полувольт (1,2,3,...);

c – скорость звука в камере сгорания;

D – диаметр цилиндра судового дизеля.

При расчетах примем следующие исходные данные. Радиус капли жидкости $R_x = 1 \cdot 10^{-5}$ м.

Радиус зародыша парогазового пузырька $R_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ м. Плотность жидкости $\rho = 905$ кг/м³. Коэффициент поверхностного натяжения жидкости $\sigma = 6,83 \cdot 10^{-3}$ кг/с². Частота пульсаций газовой среды $\omega = 34 \cdot 10^3$ 1/с.

Результаты численного исследования

Проследим за динамикой изменения радиуса парогазового пузырька за один полный период колебаний, при следующих внешних условиях. Статическое давление газовой среды $P_a = 0,1$ МПа. Амплитуда пульсаций давления в среде $P_0 = 0,5$ МПа.

На рисунках 1, 2, и 3 представлены графики изменения давления газовой среды и графики изменения относительного радиуса газового пузырька по времени.

В верхней части рисунков показана диаграмма изменения внешнего давления газовой среды P . В нижней части – диаграмма изменения относительного радиуса газового пузырька \bar{R} .

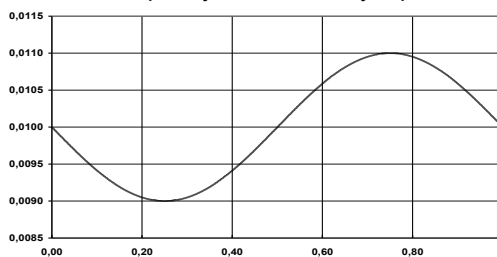


Рис. 1. – Динамика пульсаций давления газовой среды и движения границы парогазового пузырька при $P_a = 0,1$ МПа, $P_0 = 0,01$ МПа.

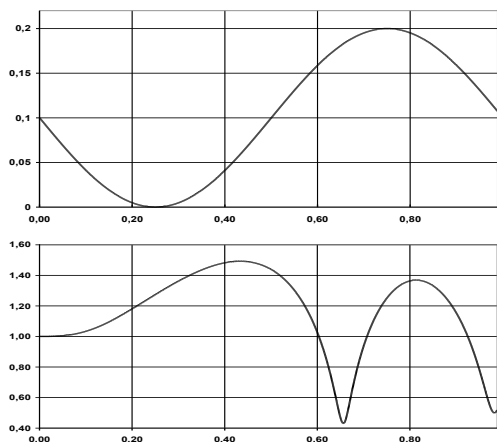


Рис. 2. – Динамика пульсаций давления газовой среды и движения границы парогазового пузырька

расположенного внутри капли при $P_a = 0,1$ МПа, $P_0 = 0,1$ МПа.

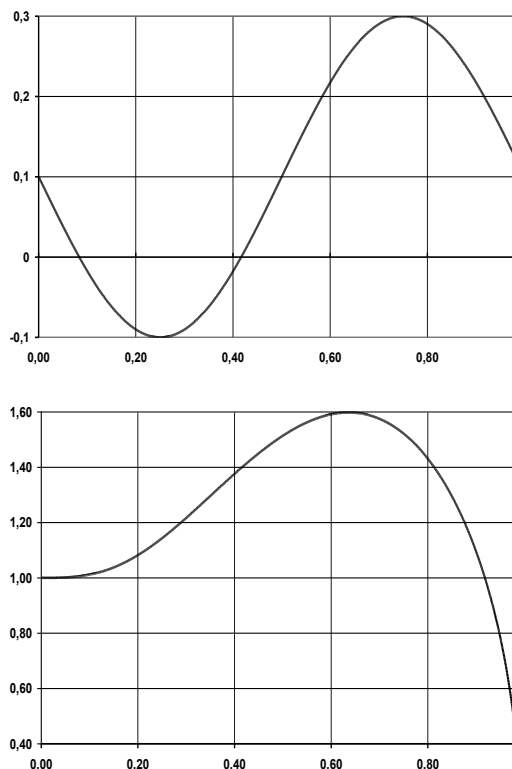


Рис. 3. – Динамика пульсаций давления газовой среды и движения границы парогазового пузырька при $P_a = 0,1$ МПа, $P_0 = 0,2$ МПа.

Из анализа графиков, приведенных на рисунках 1, 2, и 3 видно, что для схлопывания газового пузырька необходимо преодолеть порог кавитационной прочности жидкости. Для этого, амплитуда пульсаций давления окружающей каплю топлива газовой среды должна превышать 0,2 МПа.

При меньших значениях амплитуды пульсаций схлопывания парогазового пузырька не произойдет и процесс кавитации не осуществится.

Результаты численного исследования использованы для проектирования и изготовления камер сгорания высокооборотного дизеля Ч 15/18 с объемным смесеобразованием. Стендовые испытания подтвердили эффективность применения процесса кавитации внутри каплей распыленного топлива при использовании на тяжелых сортах топлива [8].

Литература

1. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под. ред. И.П. Голяминой. -М.: Советская энциклопедия . 1979. -400 с.
2. Ультразвуковая технология / В.А. Агранат и др.// Под ред. Б.А. Аграната. -М.: 1974. -503 с.
3. Перник, А.Д. Проблемы кавитации / А.Д. Перник. -Л.: Судостроение, 1966. -439 с.
4. Каптерев, С.В. Получение низших олефинов низкотемпературным пиролизом углеводородного сырья / С.В. Каптерев, Г.С. Юр, В.Г. Степанов // -Химия нефти и газа: Материалы IV международной конференции. В 2-х т. -Томск: «СТТ», -2000. -С. 294-297.
5. Бесов, А.С. О пороговых эффектах в импульсных волнах разряджения. / А.С. Бесов, В.К. Кедринский, Е.И. Пальчиков // Письма в ЖТФ. -Т. 15. Вып. 16. -С. 37-51.
6. Дубовкин, Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания / Н.Ф. Дубовкин. -М. -Л.: Госэнегроиздат, 1962. -288 с.
7. Юр, Г.С. Волновые процессы в судовых дизельных энергетических установках / Г.С. Юр // Изд-во НГАВТ. Новосибирск. 1999. -109 с.
8. Юр, Г.С. Исследование режима пульсационного горения в камере сгорания дизеля / Г.С. Юр // -Морские интеллектуальные технологии. -2018. -№ 4(42). -Т.4. -С.129-132.

References

1. Ul'trazvuk. Malen'kaya entsiklopediya / Pod. red. I.P. Golyaminoi. -M.: Sovetskaya entsiklopediya . 1979. -400 s.
2. Ul'trazvukovaya tekhnologiya / V.A. Agranat i dr.// Pod red. B.A. Agranata. -M.: 1974. -503 s.
3. Pernik, A.D. Problemy kavitatsii / A.D. Pernik. -L.: Sudostroenie, 1966. -439 s.
4. Kapterev, S.V. Poluchenie nizshikh olefinov nizkotemperaturnym pirolizom uglevodorodnogo sy-r'ya / S.V. Kapterev, G.S. Yur, V.G. Stepanov // -Khimiya nefi i gaza: Materialy IV mezhdunarodnoi kon-ferentsii. V 2-kh t. -Tomsk: «STT», -2000. -S. 294-297.
5. Besov, A.S. O porogovykh effektakh v impul'snykh volnakh razryazheniya. / A.S. Besov, V.K. Kedrin-skii, E.I. Pal'chikov // Pis'ma v ZhTF. -T. 15. Vyp. 16. -S. 37-51.
6. Dubovkin, N.F. Spravochnik po uglevodorodnym toplivam i ikh produktam sgoraniya / N.F. Dubovkin. -M. -L.: Goseenrgoizdat, 1962. -288 s.
7. Yur, G.S. Volnovye protsessy v sudovykh dizel'nykh energeticheskikh ustanovkakh / G.S. Yur // Izd-vo NGAVT. Novosibirsk. 1999. -109 s.
8. Yur, G.S. Issledovanie rezhima pul'satsionnogo goreniya v kamere sgoraniya dizelya / G.S. Yur // -Morskie intellektual'nye tekhnologii. -2018. -№ 4(42). -Т.4. -S.129-132.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК [621.436+621.313.13]:658.562.012.7

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯЖЕНИЙ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Борис Владимирович Палагушкин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Юрий Васильевич Дёмин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Людмила Вадимовна Садовская

кандидат технических наук, доцент кафедры
электроэнергетических систем и электротехники
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Сергей Николаевич Реутов

аспирант
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены детерминированные и статистические методы оценки коррозии металлов и её развитие. Показано, что указанные методы не учитывают конструктивных особенностей систем, сезонности колебаний параметров и их взаимодействие. Рассмотрен пример оценки опасности грунтовой коррозии заземляющих устройств подстанций и воздушных линий. Для многофакторной среды «искусственный заземлитель»-грунт, предложен интегральный критерий (средняя глубина коррозии – интегрирующая воздействия всех возмущающих и тормозящих факторов коррозионного процесса). Прогноз коррозии искусственных заземлителей предложено получить математические модели зависимости $\delta_{cp}(t)$. В статье использован аппарат множественной линейной регрессии позволяет применять её для обработки экспериментальных измерений взаимозависимых переменных. При обработке экспериментальных данных учитывались параметры среды: сезонное время; расстояние от поверхности грунта; удельный вес грунта; объемный вес при определённой влажности; пористость грунта; объем газа в порах; содержание ионов хлора; содержание растворимых солей; водородный показатель (рН) (15 параметров). В итоге построено пять зависимостей с отбрасыванием статистически не значимых факторов. Коэффициент множественности корреляции изменялся от 0,571 до 0,86, а дисперсия уменьшалась от 0,722 до 0,423. Итоговая математическая модель близка к функциональной и рекомендована для реализации в любых регионах, конструкциях и различных коррозионных средах.

Ключевые слова: детерминированные методы, статистические методы, прогноз коррозии, множественная линейная регрессия, зависимость, глубина коррозии – время, параметры грунта

METHOD FOR DETERMINING PROBABILITY CHARACTERISTICS OF GROUNDING DEVICE VOLTAGE

Boris V. Palagushkin

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Yurii V. Demin

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Lyudmila V. Sadovskaya

Candidate of Engineering Sciences, Docent
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Aleksey Yu. Kuznetsov

Candidate of Engineering Sciences, Docent
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Sergey N. Reutov

Graduate student
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str. 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Abstract

The article deals with the deterministic and statistical methods for assessing the corrosion of metals and its development. It is stated that these methods do not take into account the design features of the systems, the seasonal fluctuation of the parameters and their interaction. The example of the danger assessment of substations and aerial cables grounding devices soil corrosion is considered. For the multifactor environment "artificial earthing" is soil, an integral criterion is proposed (the average corrosion depth is the integrating effect of all disturbing and inhibiting factors of the corrosion process). The corrosion prediction of artificial earthing is proposed to be obtained by mathematical models of δ average (t) dependence.

The article uses a multiple linear regression that can be used for processing experimental measurements of interdependent variables. When processing the experimental data, the following environmental parameters were taken into account: seasonal time; distance from the ground surface; soil bulk density; bulk density at a certain humidity; soil porosity; pore gas volume; chloride ion concentration; soluble salt content; hydrogen ion concentration (pH) (15 parameters).

As a result, five dependencies with the drop of statistically insignificant factors have been constructed. The correlation multiplicity index varied from 0.571 to 0.86, and the dispersion decreased from 0.722 to 0.423. The final mathematical model is close to a functional one and is recommended for the implementation in any regions, structures and various corrosive environments.

Key words: deterministic methods, statistical methods, corrosion prediction, multiple linear regression, dependence, corrosion depth - time, soil parameters

При проектировании и сооружении заземляющих устройств (ЗУ) подстанций высокого и сверхвысокого напряжений одним из главных становится вопрос экономичности. Он не может быть решен достаточно строго в рамках одних только детерминированных методов. При его решении необходимо учитывать вероятностный характер параметров грунта, определяющих эффективность работы ЗУ, случайный характер величин токов, нагружающих заземлитель и определяемых схемой сети, случайность присутствия людей на подстанции. Все это в совокупности определяет вероятность поражения человека на территории электроустановки напряжением шага или прикосновения, а также возможность выноса опасного потенциала за ее пределы.

Основными величинами, определяющими уровень электробезопасности на энергетическом объекте, являются напряжение на ЗУ U_3 и уровни напряжений прикосновения $U_{пр}$ на различных участках его территории. В свою очередь они зависят от тока I_3 , стекающего с ЗУ в аварийном режиме; сопротивления растеканию заземлителя; крутизны спада потенциала, определяемого конструкцией ЗУ и параметрами грунта, сопротивления перехода земля - ноги. Эти зависимости выражаются следующими формулами

$$U_3 = I_3 R_3; \tag{1}$$

$$U_{пр} = I_3 R_{г.з} \beta; \tag{2}$$

$$\beta = \frac{R_{чел}}{R_{чел} + R_{с.ног}}, \tag{3}$$

где $R_{г.з}$ - взаимное сопротивление между точкой, в которой находится человек, и заземляющим устройством, определяемое как отношение напряжений между ними при стекании с ЗУ какого-либо тока к значению этого тока; $R_{чел}$ - сопротивление тела человека, принимаемое обычно равным 1000 Ом; $R_{с.ног}$ - сопротивление растеканию с ног человека.

Эти выражения и положены в основу предлагаемых вероятностных расчетов. Известно, что наиболее полную информацию о случайной величине (СВ) несет в себе закон распределения плотности вероятности. При определении законов распределения плотностей вероятностей U_3 и $U_{пр}$ будем полагать, что они уже известны для СВ: I_3 , R_3 , $R_{г.з}$, β . Так как U_3 и $U_{пр}$ являются функциями случайных аргументов - $I_3, R_3, R_{г.з}, \beta$, следующий математический аппарат. Известно, что плотности вероятностей функций двух и трех случайных аргументов можно записать в виде:

$$f_y(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{x_1}[\psi(y, x_2)] f_{x_2}(x_2) \left| \frac{\partial \psi(y, x_2)}{\partial y} \right| dx_2; \quad (4)$$

$$f_y(Y) = \iiint_{-\infty}^{\infty} f_{x_1}[\psi(y, x_2, x_3)] \times f_{x_2}(x_2) f_{x_3}(x_3) \left| \frac{\partial \psi(y, x_2, x_3)}{\partial y} \right| dx_2 dx_3. \quad (5)$$

где $y(x_1, x_2), y(x_1, x_2, x_3)$ - функции двух или трех случайных аргументов; $\psi(y, x_2), \psi(y, x_2, x_3)$ - обратные функции (решение уравнений $y = \varphi(x_2, x_1, x_3)$ относительно x_1 ; $f_x(x), f_y(y)$ - соответствующие плотности распределения вероятностей.

Эти уравнения примем за исходные для дальнейших расчетов. Возможность их аналитического решения определяется видом функций $f_{x_1}(x_1)$,

Исходными данными для расчетов U_3 и U_{np} являются выборки СВ: $I_3, R_3, R_{e.3}, \beta$. Возможен следующий алгоритм определения закона распределения плотностей вероятностей выходных параметров $f_{I_3}(U_3), f_{U_{np}}(U_{np})$.

Подбираются теоретические законы распределения, наилучшим образом соответствующие выборкам исходных параметров $f_{I_3}(I_3), f_{R_3}(R_{e.3}), f_{R_3}(R_3), f_{\beta}(\beta)$

Подбор можно осуществить по минимуму критерия ω^2 .

Некоторые расчеты, выполненные в СибНИИЭ, показывают, что распределения $R_3, R_{e.3}, \beta$, как правило, хорошо совпадают с теоретическими распределениями, близкими логарифмически нормальным и нормальным. Наилучшее совпадение дают кривые распределения плотностей вероятностей, подбор которых осуществляется путем использования оценок всех четырех моментов выборки, - кривые Грама-Шарлье, Джонсона, Пирсона. Особый интерес представляет распределение, полученное асимптотическим разложением в ряд Эджворта остаточного члена $r(x)$ в выражении [1]

$$f(x) = \varphi(x) + r(x), \quad (6)$$

где $\varphi(x)$ - нормальная функция плотности.

Это распределение можно записать в виде ;

$$f(x) = \varphi(x) - \frac{1}{3!} \varphi^{(3)}(x) S_x + \frac{1}{4!} \varphi^{(4)}(x) + \frac{10}{6!}, \quad (7)$$

где m_x - математическое ожидание; δ_x - среднеквадратическое отклонение; S_x - асимметрия; E_x - эксцесс.

Подстановка производных нормальной функции дает следующее выражение:

$$f(x) = \varphi(x) \left[1 + \frac{S_x}{6\delta_x^3} (y^3 - 3y) + \frac{E_x}{24\delta_x^4} (y^4 - 6y^2 + 3) + \frac{S_x^2}{72\delta_x^6} (y^6 - 15y^4 + 45y^2 - 15) \right], \quad (8)$$

при $y = x - m_x / \delta_x$, которое можно использовать для описания выборок с законом распределения плотностей вероятностей, близким к нормальному.

Если распределение $R_3, R_{e.3}, \beta$ представляется возможным описать непрерывным законом распределения, то, как правило, его не применимо по отношению к току, нагружающему ЗУ. К непрерывным величинам относятся случайные величины, для которых правомерно выражение:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \rho(x_i < X < x_i + \Delta x) = 0, \quad (9)$$

где $f_x(x_i)$ - плотность распределения вероятностей случайной величины при $x = x_i$. Иными словами, вероятность того, что случайная величина примет определенное значение, равна нулю.

Этому условию не подчиняется величина I_3 , так как при замыканиях на подстанциях ток, нагружающий исследуемое ЗУ, имеет определенную величину, а вероятность возникновения повреждения на них имеет определенное значение, зависящее от повреждаемости оборудования и не равное нулю. При этом случайная величина I_3 должна быть описана как смешанная. Чтобы иметь возможность использовать приведенный выше математический аппарат для описания I_3 , можно ввести понятие δ -функции:

$$f_{I_3}(i_3) = \sum_{k=1}^n P_k \delta(i_3 - i_k) + \left(1 - \sum_{k=1}^n P_k \right) f_k(i_3), \quad (10)$$

где P_k - вероятность появления тока, равного I_k и обусловленного повреждением в k -ом узле сети (на k -ой подстанции); n - число рассматриваемых узлов сети.

Первая составляющая в приведенном выражении описывает токи, нагружающие ЗУ при повреждениях на подстанциях; вторая - при повреждении на линиях [3]. Если ток через исследуемое ЗУ определяется только замыканиями на подстанции (когда на подстанции нет трансформаторов, работающих с заземленной нейтралью), то распределение переходит в дискретное, а если только на линиях, то в непрерывное. Соответственно в выражении пропадают второй или первый члены. Плотность вероятностей $f_{I_3}(i_3)$, видимо, может быть описана усеченным экспоненциальным распределением.

В выражения (4), (5) необходимо подставить выбранные теоретические законы распределения. Вместо x_1 подставим I_3 , вместо $x_2 - R_3$ и $R_{e.3}$, а вместо $x_3 - \beta$. Производные функций $\psi(y, x_2)$ и

$\psi(y, x_2, x_3)$ можно представить соответственно в виде

$$\psi(y, x_2) = \frac{U_3}{r_3}; \quad \psi(y, x_2, x_3) = \frac{U_{np}}{r_{e.3}} \beta;$$

$$\frac{\partial \psi(y, x_2)}{\partial y} = \frac{1}{r_3}; \quad \frac{\partial \psi(y, x_2, x_3)}{\partial y} = \frac{1}{r_{e.3} \beta}. \quad (11)$$

Исходные уравнения можно переписать:

$$f_U(U_{np}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_I \left(\frac{U_{np}}{r_3} \right) f_{R_3}(r_3) \frac{1}{r_3} dr_3; \quad (12)$$

$$f_U(U_{np}) = \iint_{-\infty}^{\infty} f_I \left(\frac{U_{np}}{r_{e.3}} \right) \frac{f_3(r_{e.3}) f_\beta(\beta)}{r_{e.3} \beta} dr_{e.3} d\beta. \quad (13)$$

Так как I_3 является смешанной случайной величиной, описываемой уравнением (10), выражения (12), (13) переписываются в виде

$$f_U(U_3) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} f_I \left(\frac{U_{np}}{r_3} \right) \frac{f_{R_3}(r_3)}{r_3} dr_3 \right] \times$$

$$\times \left(1 - \sum_{k=1}^n P_k \right) + \frac{1}{r_{e.3}} \int_{-\infty}^{\infty} \sum P_k \delta \left(\frac{U_{np}}{r_3} - i_k \right) f_{R_3}(r_3) dr_3; \quad (14)$$

$$f_U(U_3) = \left(1 - \sum_{k=1}^n P_k \right) \times$$

$$\times \iint_{-\infty}^{\infty} f_I \left(\frac{U_{np}}{r_{e.3} \beta} \right) \frac{f_R(r_{e.3}) f_\beta(\beta)}{r_{e.3} \beta} dr_{e.3} d\beta \times$$

$$\times \frac{1}{r_{e.3} \beta} \iint_{-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^n P_k \delta \left(\frac{U_{np}}{r_{e.3} \beta} - i_k \right) f_{R_{e.3}} dr_{e.3} d\beta. \quad (15)$$

Эти уравнения могут быть достаточно просто решены путем применения численных методов интегрирования и результаты их решения определяют законы распределения плотностей вероятностей $f_{U_3}(U_3)$ и $f_{U_{np}}(U_{np})$.

Следует иметь в виду, что исходные случайные величины принимались независимыми. Учет корреляционной связи этих параметров резко усложняет решение задачи. В частности, нельзя закон распределения плотностей вероятностей системы случайных величин заменять произведением законов распределения плотностей вероятностей отдельных компонентов системы, а это, в свою очередь, не позволит достаточно просто подобрать аппроксимирующий теоретический закон.

Реальные исходные случайные величины нельзя принимать независимыми, так как известно, что параметры грунта в летнее и зимнее время резко отличаются. Различны и уровни токов замыкания, нагружающие заземлители, причем, это различие обусловлено не только неодинаковостью режимов сети (летний минимум и зимний максимум), но и различным переходным сопротивлением в месте замыкания, которое также зависит от параметров грунта. Таким образом, "летний" ток не может стекать с заземлителя, обладающего "зимними" параметрами. Избежать учета зависимости исходных параметров друг от друга позволяет разбиение расчетного периода

времени на отдельные интервалы с последующим расчетом законов распределения плотностей вероятностей $f_{U_3}(U_3)$ и $f_{U_{np}}(U_{np})$ на каждом отдельном отрезке. В частности, необходимо разбиение на зимний и летний периоды, причем их продолжительность должна определяться, исходя из климатических условий района расположения исследуемой подстанции. В отдельных районах необходимо выделять также весенний и осенний периоды. Если при этом выборки исходных случайных величин делать отдельно по каждому сезону, то эти величины можно принимать независимыми и для каждого сезона решать уравнения (14) и (15). Тогда в каждый из выделенных периодов времени мы будем иметь отдельные распределения плотностей вероятностей для $f_{U_3}(U_3)$ и $f_{U_{np}}(U_{np})$.

Необходимость выделения отдельных периодов времени вытекает также и из того факта, что токи, нагружающие ЗУ в летнее и зимнее время, отличаются не только уровнями, но и частотой их появления, а значит, различной будет и частота на заземлителей и напряжений прикосновения на территории подстанции. Иными словами, время их появления не подчиняется закону равномерной плотности, а это, в свою очередь, несет дополнительные трудности при определении частоты появления выходных величин. Выделение же отдельных периодов позволяет в каждый из них определить эту частоту достаточно просто, исходя из повреждаемости линий, примыкающих к подстанции (если на ней есть трансформаторы, работающие с глухозаземленной нейтралью) или исходя из повреждаемости собственного оборудования подстанции (если таких трансформаторов нет).

Таким образом, предлагаемый метод позволяет в табличном виде достаточно просто по выборкам $I_3, R_3, R_{e.3}, \beta$ которые могут быть получены путем расчетов или непосредственных измерений, получить законы распределения плотностей вероятностей величин, $f_U(U_{np})$ и $f_U(U_3)$.

Эти данные могут быть в дальнейшем использованы для оценки вероятности поражения человека на территории подстанции, а также вероятности выноса опасного потенциала за ее пределы, которая определяет возможность поражения людей вне энергетического объекта. На данном этапе не рассматривались вопросы получения репрезентативных выборок исходных параметров, но они должны достаточно полно отражать соответствующие генеральные совокупности. Эти выборки, как упоминалось выше, могут быть получены путем непосредственных измерений или расчетов. Естественно задать вопрос: а можно ли закладывать уже в проект определенную вероятность поражения человека? Ведь, вообще говоря, человеческая жизнь бесценна и экономическая сторона отходит здесь на задний план. Может лучше обеспечить 100% - ную безопасность?

Видимо, эти вопросы носят скорее социологический характер, чем технический. Можно только отметить тот факт, что определенная вероятность поражения имеется на

любой реально существующей подстанции и неявно заложена в уже существующие нормы. Сооружая ЗУ не из расчета на экстремальные условия, а из условия обеспечения вероятности поражения ниже заданной, можем получить и более высокий общий уровень безопасности за счет освобожденных средств, которые могут быть использованы более эффективно здесь же либо где-то в другом месте, где этот уровень значительно ниже. При проектировании новых подстанций применение вероятностных методов может помочь выбрать вероятность поражения человека, которую задают исходя из разумного разрешения противоречия между гуманностью и экономичностью, при данных параметрах сети и грунта и оптимальную конструкцию ЗУ.

Расчеты вероятностей поражения человека на уже существующих подстанциях позволяют накопить необходимый статистический материал и с учетом зарубежного опыта нормирования [4] создать нормы на параметры заземляющих устройств с учетом их вероятностного характера. Появится возможность принимать наиболее оптимальные решения при выборе и сооружении ЗУ подстанций.

Выводы

При оценке уровня электробезопасности на территории подстанции и вне ее необходимо учитывать вероятностный характер определяющих его параметров.

Применение математического аппарата функций случайных величин позволяет достаточно строго определить законы распределения плотностей вероятностей напряжения на заземляющем устройстве и напряжений прикосновения на территории подстанции по известным законам распределения токов, нагружающих заземлитель, сопротивления растеканию ЗУ, взаимных сопротивлений в исследуемых точках подстанции и переходного коэффициента β земля-ноги.

Необходимо учитывать тот факт, что распределение токов, стекающих с заземлителя, как правило, не представляется возможным описать непрерывным законом распределения: обычно это дискретная или смешанная случайная величина.

Для проведения конкретных расчетов необходимо выделить отдельных сезонных периодов с оценкой уровня электробезопасности в течение каждого из них.

Литература

- 1 Дёмин, Ю.В. Обеспечение долговечности электросетевых материалов конструкций в агрессивных средах. Книга 1. Теоретические основы / Дёмин Ю.В., Дёмина Р.Ю., Горелов В.П. Теоретические основы. 2-е издание стереотипное. -М., -Берлин: Директ-Медиа., 2016. -208 с.
- 2 Дёмин, Ю.В. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах. Книга 2. Практические рекомендации 2-е издание стереотипное Теоретические основы / Дёмин Ю.В., Дёмина Р.Ю., Горелов В.П. Теоретические основы. 2-е издание стереотипное. -М., -Берлин: Директ-Медиа., 2016. -208 с.
- 3 Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. -М.: Мир,1975. -648 с.
- 4 Яноши, Л. Теория и практика обработки измерений/ Яноши Л. -М.: Мир,1977.-462 с.
- 5 Прохоренко, С.В. Статистический подход к выбору расчетной величины тока заземлителя. - В кн.: Надежность и электробезопасность электрооборудования в районах Крайнего Севера / С.В. Прохоренко, Ю.В. Целебровский. -Норильск: Изд-во Норильского индустриального института,1977. -С.142-146.
- 6 Целебровский, Ю.В. Вероятностный подход к нормированию заземлений в Финляндии / Ю.В. Целебровский, С.В. Прохоренко // -Энергохозяйство за рубежом. -1978. -№3. -С.23-26.

References

- 1 Demin, Yu.V. Obespechenie dolgovechnosti elektrosetevykh materialov konstruksiy v agressivnykh sredakh. Kniga 1. Teoreticheskie osnovy / Demin Yu.V., Demina R.Yu., Gorelov V.P. Teoreticheskie osno-vy. 2-e izdanie stereotipnoe. -M., -Berlin: Direkt-Media., 2016. -208 s.
- 2 Demin, Yu.V. Obespechenie dolgovechnosti elektrosetevykh materialov i konstruksiy v agressivnykh sredakh. Kniga 2. Prakticheskie rekomendatsii 2-e izdanie stereotipnoe Teoreticheskie osnovy / Demin Yu.V., Demina R.Yu., Gorelov V.P. Teoreticheskie osnovy. 2-e izdanie stereotipnoe. -M., -Berlin: Direkt-Media., 2016. -208 s.
- 3 Kramer, G. Matematicheskie metody statistiki / G. Kramer. -M.: Mir,1975. -648 s.
- 4 Yanoshi, L. Teoriya i praktika obrabotki izmereniy/ Yanoshi L. -M.: Mir,1977.-462 s.
- 5 Prokhorenko, S.V. Statisticheskij podkhod k vyboru raschetnoy velichiny toka zazemlitya. - V kn.: Nadezhnost' i elektrobezopasnost' elektrooborudovaniya v rayonakh Kraynego Severa / S.V. Prokhoren-ko, Yu.V. Tselebrovskiy. -Noril'sk: Izd-vo Noril'skogo industrial'nogo instituta,1977. -S.142-146.
- 6 Tselebrovskiy, Yu.V. Veroyatnostnyy podkhod k normirovaniyu zazemleniy v Finlyandii / Yu.V. Tselebrovskiy, S.V. Prokhorenko // -Energo Khozyaystvo za rubezhom. -1978. -№3. -S.23-26.

УДК [621.436+621.313.13]:658.562.012.7

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ СРЕДЫ

Борис Владимирович Палагушкин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Юрий Васильевич Дёмин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Людмила Вадимовна Садовская

кандидат технических наук, доцент кафедры
электроэнергетических систем и электротехники
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Алексей Юрьевич Кузнецов

кандидат технических наук, доцент кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Сергей Николаевич Реутов

аспирант
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Аннотация

В статье предложено учитывать при оценке электробезопасности вероятностный характер определяющих его параметров. Применён математический аппарат функций случайных величин позволивший определить законы распределения плотностей вероятностей напряжения на заземляемом устройстве и напряжение прикосновения на территории подстанции. С учётом законов распределения токов, нагружающих заземлитель, можно определить сопротивление растеканию взаимных сопротивлений в известных точках подстанции и переходного коэффициента «земля-ноги». Случайный характер величин токов, нагружающих заземлитель определяется схемой сети, случайностью присутствия людей на подстанции. Эти факторы определяют вероятность поражения человека на территории электроустановки напряжением шага и прикосновения, а также возможность выноса потенциала за её пределы. Показано, что распределение токов стекающих с заземлителя не представляется возможным описать непрерывным законом распределения; это дискретная или смешанная случайная величина. Необходимо проведение конкретных расчетов выделением отдельных сезонных периодов с оценкой уровня электробезопасности в течении каждого из них.

Ключевые слова: вероятностный характер напряжения, параметры грунта, сопротивление растеканию, напряжение прикосновения, распределение токов стекающих с заземлителя, дискретная и случайная величина, переходный коэффициент «земля – ноги»

EVALUATING DURABILITY OF POWER EQUIPMENT BY ENVIRONMENTAL PARAMETERS

Boris V. Palagushkin

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Yurii V. Demin

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Lyudmila V. Sadovskaya

Candidate of Engineering Sciences, Docent
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Aleksey Yu. Kuznetsov

Candidate of Engineering Sciences, Docent
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Sergey N. Reutov

Graduate student
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str. 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Abstract

While estimating the electrical safety, the article proposes to take into account the probabilistic nature of the parameters determining it. The mathematical apparatus of random variables functions is used, which allows to determine the laws of the distribution of the density voltage probability on the device to be grounded and the voltage of touch on the territory of the substation. Taking into consideration the laws of distribution of currents, loading the grounding device, we can determine the resistance to spreading of mutual resistances at known points of the substation and the transition coefficient "earth - feet". The random nature of the values of the currents loading the grounding device is determined by the network circuit, the randomness of the people presence at the substation. These factors determine the probability of a person hitting at the territory of an electrical installation with a voltage of a step and a touch, as well as the possibility of carrying the potential outside. It is shown that the distribution of currents flowing from the grounding device is impossible to describe with a continuous distribution law; this is a discrete or a mixed random variable. It is necessary to carry out specific calculations by distinguishing individual seasonal periods with an assessment of the level of electrical safety during each of them.

Key words: probabilistic nature of the voltage, soil parameters, resistance to spreading, touch voltage, distribution of currents flowing from the grounding device, discrete and random variables, the ground-to-foot transition coefficient

Срок службы металлических элементов электроэнергетических систем различных классов напряжений, в значительной степени определяется их коррозией, которая зависит от многообразия условий эксплуатации. На коррозию металла влияют окружающая среда (химический состав и концентрация электролита, его температура, насыщение газами и т.д.) и конструктивные особенности элементов систем. Вопросы повышения надежности и долговечности работы оборудования могут быть обоснованно решены только в том случае, если имеется возможность оценивать и прогнозировать коррозионное состояние элементов системы.

Известны детерминированные и статистические методы оценки коррозии металлов и ее развития. Детерминированные методы основаны на оборе и анализе локальной информации о глубине разрушения или потери массы коррозионных моделей. Статистические методы требуют сбора большого объема информации о комплексе параметров окружающей среды и анализа их изменений во времени. Указанные методы не учитывают конструктивных особенностей систем, сезонности колебаний параметров и их взаимодействия, что является существенным их недостатком.

Большинство исследований по оценке агрессивности среды и прогноза коррозии сводятся к поиску параметров, однозначно определяющих этот процесс. Кроме оценки коррозионности среды по ее дельному сопротивлению, существуют

методики, оценивающие ее по другим параметрам, а также по группам, например, по среднегодовой температуре, по потоку кислорода к корродирующей поверхности и т.д. Можно считать, что это справедливо только для определенных условий (для замкнутой системы, непротяженных сооружений и т.д.) или отдельных моментов времени. Все используемые для оценки коррозии параметры среды изменяются во времени. Постоянно изменяется соотношение этих параметров в данной точке пространства для данного элемента сооружения, а для новых условий определяющими могут стать совсем другие факторы.

Рассмотрим пример оценки опасности грунтовой коррозии заземляющих устройств подстанций и воздушных линий. Исходной методикой для анализа послужила разработанная ранее методика, в которой используется как детерминированный, так и статистический методы. В этой методике предложена следующая математическая модель процесса электрохимической коррозии металлов:

$$\delta_{cp} = a \ln^3 t + b \ln^2 t + c \ln t + d, \quad (1)$$

где δ_{cp} - средняя оценочная глубина коррозионной каверны; t - срок службы сооружения; a, b, c, d - постоянные коэффициенты, определяемые методом численного анализа.

Определена также и качественная связь коэффициентов уравнения со следующими параметрами грунта:

ρ - удельное сопротивление грунта;
 W - естественная весовая влажность;
 K_w - степень насыщения;

$C = CL = \frac{SO_4}{W}$ - концентрация грунтового

раствора;

$\frac{CL}{SO_4}$ - соотношение содержания агрессивных

ионов. Все эти параметры являются переменными и зависят друг от друга, а связь коррозии с ними является статистической.

При статической связи между коррозией и внешними факторами, влияющими на этот процесс, предпочтительны методы установления количественных зависимостей между этими величинами; эти методы предполагают минимальное число априорных допущений относительно природы исследуемого объекта.

С этой точки зрения аппарат множественной линейной регрессии является наиболее целесообразным, как хорошо обоснованные формальный метод изучения эмпирических закономерностей, применяемый тогда, когда исследователь сознательно хочет отказаться от детального, традиционного изучения механизма явлений, протекающих в изучаемой системе.

Для оценки параметров вектора линейной регрессии методом наименьших квадратов требуются допущения, касающиеся статистических свойств ошибок зависимой переменной [2-4]. Отклонения от основных допущений метода наименьших квадратов, которые имеют реальные объекты исследования, приводят к необходимости экспериментальной проверки результатов исследования, а также уточнения методов обработки экспериментальных исследований и методов сбора информации об исследуемом объекте по мере получения новых сведений об объекте исследования.

Общая теория линейной регрессии [2, 3] содержит предположения позволяющие применять ее для обработки экспериментальных измерений взаимозависимых переменных.

Смысл слова «линейный» в общей модели линейной регрессии относится только к элементам вектора параметров θ но не к элементам вектора X зависимости

$$Y = F(X)\theta + \varepsilon, \quad (2)$$

где Y - вектор-столбец наблюдений глубин коррозионных каверн размерностью N ($Y = \|\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\|$); θ - вектор-столбец параметров линейной регрессии размерностью N ; $F(X)$ - матрица размерностью $N \times K$ известных не случайных величин (регрессоров); ε - вектор ошибок случайных величин (не обязательно нормальных) размерностью N со средними значениями, равными нулю, и матрицей рассеяния, элементы которой равны нулю, за исключением диагональных элементов, равных δ^2 .

Эти условия соответствуют предположению о том, что элементы ошибок не коррелированы,

имеют средние значения, равные нулю и равную для всех измерений дисперсию δ^2 .

Элементами строк матрицы $F(X)$ являются величины:

$$\Phi(X) = \|\Phi_1(X), \Phi_2(X), \dots, \Phi_k(X)\|,$$

где $\Phi(X)$ известные функции преобразований вектора X , размерностью ρ .

Элементы вектора X являются исходными численными величинами физико-химических параметров среды, полученными экспериментально (ρ, K_w, C).

Метод наименьших квадратов состоит в минимизации скалярной суммы квадратов

$$S = \sum_{j=1}^N \varepsilon_j = [Y - F(X)\theta]^T [Y - F(X)\theta],$$

по компонентам вектора θ .

Необходимым условием минимизации скалярной суммы квадратов является условие

$$\frac{\partial S}{\partial \theta} = -2F(X)Y + 2F(X)F(X)\theta = 0,$$

из которого определяют систему нормальных уравнений, имеющую в матричной форме вид

$$F(X) = F(X)F(X)\hat{\theta}.$$

Из этой системы нормальных уравнений находим выражение для оценки вектора параметров линейной регрессии

$$\hat{\theta} = F(X)F(X)^{-1}F(X)Y = M^{-1}Y, \quad (3)$$

где $M = F(X)F(X)$ - матрица размерностью $N \times N$; $Y = F(X)Y$ - вектор размерностью N .

Оценка остаточной дисперсии линейной регрессии определяется из выражения

$$\bar{S}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N [Y - \Phi(X_j)]^2}{N - K}. \quad (4)$$

Для оценки доверительных интервалов компонент вектора параметров $\hat{\theta}$ необходимо предположение о нормальности распределения вектора ошибок ε линейной модели (2) [2].

Отношение

$$\hat{t} = \frac{|\hat{\theta}_j - \theta_j|}{\sqrt{S^2 M_{jj}^{-1}}}, \quad (5)$$

подчинено t -распределению Стьюдента. Для выбранного уровня значимости α гипотеза о равенстве оценки элемента вектора некоторому значению θ_j отвергается, если,

$$\hat{t} > t_{\alpha, \nu}, \quad (6)$$

где ν - число степеней свободы, $\nu = N - K$; $t_{\alpha, \nu}$ - табличное значение статистики Стьюдента для двухстороннего ограничения.

Для гипотезы о значимом отличии элемента вектора θ_j от нуля выражение (5) имеет вид

$$\hat{t} = \frac{|\hat{\theta}_j|}{\sqrt{S^2 M_{jj}^{-1}}}. \quad (7)$$

Отношение

$$\hat{t} = \frac{|\bar{\delta} - \hat{\delta}|}{\sqrt{S^2 \Phi(X_{\delta}) M^{-1} \Phi(X_{\delta})}} \quad (8)$$

где $\bar{\delta}$ - оценка экспериментального значения глубин коронных каверн; $\hat{\delta}$ - оценка математического ожидания глубин коррозионных каверн при фиксированном значении физико-химических параметров среды X_{δ} , имеет t -распределение Стьюдента. Гипотеза о принадлежности экспериментального измерения $\bar{\delta}$ зависимой переменной к регрессионной модели с параметрами $\bar{\theta}$ и вектором регрессоров $\Phi(X_{\delta})$ отвергается, если

$$\hat{t} > t_{\alpha, \nu} \quad (9)$$

где $t_{\alpha, \nu}$ и ν - аналогичны величинам выражения (6), а \hat{t} вычисляется согласно отношению (8).

Значимость вклада в регрессионную зависимость группы параметров оценивается по соотношению

$$F = \frac{\hat{\Theta}_1 Y_1 - \hat{\Theta}_1 Y_2}{S^2 (\nu_1 - \nu_2)} \quad (10)$$

где $\nu_1 - \nu_2$ - число исключенных параметров из модели 2. Индексы 1 и 2 указывают на принадлежность соответствующих величин к регрессионным моделям с большим и меньшим числом параметров. Отношение (10) имеет распределение Фишера со степенями свободы $\nu_1 - \nu_2$.

При выполнении условия

$$F = F_{\alpha; \nu_1 - \nu_2, \nu_1} \quad (11)$$

гипотеза о значимом вкладе группы переменных в регрессионную зависимость, помеченную индексом $\bar{1}$, подтверждается с уровнем значимости α [4].

Оценку множественного коэффициента корреляции зависимой переменной от совокупности регрессоров, входящих в линейную модель, находим из выражения:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (\bar{\delta}_j - \hat{\delta}_j)^2}{\sum_{j=1}^n (\bar{\delta}_j - \bar{\delta}_{cp})^2} \quad (12)$$

где $\bar{\delta}_j$ - экспериментальное значение зависимой переменной; $\hat{\delta}_j$ - оценка зависимой переменной согласно регрессионной зависимости; $\bar{\delta}_{cp}$ - эмпирическое среднее значение зависимой переменной [3].

Значение множественного коэффициента корреляции тем выше, чем меньше отклонение между экспериментальными измерениями зависимой переменной и их оценками согласно регрессионной зависимости.

Гипотеза об отличии коэффициента множественной корреляции от нуля проверяется согласно условию

$$F > F_{\alpha; k-1, N-K} \quad (13)$$

Критерий F является реализацией выборочной функции, которая удовлетворяет распределению

Фишера с $K-1$ и $N-K$ степенями свободы и определяется из выражения [5]

$$F = \frac{R^2 (N-K)}{(K-1)(1-R^2)} \quad (14)$$

где R - коэффициент множественной корреляции; N - объем выборки зависимой переменной; K - число регрессоров.

Метод наименьших квадратов теоретически разработан для модели (2) многомерной регрессии, когда элементы вектора ε удовлетворяют условиям: равенство нулю средних значений; равенство дисперсий; некоррелированность и принадлежность к нормальному распределению. Предполагается, что элементы матрицы $F(X)$ являются

величинами не случайными и измерены без ошибок. Для реализации экспериментальных измерений все эти условия в той или иной степени нарушаются, однако это не уменьшает универсальности метода наименьших квадратов, так как многие из этих условий удовлетворяются при увеличении объема выборки измерений. Ошибки измерения регрессоров во многих реальных измерениях распределены нормально в силу центральной предельной теоремы. Так, если ошибка измерения является результатом N возникающих по различным причинам ошибок, то при возрастании N распределение ошибки стремится к нормальному независимо от того, каковы распределения вероятностей каждой из ошибок [3].

В работе [2] для одномерной линейной регрессии показано, что влияние ошибки в изменении регрессора выражается в уменьшении абсолютных параметров регрессии, а также в уменьшении коэффициента корреляции.

Для случая многих регрессоров случайные ошибки при обычной оценке методом наименьших квадратов приводят к смещенным оценкам элементов вектора $\hat{\Theta}$ [3]. Величина смещения зависит от того, насколько матрица M в выражении (3) близка к вырожденной.

Использование в качестве регрессоров переменных, которые являются оценками средних значений ненаблюдаемых величин, приводят к регрессионным моделям, аналогичным тем, у которых регрессоры имеют ошибки измерений при проведении эксперимента.

Влияния отклонений от основных положений метода наименьших квадратов на результаты оценок параметров линейной регрессии детально анализируются в работах [2, 3].

Исследования статистической зависимости процесса коррозии и факторов, влияющих на этот процесс, находятся на том этапе, когда целесообразно применение наиболее универсального и формализованного метода построения регрессионных моделей с тем, чтобы в дальнейшем на основании полученных результатов развить более специальные методы оценки опасности коррозии по факторам окружающей среды.

С использованием экспериментальных данных, полученных на реальных энергетических объектах одного из регионов СНГ, был построен ряд

моделей. В модели (15) использованы те же параметры грунта, что и в модели (1) без учета взаимных влияний между ними, т.е.

$$\ln \hat{\delta}_{cp} = -0,952 + 0,00165t, \quad (15)$$

Все переменные в этой модели, за исключением срока t службы сооружения, оказались статистически незначимыми. При этом коэффициент множественной корреляции для такой модели составил $R = 0,261$, а оценка остаточной дисперсии модели $S^2 = 0,874$.

Далее была сделана попытка учесть взаимное влияние этих же параметров. В результате была получена модель (16) со смешанными моментами между переменными

$$\begin{aligned} \ln \hat{\delta}_{cp} &= C[3,5W = 0,15t - 19,8 - 78,2K_w] = \\ &= \frac{C1}{SO_4}(10,6K_w - 0,5) - 0,03K_w\rho. \end{aligned} \quad (16)$$

у которой более чем в два раза вырос коэффициент ($R = 0,571$) и уменьшилась $S(0,722)$

. Оценка коррозии по этой модели гораздо лучше соответствует экспериментальным данным и согласуется с существующими понятиями о влиянии параметров среды на величину коррозии в пределах интервала их варьирования.

Влияние на оценку коррозии большего числа переменных показывает модель (17), в которой при обработке были использованы, кроме вышеперечисленных параметров, следующие: t - сезонное время; h - расстояние от поверхности грунта до сооружения; ρ - удельный вес грунта; Δ - объемный вес при влажности W ; Π - пористость грунта; V_2 - объем газа в порах; Cl' - содержание ионов хлора; S_0 - содержание растворимых солей; ρH - водородный показатель и т.д. (всего 15 параметров)

$$\begin{aligned} \ln \hat{\delta}_{cp} &= 8,0 = 0,0046t + 1,4h + \\ &+ 0,008\rho + 6,2K_w + 0,13V_2 + \\ &+ 0,13V_2 + 2,6Cl' - 0,2S_0. \end{aligned} \quad (17)$$

Не вошедшие в данную модель параметры оказались статистически незначительными. Коэффициент множественной корреляции и остаточная дисперсия составили соответственно 0,71 и 0,675. Отсюда следует, что увеличение числа переменных повышает точность оценки коррозии в интервале изменения параметров.

Последняя модель (18) была получена на основании обработки этих же переменных с учетом их взаимного влияния

$$\begin{aligned} \ln \hat{\delta}_{cp} &= 0,035(200 - t)(0,01\rho + Cl') + \\ &+ 0,64h(36 - \rho) - 0,3S_0(2 - Cl') - \\ &- 30,5 + 0,25W + 9,0\Delta + 0,33V_2 + 0,04tK_w. \end{aligned} \quad (18)$$

Эта модель дает наибольшее соответствие оценок экспериментальных данных (рис. 1) при $R = 0,86$ и $S_2 = 0,423$. Из модели видно, что с течением времени происходит изменение удельного сопротивления грунта ρ , содержание ионов хлора Cl' и влаги в порах K_w .

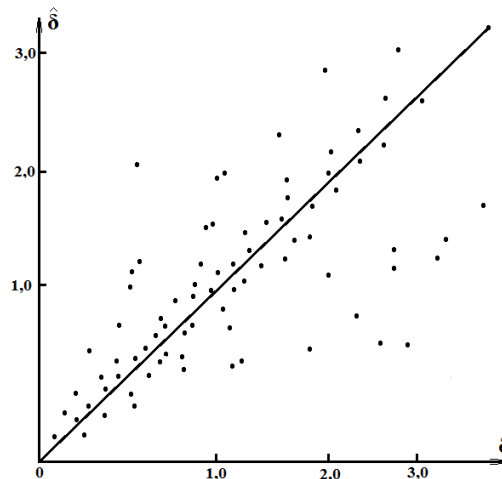


Рис. 1. Разброс оценок $\hat{\delta}$ объекта исследования относительно экспериментальных значений δ , лежащих на прямой

Связанными между собой являются: содержание растворимых солей S_0 и ионов хлора Cl' . Параметры W , Δ , V_2 , K_w характеризуют влияние влажности и структуры грунта на величину коррозии и закономерно увеличивают ее при возрастании влажности в интервале варьирования $0,56\% \leq W \leq 26\%$. Всё это хорошо согласуется с физическими представлениями о влиянии параметров окружающей среды на процесс коррозии.

Предложенная методика практически реализована для одного из грунтовых регионов СНГ и выполнена в виде карты, на основе которой оценивается и прогнозируется коррозионное состояние искусственных и естественных заземлителей.

С ростом класса напряжения увеличиваются габаритные размеры подстанций и опор воздушных линий. Это безусловно, окажется и на процессе коррозии. В этих условиях модель для оценки опасности коррозии должна включать параметр, учитывающий изменение конструкции.

В перспективе подобная методика может быть реализована для любых регионов, конструкций и различных коррозионных сред.

Литература

- 1 Дёмин, Ю.В. Обеспечение долговечности электросетевых материалов конструкций в агрессивных средах. Книга 1. Теоретические основы / Дёмин Ю.В., Дёмина Р.Ю., Горелов В.П. Теоретические основы. 2-е издание стереотипное. -М., -Берлин: Директ-Медиа., 2016. -208 с.
- 2 Дёмин, Ю.В. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах. Книга 2. Практические рекомендации 2-е издание стереотипное Теоретические основы / Дёмин Ю.В., Дёмина Р.Ю., Горелов В.П. Теоретические основы. 2-е издание стереотипное. -М., -Берлин: Директ-Медиа., 2016. -208 с.
- 3 Налимов, В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. -М.: Наука, 1971. -207 с.
- 4 Кендалл, М.Д. Статистические выводы и связи / М.Д. Кендалл, А. Стьюарт. -М.: Наука, 1973, -899 с.
- 5 Себер, Д. Линейный регрессионный анализ / Д. Себер. -М.: Мир, 1980, -456 с.
- 6 Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. -М.: Мир, 1973. -958 с.
- 7 Шторм, Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / Р. Шторм. -М.: Мир, 1970. -225 с.

References

- 1 Demin, Yu.V. Obespechenie dolgovechnosti elektrosetevykh materialov konstruksiy v agressivnykh sredakh. Kniga 1. Teoreticheskie osnovy / Demin Yu.V., Demina R.Yu., Gorelov V.P. Teoreticheskie osno-vy. 2-e izdanie stereotipnoe. -M., -Berlin: Direkt-Media., 2016. -208 s.
- 2 Demin, Yu.V. Obespechenie dolgovechnosti elektrosetevykh materialov i konstruksiy v agressivnykh sredakh. Kniga 2. Prakticheskie rekomendatsii 2-e izdanie stereotipnoe Teoreticheskie osnovy / Demin Yu.V., Demina R.Yu., Gorelov V.P. Teoreticheskie osnovy. 2-e izdanie stereotipnoe. -M., -Berlin: Direkt-Media., 2016. -208 s.
- 3 Nalimov, V.V. Teoriya eksperimenta / V.V. Nalimov. -M.: Nauka, 1971. -207 s.
- 4 Kendall, M.D. Statisticheskie vyvody i svyazi / M.D. Kendall, A. St'yuart. -M.: Nauka, 1973, -899 s.
- 5 Seber, D. Lineynyy regressionnyy analiz / D. Seber. -M.: Mir, 1980, -456 s.
- 6 Khimmel'blau, D. Analiz protsessov statisticheskimi metodami / D. Khimmel'blau. -M.: Mir, 1973. -958 s.
- 7 Shtorm, R. Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Statisticheskiy kontrol' kachestva / R. Shtorm. -M.: Mir, 1970. -225 s.

УДК [621.436+621.313.13]:658.562.012.7

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СТАЛЬ-АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Борис Владимирович Палагушкин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Юрий Васильевич Дёмин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Сергей Николаевич Реутов

аспирант
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Алексей Юрьевич Кузнецов

кандидат технических наук, доцент кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Алексей Валерьевич Жаров

кандидат технических наук, доцент кафедры
информационных систем
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Владимир Юлиусович Гросс

кандидат технических наук, доцент кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Аннотация

В статье приведена методика построения диаграммы оценки идеальности технической системы (ДОИТС). Построена диаграмма для проводов АС, АЕРО-Z, J-Power. Анализ результатов для различных проводов показывает что, уровень технического развития проводов отличается значительно. Для сравнительной оценке уровня развития введен интегральный коэффициент идеальности технической системы. Предложена градация для $K_{итс}$. В интервале от 0 до 40% уровень развития низкий, при значениях $K_{итс}$ от 40 до 60% уровень развития – средний, от 60 до 100% высокий. Для проводов типа АС $K_{итс}$ составляет 40% низкий уровень развития, для проводов АЕРО-Z 68,12%, J-Power 67,91% уровень развития высокий. На основании анализа диаграмм можно делать количественный прогноз развития проводов.

Ключевые слова: интегральный коэффициент идеальности, линии развития, провода, диаграмма оценки идеальности, прогнозирование развития проводов

ANALYSIS OF THE STEEL AND ALUMINUM OVERHEAD CONDUCTOR TECHNICAL SYSTEMS DEVELOPMENT

Boris V. Palagushkin

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Yurii V. Demin

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Sergey N. Reutov

Graduate student

Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str. 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Aleksey Yu. Kuznetsov

Candidate of Engineering Sciences, Docent
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Aleksey V. Zharov

Candidate of Engineering Sciences, Docent
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Vladimir Yu. Gross

Candidate of Engineering Sciences, Docent
Siberian State University of Water Transport
630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33
e-mail: d.sovet.ssuwt@mail.ru

Abstract

The article presents a method for making a technical systems ideality assessment diagram (TSIAD). The diagram for AC, AERO-Z and J-Power wires has been made. The analysis of the results connected to different wires shows that the technical development level of wires differs significantly. A technical system integral ideality factor has been introduced to comparatively assess the development level. The gradation for the technical system integral ideality factor has been proposed. The development level is considered low within the range of 0 to 40%, it is considered medium within the range of 40 to 60% and it is considered high within the range of 60 to 100%. For AC wires, the technical system integral ideality factor is 40% (low development level), for AERO-Z wires it is 68.12%, and for J-Power wires it is 67.91% (high development level). It is possible to make a quantitative forecast of the wire development based on the analysis of the diagrams.

Key words: integral ideality factor, development lines, wires, ideality assessment diagram, wire development forecasting

Последние годы многие регионы и города Российской Федерации сталкиваются с проблемой ограниченной пропускной способности линий электропередач. По данным ОАО "ФСК ЕЭС" это 16 областей в том числе Московская, Ленинградская области, Краснодарский и Пермские Края и другие.

Сегодня энергопотребление этих регионов в несколько раз превышает потребности в энергоснабжении, заложенные в энергетической стратегии РФ до 2020 года и потребление в них постоянно растёт.

Актуальность проблемы заключается в следующем.

Электросетевые компании вынуждены применять следующие классические методы:

- Строительство дополнительных воздушных линий (ВЛ).

- Замена проводов на большие поперечные сечения.

- Повышение напряжения.

- Расщепление фазы.

Эти методы имеют недостатки:

- Строительство дополнительных воздушных линий, что связано с большими капитальными вложениями, получением разрешений на строительство.

- Замена проводов на большие поперечные сечения: замена сталь - алюминиевых проводов на провода большего сечения, что имеет большую массу; создание повышенных нагрузок на элементы опор (старые опоры часто не рассчитаны на эти нагрузки).

- Необходимость монтировать дополнительные опоры (проблемы в густонаселённых районах и районах частных земель.)

Отсюда актуальность:

- Необходимость повышения передаваемой мощности теми же линиями без строительства новых линий.

- Обоснованность применения современных типов проводов, отвечающих требованиям: максимально высокой электропроводности, высокой механической прочности, небольшой погонной массе, устойчивости к высоким температурам, малым температурным удлинениям, устойчивости к коррозии и ветровым воздействиям.

Ряд требований противоречивы (конкурирующие требования).

Например, наилучшая максимальная прочность обеспечивается сталью, а наилучшая электропроводность и малая масса алюминием.

Для получения необходимой температурной устойчивости в научных исследованиях рассматривалось применение:

- дисперсно - твердеющих материалов

- циркониевых сплавов

- композитных материалов

- волокон оксида алюминия

Известные мировые фирмы изготовители проводов, Nexans (Бельгия), Lumpi-Berndorf (Австрия), J-Power Systems (Япония) [1,2,3].

При сравнении проводов следует обратить внимание, что это является сложной задачей по

той причине, что существенных параметров проводов несколько. Если одно сравнение показывает неоспоримое преимущество одного провода, то сравнение других характеристик показывает результат вплоть до противоположного.

Представляется целесообразным использовать методику многофакторного анализа - диаграмму оценки идеальности технических систем (ДОИТС).

Сравнительные характеристики проводов.

При равном диаметре проводов АС и АЕРО-Z, провод АЕРО-Z превосходит классический сталь - алюминиевый провод:

- сечение выше на - 43%;
- сопротивление Ом/км меньше на - 33%;
- разрывное усилие меньше на - 13%;
- масса больше на - 15%;
- аэро сопротивление выше на - 18%.

Для сравнительной оценки проводов разных типов (разработок) введём $K_{ИТС}$ - коэффициент интегральной оценки идеальности технической системы.

Воспользуемся методикой «Диаграмма Оценки Идеальности Технических Систем» (ДОИТС) [1-3].

Провод АС: $K_{ИТС} = 40,45\%$, стоимость 1 ед. 1735 евро/км.

Провод АЕРО-Z: $K_{ИТС} = 67,91\%$, стоимость 6 ед. 13700 евро/км.

Провод J-POWER: $K_{ИТС} = 69,79\%$, стоимость 4,5-5,5 ед. 8800 евро/км.

Для построения ДОИТС проводов разных типов составим таблицы 1,2,3 «Поэлементный анализ технического объекта».

На основании данных таблиц 1,2,3 построим ДОИТС для проводов АС (рисунок 1), АЕРО-Z (рисунок 2), J-Power Systems (рисунок 3).

Для оценки уровня развития проводов введём $K_{ИТС}$, рассчитываемый по формуле: Идеальность ТС = (сумма оценок/240) x100%.

Коэффициент $K_{ИТС}$ позволяет количественно оценить уровень разработки ТС. Исследования показывают, что $K_{ИТС}$ изменяется в пределах от 0 до 100%. При изменении от 0 до 40% уровень ТС – «низкий». При изменении от 40 - до 60% $K_{ИТС}$ - «средний», от 60 - до 100% уровень ТС - $K_{ИТС}$ - «высокий».

Таблица 1

Линии развития провода АС

| № | Линии развития ТС | На схеме | АС | Обоснование |
|----|--|-------------|-----|--|
| 1 | Макро - Микро | МакрМикр | 2,8 | набран из однотипных элементов |
| 2 | Пустотность | Пуст | 5 | есть полости |
| 3 | Этап развития ТС по S-кривой | S-крив | 8 | классическая форма изделия |
| 4 | МАТХЭМ | МАТХЭМ | 1 | свернуты механически |
| 5 | Динамизация полей | ДинмзПолей | 1,4 | простой цилиндр, постепенно вытесняется смазка |
| 6 | Динамизация рабочих органов | ДинмзОрган | 2,5 | |
| 7 | Увеличение числа степеней свободы ТС | СтпнСвбоды | 2,5 | |
| 8 | Увеличение управляемости ТС | Упрвляемст | 1,4 | неуправляемая |
| 9 | Изменение устойчивости ТС | Устойчвст | 2,5 | |
| 10 | Развертывание ТС | Рзверт_ТС | 2 | |
| 11 | Свёртывание ТС | Сверт_ТС | 3,5 | |
| 12 | Согласование ТС | Сглс_ТС | 3,5 | |
| 13 | Согласование-рассогласование | С\Р | 5 | |
| 14 | Согласование изделия и инструмента | Издлиеинстр | 2,5 | |
| 15 | Согласование рабочих и транспортных движений | Раб\Трнсп | 2,5 | |
| 16 | Согласование-рассогласование структуры ТС | СтрукТС | 4 | |
| 17 | Согласование-рассогласование материалов | Матерл | 3 | электрохимическая нестабильность |

Продолжение табл.1

| № | Линии развития ТС | На схеме | АС | Обоснование |
|----|---|------------|--------|-------------|
| 18 | Согласование-рассогласование формы и размеров | Форм\Размр | 4 | |
| 19 | Согласование-рассогласование ритмики | Ритм | 3 | |
| 20 | Согласование-рассогласование потоков | Поток | 3 | |
| 21 | Согласование-рассогласование жувучести | Живч | 4 | |
| 22 | Вытеснение человека с исполнительского уровня | ЧелИсп | 10 | |
| 23 | Вытеснение человека с уровня управления | ЧелУпр | 10 | |
| 24 | Вытеснение человека с информационного уровня | ЧелИнф | 10 | |
| | Максимальная идеальность | | 97,1 | |
| | Коэффициент Китс | | 40,45% | |

Таблица 2

Линии развития провода AERO-Z

| № | Линии развития ТС | На схеме | AERO-Z | Обоснование |
|----|---|--------------|--------|---|
| 1 | Макро - Микро | МакрМикр | 2,8 | набран из однотипных элементов |
| 2 | Пустотность | Пуст | 6 | есть полости |
| 3 | Этап развития ТС по S-кривой | S-крив | 10 | Новая форма изделия |
| 4 | МАТХЭМ | МАТХЭМ | 1 | Свернуты механически |
| 5 | Динамизация полей | ДинмзПолей | 5,7 | форма буквой зет, не вытесняется смазка |
| 6 | Динамизация рабочих органов | ДинмзОрган | 2,5 | |
| 7 | Увеличение числа степеней свободы ТС | СтпнСвбоды | 5 | есть замок |
| 8 | Увеличение управляемости ТС | Упрвляемст | 6 | управляемая |
| 9 | Изменение устойчивости ТС | Устойчвст | 7,5 | |
| 10 | Развертывание ТС | Рзверт_ТС | 8 | |
| 11 | Свёртывание ТС | Сверт_ТС | 7 | |
| 12 | Согласование ТС | Сглс_ТС | 7 | |
| 13 | Согласование-рассогласование | С\Р | 10 | |
| 14 | Согласование изделия и инструмента | Издлие\инстр | 7 | |
| 15 | Согласование рабочих и транспортных движений | Раб\Трнсп | 10 | |
| 16 | Согласование-рассогласование структуры ТС | СтруктТС | 2 | |
| 17 | Согласование-рассогласование материалов | Матерл | 3 | электрохимическая нестабильность |
| 18 | Согласование-рассогласование формы и размеров | Форм\Размр | 10 | |

Продолжение табл.2

| № | Линии развития ТС | На схеме | AERO-Z | Обоснование |
|----|---|----------|--------|-------------|
| 19 | Согласование-рассогласование ритмики | Ритм | 10 | |
| 20 | Согласование-рассогласование потоков | Поток | 5 | |
| 21 | Согласование-рассогласование жувучести | Живч | 8 | |
| 22 | Вытеснение человека с исполнительского уровня | ЧелИсп | 10 | |
| 23 | Вытеснение человека с уровня управления | ЧелУпр | 10 | |
| 24 | Вытеснение человека с информационного уровня | ЧелИнф | 10 | |
| | Максимальная идеальность | | 163,5 | |
| | Коэффициент $K_{итс}$ | | 68,12% | |

Таблица 3

Линии развития провода J-POWER

| № | Линии развития ТС | На схеме | J-POWER | Обоснование |
|----|---|--------------|---------|---|
| 1 | Макро - Микро | МакрМикр | 2,8 | набран из одностипных элементов |
| 2 | Пустотность | Пуст | 6 | есть полости |
| 3 | Этап развития ТС по S-кривой | S-крив | 10 | Новая форма изделия |
| 4 | МАТХЭМ | МАТХЭМ | 1 | Свернуты механически |
| 5 | Динамизация полей | ДинмзПолей | 5,7 | форма буквой зет, не вытесняется смазка |
| 6 | Динамизация рабочих органов | ДинмзОрган | 2,5 | |
| 7 | Увеличение числа степеней свободы ТС | СтпнСвбоды | 5 | есть замок |
| 8 | Увеличение управляемости ТС | Упрвляемст | 6 | управляемая |
| 9 | Изменение устойчивости ТС | Устойчвст | 7,5 | |
| 10 | Развертывание ТС | Рзверт_ТС | 8 | |
| 11 | Свёртывание ТС | Сверт_ТС | 7 | |
| 12 | Согласование ТС | Сглс_ТС | 7 | |
| 13 | Согласование-рассогласование | С\Р | 10 | |
| 14 | Согласование изделия и инструмента | Издлие\инстр | 7 | |
| 15 | Согласование рабочих и транспортных движений | Раб\Трнсп | 10 | |
| 16 | Согласование-рассогласование структуры ТС | СтруктТС | 2 | |
| 17 | Согласование-рассогласование материалов | Матерл | 7 | электрохимическая нестабильность |
| 18 | Согласование-рассогласование формы и размеров | Форм\Размр | 10 | |
| 19 | Согласование-рассогласование ритмики | Ритм | 10 | |

Продолжение табл.3

| № | Линии развития ТС | На схеме | J-POWER | Обоснование |
|----|---|----------|---------|-------------|
| 20 | Согласование-рассогласование потоков | Поток | 5 | |
| 21 | Согласование-рассогласование жувучести | Живч | 8 | |
| 22 | Вытеснение человека с исполнительского уровня | ЧелИсп | 10 | |
| 23 | Вытеснение человека с уровня управления | ЧелУпр | 10 | |
| 24 | Вытеснение человека с информационного уровня | ЧелИнф | 10 | |
| | Максимальная идеальность | | 167,5 | |
| | Коэффициент $K_{ИТС}$ | | 67,91% | |

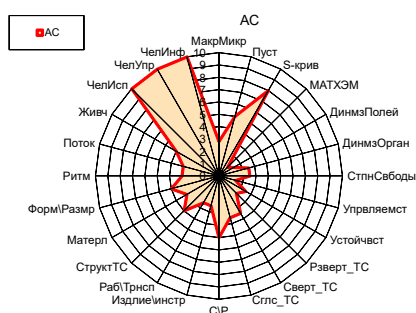


Рис. 1. Линии развития провода AC

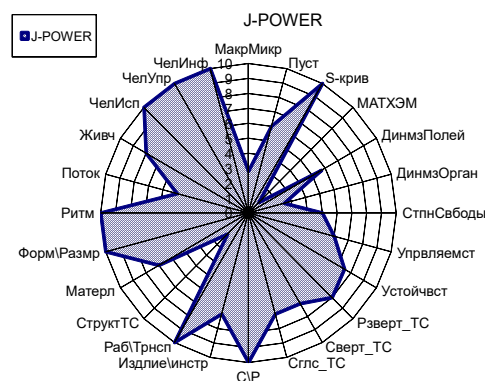


Рис. 3. Линии развития провода J-power

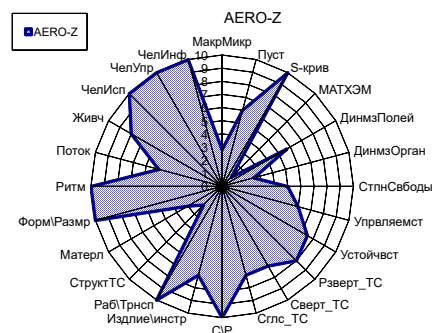


Рис. 2. Линии развития провода AERO-Z

Результаты расчета сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Сравнительные характеристики проводов $K_{ИТС}$

| Марка провода | AC | AERO-Z | J-Power |
|---------------|--------|--------|---------|
| AC | 40,45% | | |
| AERO-Z | | 68,12% | |
| J-POWER | | | 67,91% |

Анализ таблиц 1-3 и рисунков 1-3 и данных таблицы 4 позволяет сделать заключение об уровне развития ТС различных марок проводов.

Анализ результатов для различных проводов показывает что:

- Уровень технического развития проводов отличается значительно.

- $K_{ИТС}$ - уровня развития проводов AC составил 40%, т.е. «низкий»

- $K_{ИТС}$ - уровня развития проводов AERO-Z 68,12%, J-Power, 67, 91% соответствует уровню «высокому»

- Анализ рисунков 1-3, показывает, что возможно развивать провода по линиям развития Макро-микро, Структура ТС, динамизация органов ТС и т.д.

Литература

- 1 <http://news.elteh.ru/arh/2004/28/40.php> "Новости электротехники №4, (28) 2004.
- 2 <https://domikelectrica.ru/linii-s-provodom-aero-z-7-preimushhestv/>
- 3 Зарудский, Г.К. Инновационные провода для воздушных линий электропередачи. Часть 2 / Г.К. Зарудский, И.А. Платонова, Г.В. Шведов, А.Ю. Крохин // -Кабель-news. -2010. -№6-7. -С.48–51.

References

- 1 [1 http://news.elteh.ru/arh/2004/28/40.php](http://news.elteh.ru/arh/2004/28/40.php) "Novosti elektrotekhniki №4, (28) 2004.
- 2 <https://domikelectrica.ru/linii-s-provodom-aero-z-7-preimushhestv/>
- 3 Zarudskiy, G.K. Innovatsionnye provoda dlya vozdushnykh liniy elektroperedachi. Chast' 2 / G.K. Zarudskiy, I.A. Platonova, G.V. Shvedov, A.Yu. Krokhin // -Kabel'-news. -2010. -№6-7. -S.48–51.

УДК 656.6

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОРТОВЫХ ПРИЧАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГИБКИХ АРМИРУЮЩИХ ПОЛОТНИЩ

Юрий Игоревич Бик

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
строительного производства, конструкций и охраны водных ресурсов
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Вера Владимировна Дегтярева

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
теоретической и прикладной механики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Оксана Викторовна Приданова

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
строительного производства, конструкций и охраны водных ресурсов
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Валерий Владимирович Коновалов

кандидат технических наук, научный сотрудник
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Виктория Александровна Бобыльская

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
строительного производства, конструкций и охраны водных ресурсов
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Ольга Владимировна Спиренкова

кандидат технических наук, доцент кафедры
строительного производства, конструкций и охраны водных ресурсов
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Александра Сергеевна Тушина

старший преподаватель кафедры
строительного производства, конструкций и охраны водных ресурсов
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Аннотация

Разработана методика снижения напряженно-деформированного состояния больверков с помощью армирующих обратную засыпку наклонных гибких полотнищ и метод укладки в тело обратной засыпки больверка наклонного армирующего полотнища.

К известным способам уменьшения активных нагрузок относятся: частичная замена грунта, отсыпаемого за сооружением; устройство специальных платформ и консолей с тыловой стороны сооружения; установка специальных анкерных креплений в один или несколько рядов; искусственное закрепление грунта засыпки; создание разгружающих и экранирующих конструкций. Одним из наиболее рациональных и перспективных способов уменьшения бокового давления грунта в распорных причальных сооружениях является армирование грунта обратной засыпки.

Проведенные авторами эксперименты показали, что при установке нескольких полотнищ между ними образуются отдельные призмы обрушения грунта. Кроме того, если в неармированной засыпке призма обрушения образуется достаточно быстро, то в армированной засыпке этот процесс растягивается во времени и происходит нечетко. В первую очередь призма обрушения формируется в зоне выше верхнего армирующего мата.

Ключевые слова: больверк, тонкие подпорные стенки, напряженно-деформированное состояние, активное давление грунта, армирующее полотнище, усилие в анкерных тягах, изгибающий момент

INCREASING THE LOAD BEARING CAPACITY OF PORT BERTHING FACILITIES USING FLEXIBLE REINFORCING PANELS

Yuri I. Bik

Ph.D. in Engineering Science, Professor, Department of Civil Engineering Operations, Structures and Water Resources Conservation, Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Vera V. Degtyareva

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Theoretical and Applied Mechanics of Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Oksana V. Pridanova

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Civil Engineering Operations, Structures and Water Resources Conservation, Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Valery V. Konovalov

Ph.D. in Engineering Science, Researcher of Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Victoria A. Bobylskaya

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Civil Engineering Operations, Structures and Water Resources Conservation, Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Olga V. Spirenkova

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Civil Engineering Operations, Structures and Water Resources Conservation, Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Alexandra S. Tushina

Senior Lecturer, Department of Civil Engineering Operations, Structures and Water Resources Conservation, Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: yibik@mail.ru

Abstract

A methodology has been developed to reduce the stress-strain state of bulwarks with the help of inclined flexible panels reinforcing backfill and a method of laying of an inclined reinforcing panel in the backfill body of a bulwark.

Known methods for reducing active loads include: partial replacement of the soil that is dumped behind the structure; installation of special platforms and consoles at the rear side of the structure; installation of special anchor fasteners in one or several rows; artificial consolidation of soil backfill; creation of unloading and shielding structures. One of the most rational and promising ways to reduce the lateral pressure of the soil in the bulwark-type berths is to reinforce the backfill soil.

The experiments carried out by the authors showed that when installing several panels separate prisms of soil collapse are formed between them. Besides, if in a non-reinforced backfill, a collapse prism is formed rather quickly, then in a reinforced backfill this process stretches in time and is indeterminate. First of all, a collapse prism is formed in the zone above the upper reinforcing mat.

Key words: bulwark, thin retaining walls, stress-strain state, active soil pressure, reinforcing panel, force in anchor rods, bending moment.

Развитие портовой гидротехники всегда сопровождалось оценкой технического состояния существующих причальных сооружений, поскольку опыт эксплуатации всегда служил основным показателем правильности существующих теоретических решений и нормативных документов.

В настоящее время контроль за состоянием и технической эксплуатацией причалов общего пользования недостаточный, а на причалах, принадлежащих предприятиям и частным организациям, почти совсем отсутствует. Более того, многолетний опыт обследования набережных показывает, что для обеспечения их дальнейшей нормальной технической эксплуатации

большинство таких причалов нуждается в срочном ремонте и усилении несущих конструкций.

Вопросам оценки технического состояния и повышения надежности портовых гидротехнических сооружений посвящены работы Б.Ф. Горюнова, В.Д. Костюкова [1, 2] и др. Следует отметить, что большинство перечисленных исследований касается портовых сооружений европейской части России и не отражает особенностей работы гидротехнических сооружений в суровых климатических условиях Сибирского региона. В работах А.Я. Будина [3], хотя и рассмотрено применение причалов в условиях Крайнего Севера, но затрагиваются в основном вопросы эксплуатации только одного типа конструкции подпорных стенок – больверка.

Полезные материалы, касающиеся особенностей работы причальных набережных в суровых климатических условиях, приводятся в немногочисленных публикациях отдельных отечественных и зарубежных специалистов.

Результаты проведенных авторами многолетних обследований технического состояния портов Сибирского региона показывают, что в ряде случаев за счет использования скрытых резервов несущей способности удается либо частично ликвидировать моральный износ причальных набережных путем повышения эксплуатационных нагрузок или установки более тяжелого оборудования, либо сохранить эксплуатационные качества локально поврежденных или физически устаревших причалов.

Проблема эксплуатационной надежности причальных сооружений в данном регионе носит комплексный технико-экономический характер. Для обеспечения безотказной работы, а также минимальных затрат времени и средств на техническую эксплуатацию и ремонты конструкций причальных набережных, повышения их надежности и увеличения пропускной способности необходимо изучить причины и виды повреждений конструкций, определить действительную несущую способность причальных стенок и при необходимости провести усиление или разгрузку конструктивных элементов.

Из вышеизложенного следует необходимость разработки экономичных способов повышения несущей способности портовых гидротехнических сооружений.

Как известно, распорное давление грунта относится к числу основных нагрузок, действующих на причальные стенки. Решающее значение распорного давления грунтов становится особенно ощутимым по мере возрастания глубин.

Именно по этой причине конструкции распорного типа, несмотря на многие их достоинства, применительно к глубоководным причалам становятся нерентабельными из-за резкого утяжеления. Поэтому эффективные способы уменьшения бокового давления грунтов имеют существенное значение, как при проектировании новых сооружений, так и для усиления и реконструкции существующих причальных стенок.

Этому вопросу посвящено достаточно много работ, как в научно-исследовательском плане, так и в теоретическом.

К известным способам уменьшения активных нагрузок относятся: частичная замена грунта, отсыпаемого за сооружением; устройство специальных платформ и консолей с тыловой стороны сооружения; установка специальных анкерных креплений в один или несколько рядов; искусственное закрепление грунта засыпки; создание разгружающих и экранирующих конструкций. Однако, в большинстве случаев стоимость такой реконструкции не оправдывается положительным эффектом их воздействия.

Одним из наиболее рациональных и перспективных способов уменьшения бокового давления грунта в распорных причальных

сооружениях является армирование грунта обратной засыпки.

При армировании обычно преследуется цель упрочнения материала в нужном направлении. Это приводит к анизотропии свойств и к изменению напряженного состояния конструкции. Основным фактором при армировании сплошных сред является взаимодействие армирующих элементов с армируемой средой, которое определяется силами сцепления.

Идея армирования грунтов была предложена Ф.М. Шихиевым [4], обнаружившим армирующий эффект, снижающий боковое давление грунта.

В эти же годы способ армирования грунтов изучался французским инженером Х. Видалем [5]. Позднее, Х. Видале запатентовал в США конструкцию и способ устройства подпорных стенок из армогрунта. Этот способ был успешно применен при строительстве франко-итальянской автомагистрали на участке Вигно. Во время строительства автострады во французской Ривьере была сооружена очень легкая подпорная стенка, в обратной засыпке которой была уложена горизонтальная арматура в виде длинных металлических труб, разрезанных по диаметральной плоскости.

Разнообразные исследования способов армирования грунтовых оснований металлическими сетками и подпорными стенками проводились в Польше С. Хюккелем [6].

Методика расчета причальных стенок с засыпкой, армированной горизонтально уложенными рамами, разработана Ф.М. Шихиевым. Армирующие рамы, выполненные в виде стержней, брусьев и бревен, заводились за плоскость обрушения грунта с таким расчетом, чтобы была обеспечена их анкерка в устойчивой части засыпки. Силы трения, возникающие между армирующими рамами и грунтом, обеспечивали уменьшение бокового давления грунта на стенку. Недостатком предложенной оригинальной методики является двойной учет сил трения при расчетах эпюры бокового давления.

Метод расчета Л.Ф. Златоверховникова [7] основан на уточнении методики Ф.М. Шихиева, в частности, однократном учете сил трения.

Анализ имеющихся в печати работ, как отечественных, так и зарубежных, показал, что конструкции причальных набережных с армированной засыпкой, являясь наиболее перспективными, недостаточно изучены.

Полностью отсутствуют исследования учета влияния угла наклона армирующих полотнищ в теле засыпки и их положения на напряженно-деформированное состояние бойверков.

В данной работе авторы рассматривают один из возможных экономичных методов уменьшения активного давления грунта обратной засыпки на конструкцию причала в виде бойверка за счет армирования тела засыпки гибкими наклонными полотнищами.

Проведенные авторами экспериментальные исследования [8] показали, что установка в обратной засыпке гибких полотнищ оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние тонких подпорных стенок.

Влияние разгружающего наклонного полотнища на величину максимальных изгибающих моментов в больверке и усилия в анкерных тросах демонстрируют графики, приведенные на рис. 1 и 2.

$M_a, M_{ба}$ – максимальные изгибающие моменты в больверке при наличии армирующего полотнища и без него, соответственно.

$R_a, R_{ба}$ – усилия в анкерных тросах при наличии армирующего полотнища и без него. На обоих рисунках верхний график соответствует случаю армирования горизонтальными слоями, а нижний – наклонными.

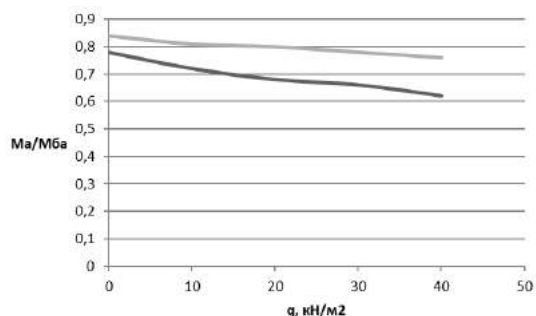


Рис. 1. Зависимость относительного максимального изгибающего момента в больверке от интенсивности распределенной нагрузки на поверхности грунта (q) при жесткости конструкции $EI = 21,105 \text{ МПа м}^4$

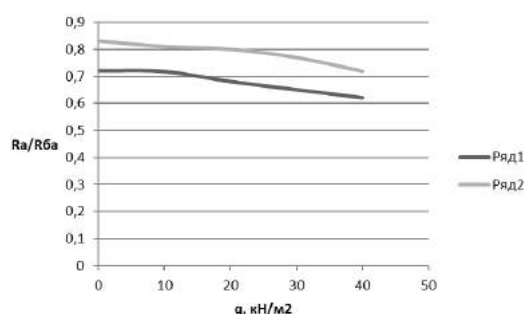


Рис. 2. Зависимость относительного усилия в анкерных тросах от интенсивности распределенной нагрузки на поверхности грунта (q) при жесткости конструкции $EI = 21,105 \text{ МПа м}^4$

Из приведенных графиков видно, что укладка армирующего полотна существенно сокращает нагрузки на сооружение, причем с увеличением интенсивности нагрузки на кордоне эта тенденция возрастает.

Результаты, полученные авторами при других значениях жесткости больверка ($EI = 48,72$ и $83,16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^4$), подтверждают приведенную на графиках рисунков 1 и 2 закономерность.

Кроме того, проведенные авторами эксперименты показали, что разгружающий эффект проявляется более явно в случае придания гибкому полотнищу наклона от стенки [9].

Армирующий эффект полотнища возрастает с увеличением его угла наклона и уменьшением жесткости подпорной стенки. Однако, исходя из

технологии возведения конструкции, угол наклона армирующих матов не может быть принят больше угла естественного откоса грунта обратной засыпки.

На основании вышесказанного, за оптимальное значение угла наклона гибких полотнищ рекомендуется принимать угол естественного откоса грунта засыпки.

Для оценки эффективности вышеописанного конструктивного решения и изучения степени влияния глубины закладки армирующего полотнища на величину активного давления грунта рассмотрим равновесие клина обратной засыпки, ограниченного сверху армирующим полотнищем (рис. 3).

Следует заметить, что активное давление грунта на участке H_1 (выше полотнища) необходимо рассчитывать как для неармированной засыпки.

Найдем равнодействующую активного давления грунта E_a на участке H_2 ниже армирующего полотна. Для этого запишем условия равновесия призмы обрушения ОЗОА (рис. 3):

$$\begin{aligned} E_a \cos \delta + T \cos \varphi - N \sin \varphi - R \cos(\varphi + \theta) &= 0 \\ E_a \sin \delta - T \sin \varphi - N \cos \varphi + R \sin(\varphi + \theta) - G &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где E_a – равнодействующая активного давления грунта;

T – сила трения грунта о гибкое полотнище;

N – сила давления на полотнище со стороны верхних слоев грунта и нагрузки q ;

R – реакция поверхности скольжения основания;

G – вес грунта призмы обрушения;

δ – угол трения грунта о стену;

φ – угол внутреннего трения грунта;

θ – угол призмы обрушения.

Решая составленную систему уравнений (1), получим выражение для равнодействующей активного давления грунта, действующей на стенку в зоне ниже армирующего полотнища

$$E_a = \frac{\left\{ \begin{aligned} &G + T [\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{tg}(\varphi + \theta)] + \\ &+ N [\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg}(\varphi + \theta)] \end{aligned} \right\}}{\sin \delta + \cos \delta \operatorname{tg}(\varphi + \theta)}. \quad (2)$$

Учтем, что сила трения определяется по закону Ш. Кулона

$$T = N \operatorname{tg} \beta, \quad (3)$$

где β – угол внутреннего трения грунта засыпки об армирующий мат, зависящий от шероховатости полотнища и принимаемый $\beta = (0,75 - 0,1) \varphi$.

Найдем нормальную реакцию поверхности полотнища

$$N = \left[q + \gamma H_1 + \frac{0,5 \gamma H_2 \sin \theta \sin \varphi}{\cos(\varphi - \theta)} \right] \frac{H_2 \sin \theta \cos^2 \varphi}{\cos(\varphi + \theta)} \quad (4)$$

Вычислим вес клина обратной засыпки ОЗОА, расположенного ниже армирующего полотнища (рис. 3).

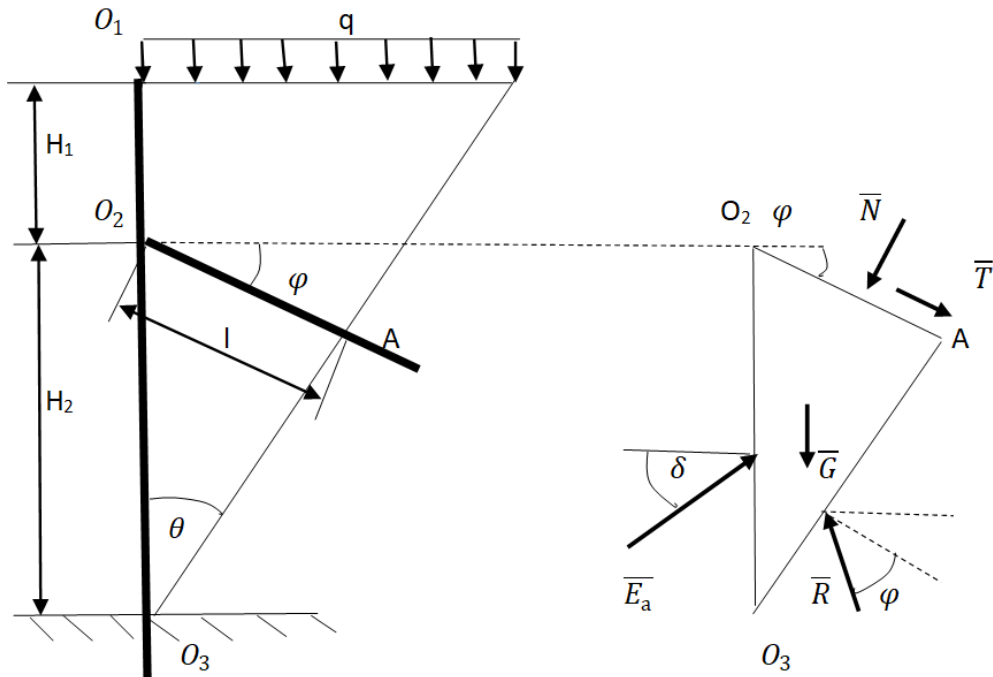


Рис. 3. Схема к расчету активного давления грунта

$$G = \frac{\gamma H_2^2 \sin \theta \cos \phi}{2 \cos(\phi - \theta)}. \quad (5)$$

Подставляя (3)-(5) в (2) получим окончательное выражение для равнодействующей активного давления грунта ниже полотнища

$$E_a = \frac{1}{[\sin \delta + \cos \delta \operatorname{tg}(\phi + \theta)]} \times \left[\frac{0,5\gamma H_2^2 \sin \theta \cos \phi}{\cos(\phi - \theta)} + \frac{q + \gamma H_1 + 0,5\gamma H_2 \sin \theta \sin \phi}{\cos(\phi - \theta)} \right] \times \left[\frac{H_2 \sin \theta \cos^2 \phi \left[\operatorname{tg} \beta \sin \phi + \cos \phi + \operatorname{tg}(\phi + \theta)(\sin \phi - \operatorname{tg} \beta \cos \phi) \right]}{\cos(\phi - \theta)} \right]. \quad (6)$$

Для определения угла наклона призмы обрушения θ , при котором равнодействующая активного давления грунта принимает минимальное значение, необходимо решить уравнение

$$\frac{dE_a}{d\theta} = 0. \quad (7)$$

Оптимальную глубину закладки гибкого полотнища находим, исследуя выражение для суммарной величины активного давления грунта по всей высоте подпорной стенки на экстремум. В результате преобразований получим

$$H_1 = \frac{H_2 \sin \theta \cos^2 \phi \cos(\theta + \beta)}{\left[\sin(\delta + \varphi + \theta) \cos(\phi - \theta) \times \left[\cos \beta \operatorname{tg}^2(45^\circ - \phi/2) \right] \right]} - \frac{H_2}{2}. \quad (8)$$

Расчеты, выполненные на основании вышеприведенной зависимости, показывают, что оптимальным является следующее соотношение

между высотами стенки выше и ниже армирующего полотнища $\frac{H_1}{H_2} = \frac{1}{4}$.

Отметим, что если по расчету величина H_1 для одноанкерных стенок получается меньше, чем расстояние от верха стенки до крепления анкерной тяги h_T , то значение H_1 из технологических соображений следует принимать равным $h_T + \Delta h$, где Δh из условия производства работ рекомендуется принимать не менее 1 м.

Проведенные авторами эксперименты показали, что при установке нескольких полотнищ между ними образуются отдельные призмы обрушения грунта. Кроме того, если в неармированной засыпке призма обрушения образуется достаточно быстро, то в армированной засыпке этот процесс растягивается во времени и происходит нечетко. В первую очередь призма обрушения формируется в зоне выше верхнего армирующего мата.

Выполненные авторами расчеты величины равнодействующей активного давления грунта показали, что армирующий эффект составляет от 28 до 32 процентов. Данный вывод подтверждается результатами проведенных модельных и натурных исследований [10].

Предложенная методика расчета активного давления грунта армированной обратной засыпки хорошо согласуется с данными экспериментальных исследований, проведенными авторами на крупномасштабной модели. Например, отклонение значения максимального изгибающего момента в стенке бьева, полученного на модели из шпунта «ШК-2», от вычисленного по приведенной методике составило порядка 6%. Измеренные и расчетные величины угла призмы обрушения составили 19° и 20° для эксперимента и расчетов, соответственно (отклонение в 5%).

Заключение

Проведенные исследования показывают, что армирование грунта обратной засыпки гибкими полотнищами существенно снижает напряженно-деформированное состояние тонких подпорных стенок и, следовательно, может быть рекомендовано как экономичное средство повышения несущей способности существующих и вновь возводимых больверков.

Необходимо отметить, что при увеличении нагрузки на поверхности грунта обратной засыпки, а

также при уменьшении жесткости подпорной стенки армирующий эффект становится более значимым.

Параметры напряженно-деформированного состояния больверка в значительной степени зависят от угла наклона армирующих полотнищ в обратной засыпке. Минимальные значения изгибающих моментов в стенке наблюдаются при армировании обратной засыпки с уклоном от больверка к материковому грунту. Аналогичный вывод можно сделать в отношении анкерных усилий.

Литература

- 1 Горюнов, Б.Ф. Специализированные причалы морских портов / Б.Ф. Горюнов. -М.: Транспорт, 1968. -312 с.
- 2 Костюков, В.Д. Надежность морских причалов и их реконструкция / В.Д. Костюков. -М.: Транспорт, 1987. - 223 с.
- 3 Будин, А.Я. Тонкие подпорные стенки для условий Севера / А.Я. Будин. -Л.: Стройиздат, ленингр. отд-ние, 1982. -288 с.
- 4 Шихиев, Ф.М. Новые конструкции глубоководных причальных сооружений и особенности их расчета / Ф.М. Шихиев, В.Н. Николау. -М.: Рекламинформбюро ММФ, 1976. -32 с.
- 5 Vidal H.C. United States Patent office / H.C. Vidal. – France, 1971.
- 6 Huckel St. Nowy material – «grunt zbrojony» / St. Huckel // Yospodarska Wodna, № 3, 1967. – S.2-8.
- 7 Златоверховников Л.Ф. Снижение активного давления грунта на подпорные стенки при помощи горизонтальных полотнищ / Л.Ф. Златоверховников // тр. Союзморниипроект, вып. II. -М.: Транспорт, 1962. - С.16-32.
- 8 Бик, Ю.И. Облегчение подпорных стенок путем армирования засыпки / Ю.И. Бик // Известия вузов. Строительство и архитектура. -1991. -№1. -С.115-116.
- 9 Бик, Ю.И. Повышение надежности портовых гидротехнических сооружений/ Ю.И. Бик. -Новосибирск: НГАВТ, 1997. -77 с.
- 10 Бик, Ю.И. Индекс безопасности как мера надежности строительных конструкций/ Ю.И. Бик, В.В. Дегтярева // -Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. -2016. -№3-4. -С.57-59.

References

- 1 Goryunov, B.F. Spetsializirovannye prichaly morskikh portov / B.F. Goryunov. -M.: Transport, 1968. -312 s.
- 2 Kostyukov, V.D. Nadezhnost' morskikh prichalov i ikh rekonstruktsiya / V.D. Kostyukov. -M.: Transport, 1987. -223 s.
- 3 Budin, A.Ya. Tonkie podpornye stenki dlya uslovii Severa / A.Ya. Budin. -L.: Stroizdat, leningr. otd-nie, 1982. -288 s.
- 4 Shikhiyev, F.M. Novye konstruksii glubokovodnykh prichal'nykh sooruzhenii i osobennosti ikh rasche-ta / F.M. Shikhiyev, V.N. Nikolau. -M.: Reklaminformbyuro MFM, 1976. -32 s.
- 5 Vidal H.C. United States Patent office / H.C. Vidal. – France, 1971.
- 6 Huckel St. Nowy material – «grunt zbrojony» / St. Huckel // Yospodarska Wodna, № 3, 1967. – S.2-8.
- 7 Zlatoverkhovnikov L.F. Snizhenie aktivnogo davleniya grunta na podpornye stenki pri pomoshchi go-rizontal'nykh polotnishch / L.F. Zlatoverkhovnikov // tr. Soyuzmorniiproekt, vyp. II. -M.: Transport, 1962. -С.16-32.
- 8 Bik, Yu.I. Oblegchenie podpornykh stenok putem armirovaniya zasyypki / Yu.I. Bik // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura. -1991. -№1. -S.115-116.
- 9 Bik, Yu.I. Povyshenie nadezhnosti portovykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii/ Yu.I. Bik. -Novosibirsk: NGAVT, 1997. -77 s.
- 10 Bik, Yu.I. Indeks bezopasnosti kak mera nadezhnosti stroitel'nykh konstruksii/ Yu.I. Bik, V.V. Degtyareva // -Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. -2016. -№3-4. -S.57-59.

УДК 621.316.176.052.4:622.323/.324

КОНДУКТИВНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ ПО МЕДЛЕННОМУ ИЗМЕНЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ СЕТЯХ 10 кВ НЕФТЕГАЗОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ТЕРМИНАЛОВ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ

Елена Васильевна Иванова

доктор технических наук, профессор кафедры
электроэнергетических систем и электротехники
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: keses@nsawt.ru

Марк Николаевич Романов

доцент кафедры
электрооборудования и автоматики
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: kesbs@nsawt.ru

Василий Герасимович Сальников

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
электроэнергетических систем
Сибирский государственный университет водного транспорта
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: keses@nsawt.ru

Аннотация

В работе рассмотрены аспекты возникновения кондуктивных низкочастотных помех по медленному изменению напряжения в сетях 10 кВ нефтегазовых транспортных терминалов северных регионов России. Работа нефтегазовых транспортных терминалов характеризуется резкопеременной нагрузкой, что приводит к медленному изменению напряжения на величины, превышающие нормированные ГОСТ. Транспортные терминалы нефтегазовых месторождений характеризуются преобладанием потребителей электроэнергии первой категории, электроснабжение которых осуществляется от двух независимых взаимно резервирующих источников питания. Для нефтегазовых транспортных терминалов характерно, что в качестве независимых источников питания используются местные электростанции. Бесперебойная работа электроприёмников нефтегазовых транспортных терминалов напрямую связана с работой распределительных сетей 6-35 кВ, которые могут работать как в замкнутом, так и в разомкнутом режимах. Медленное изменение напряжения вызывает появление кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи. На основании экспериментальных данных определены уровни кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех и даны рекомендации по определению оптимального места разрыва сети 10 кВ.

Ключевые слова: медленное изменение напряжения, кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха, надёжность электроснабжения, замкнутые сети, рациональное место размыкание сети 10 кВ

CONDUCTED LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE DUE TO A SLOW VOLTAGE CHANGE IN 10 KV CLOSED CIRCUITS OF OIL AND GAS TRANSPORT TERMINALS IN THE NORTHERN REGIONS OF RUSSIA

Elena V. Ivanova

Dr.Sci.Tech, Professor, Department of Electric Power Systems and Electric Equipment of Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: keses@nsawt.ru

Mark N. Romanov

Associate Professor, Department of Electric Equipment and Automation of Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: kesbs@nsawt.ru

Vasily G. Salnikov

Dr.Sci.Tech, Professor, Department of Electric Power Systems of Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, st. Schetinkina, 33
e-mail: keses@nsawt.ru

Abstract

The paper considers aspects of occurrence of conductive low-frequency interferences due to a slow voltage change in 10 kV circuits of oil and gas transport terminals in the Northern regions of Russia. Operation of oil and gas transport terminals is characterized by an abruptly variable load, which leads to a slow change in voltage by values in excess of the standardized by GOST. The transport terminals of oil and gas fields are characterized by a predominance of electricity consumers of the first category, which are supplied from two independent, mutually redundant power sources. It is typical for oil and gas transport terminals that local power plants are used as independent power sources. Uninterrupted operation of electric receivers of oil and gas transport terminals is directly related to the operation of distribution networks of 6-35 kV, which can operate both in closed and open modes. Slow voltage variation causes conductive low-frequency electromagnetic interference. Based on experimental data, the levels of conductive low-frequency electromagnetic interference are determined and recommendations are given for determining the optimal location for a 10 kV circuit breaker.

Keywords: slow voltage change, conductive low-frequency electromagnetic interference, reliability of power supply, closed networks, rational location of 10 kV circuit breaker.

Увеличение темпов добычи, переработки и транспортировки нефти и газа в Северных регионах Российской Федерации обуславливают их интенсивную электрификацию, не смотря на удалённость от действующих электроэнергетических систем. При этом необходимо обеспечить нормируемую степень надёжности электроснабжения потребителей электроэнергии и электромагнитную совместимость её потребителей. Нефтегазовые транспортные терминалы характеризуются преобладанием потребителей электроэнергии 1-ой категории, перерыв в электроснабжении которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный ущерб природному хозяйству, выход из строя дорого стоящего оборудования. Поэтому, согласно «Правилам

устройства электроустановок» [1], электроснабжение приёмников 1-ой категории осуществляется от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, причём в качестве независимого источника питания используются местные электростанции. Электроснабжение Северных регионов осуществляют по воздушным линиям электропередачи напряжением 110 кВ и выше. Надёжная работа электроприёмников всех категорий зависит от работы распределительных сетей напряжением от 6 до 35 кВ. Такие сети строятся по замкнутому принципу, так как должны осуществлять электроснабжение потребителей не менее, чем с двух сторон, относятся к местным электрическим сетям [2] и могут работать как в замкнутом, так и в разомкнутом режимах (рис. 1).

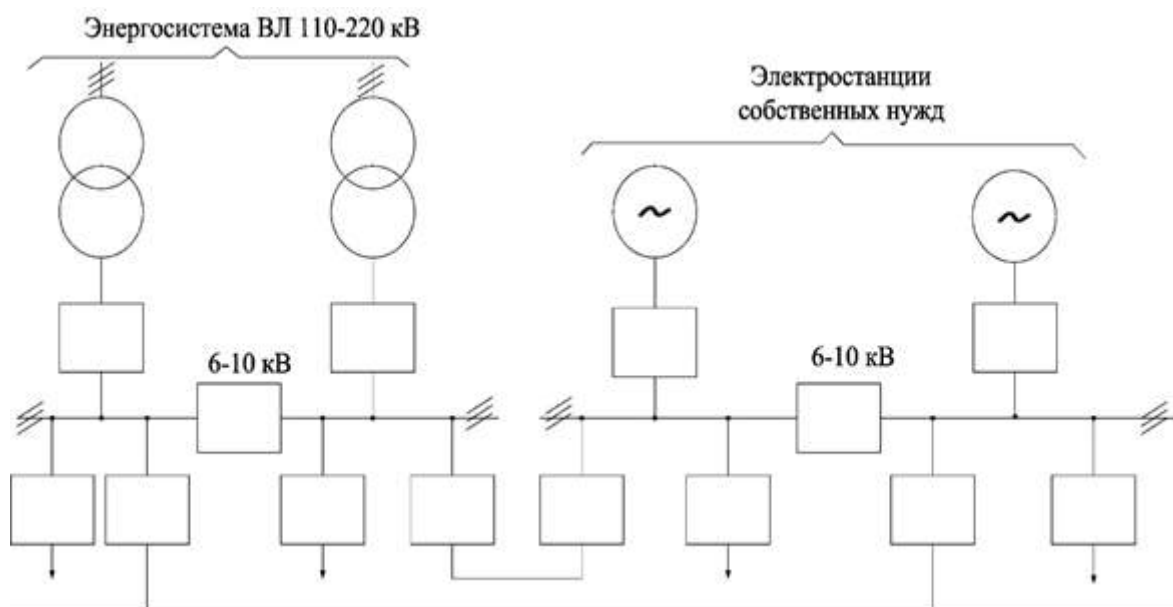


Рис. 1. Принципиальная схема электроснабжения удалённого объекта

Местные электрические сети характеризуются небольшим радиусом действия (15-30 км), что определяет использовать изолированную нейтраль, так как ёмкостной ток замыкания на землю не превышает нормированных значений [3] и даёт при эксплуатации некоторые преимущества, обусловленные отсутствием дугогасящих реакторов. Однако, такие сети обладают сложной электромагнитной обстановкой, снижающей

надёжность и эффективность электроснабжения, что объясняется нарушением регламентов уровней электромагнитной совместимости технических средств. Местные сети, построенные по замкнутому принципу, работают в разомкнутом режиме без учёта оптимального места размыкания, при этом не учитывается появление кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех.

Уровень напряжения на шинах подстанции узла нагрузки электрической сети определяется балансом реактивной мощности по электроэнергетической системе и балансом реактивной мощности в этом узле. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что уровни напряжения в отдельных узлах электрических сетей 10 кВ не соответствует допустимым в нормальной эксплуатации предельным уровням [4]. Снижение напряжения сверх допустимого значения возникает при работе мощных потребителей электроэнергии, нагрузка которых носит резкопеременный характер, что характерно для нефтегазовых месторождений и транспортных терминалов.

Медленные изменения напряжения δU определяют у приёмников электроэнергии, наиболее чувствительных к величине напряжения, а также в наиболее удалённых точках подключения энергопотребителей. Величину δU можно определить по формуле [4]

$$\delta U = \sum_{i=1}^m E_{gi} - \sum_{k=1}^n \Delta U_k, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^m E_{gi}$ – алгебраическая сумма добавок напряжения, создаваемая устройствами регулирования, В; m – количество устройств регулирования; $\sum_{k=1}^n \Delta U_k$ – алгебраическая сумма потерь напряжения на участках сети, В.

Падение напряжения на k -ом участке сети определяется по формуле

$$\Delta U_k = \frac{P_k R_k + Q_k X_k}{U}, \quad (2)$$

где P_k, Q_k – соответственно активная и реактивная мощности, протекающие по k -ому участку, Вт, вар; R_k, X_k – активное и реактивное сопротивления k -го участка сети, Ом; U – напряжение в точке присоединения приёмника электроэнергии, В.

Приведённые выражения показывают, что величина медленного изменения напряжения определяется уровнем напряжения в точке присоединения электроприёмника, параметрами сети и режимами нагрузки. Таким образом, можно сделать вывод, что δU является непрерывно распределённой случайной величиной, зависящей от многих случайных факторов. Эта величина связана с полем событий и характеризуется таблицей вероятностей [5]:

$$\left(\begin{matrix} \delta U_{y1}, \delta U_{y2}, \dots, \delta U_{yi}, \dots, \delta U_{yN} \\ P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N \end{matrix} \right), \quad (3)$$

где $\delta U_{y1}, \delta U_{y2}, \dots, \delta U_{yi}, \dots, \delta U_{yN}$ – различные установившиеся отклонения напряжения в течение суток, %; $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N$ – вероятности появления указанных отклонений напряжения.

При превышении величины медленного изменения напряжения δU от нормально допустимого значения, часть поля событий (3) обуславливает кондуктивную низкочастотную

электромагнитную помеху, вызванную особенностями технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии. Процесс возникновения кондуктивной низкочастотной помехи по медленному изменению напряжения можно представить следующей математической моделью:

$$\begin{aligned} & \delta U_y [P(\delta U_{y,n} \leq \delta U_y \leq \delta U_{y,n}) + \\ & + P(-\delta U_{y,n} \leq \delta U_y \leq -\delta U_{y,n}) > 0,05]; \\ & P(\delta U_{y,n} < \delta U_y < \infty) + \\ & + P(-\infty < \delta U_y < -\delta U_{y,n}) \neq 0] \subset \delta U_n, \quad (4) \end{aligned}$$

где δU_n – кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха по медленному изменению напряжения в электрической сети, %; $P(\delta U_{y,n} \leq \delta U_y \leq \delta U_{y,n})$, $P(-\delta U_{y,n} \leq \delta U_y \leq -\delta U_{y,n})$, $P(\delta U_{y,n} < \delta U_y < \infty)$, $P(-\infty < \delta U_y < -\delta U_{y,n})$ – вероятности появления случайной величины δU_y соответственно в интервалах $(\delta U_{y,n}, \delta U_{y,n})$, $(-\delta U_{y,n}, -\delta U_{y,n})$, $(\delta U_{y,n}; \infty)$ и $(-\infty; -\delta U_{y,n})$.

На основании теоремы о равенстве начальных моментов и следствия из теоремы о равенстве центральных моментов распределения непрерывной случайной величины и её производящей функции можно записать [5]

$$M[\delta U_y] = M[\delta U_n]; \quad (5)$$

$$\sigma[\delta U_y] = \sigma[\delta U_n], \quad (6)$$

где $M[\delta U_y], M[\delta U_n]$ – математические ожидания соответственно величины δU_y и δU_n , %; $\sigma[\delta U_y], \sigma[\delta U_n]$ – средние квадратические отклонения этих величин, %.

Используя теорему единства и теорему непрерывности теории производящих функций можно записать

$$\begin{aligned} & \psi \{ \delta U_y, M[\delta U_y], \sigma[\delta U_y] \} = \\ & = \psi \{ \delta U_n, M[\delta U_n], \sigma[\delta U_n] \} \end{aligned}, \quad (7)$$

где $\psi \{ \delta U_y, M[\delta U_y], \sigma[\delta U_y] \}$ – плотность вероятности распределения случайной величины δU_y , 1/%; $\psi \{ \delta U_n, M[\delta U_n], \sigma[\delta U_n] \}$ – тоже величины δU_n , 1/%.

Математическая обработка результатов измерений величины δU_n показала, что распределение случайной величины больше соответствует нормальному закону распределения теории вероятности, чем равномерному закону. В связи с этим на основании уравнения (7) можно принять, что кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха тоже следует нормальному закону распределения. Поэтому можно записать:

$$\begin{aligned} \psi(\delta U_y) &= \phi\{\delta U_n, M[\delta U_n], \sigma[\delta U_n]\} = \\ &= \phi\{\delta U_y, M[\delta U_y], \sigma[\delta U_y]\} = \quad (8) \\ &= \frac{1}{\sigma[\delta U_y] \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\delta U_y - M[\delta U_y])^2}{2\{\sigma[\delta U_y]\}^2}\right] \end{aligned}$$

Вероятность появления кондуктивной низкочастотной помехи определится по выражению:

$$\begin{aligned} P(\delta U_n) &= P(\delta U_{y,n} \leq \delta U_y \leq \delta U_{y,n}) + \\ &+ P(\delta U_{y,n} < \delta U_y = \delta U_n < \infty) + \\ &+ P(-\delta U_{y,n} \leq \delta U_y \leq -\delta U_{y,n}) + \\ &+ P(-\infty < \delta U_y = \delta U_n < -\delta U_{y,n}) - 0,05 \quad (9) \end{aligned}$$

Методика расчёта кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех по установившемуся медленному изменению напряжения описывается в виде алгоритма, что позволяет его использовать для дальнейших исследований на примере разомкнутой сети 1СШ 10 кВ КТП «Ямбург» в режиме, когда электростанции собственных нужд были отключены. Вероятности попадания δU_{yi} в i -ый интервал P_i определены опытным путём и построена гистограмма распределения медленных изменений напряжения 10 кВ за сутки (рис. 1).

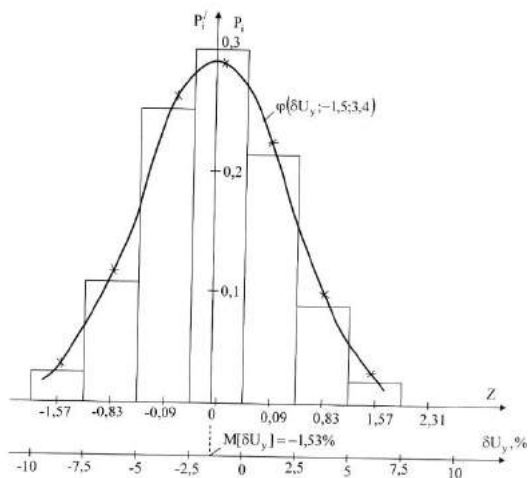


Рис. 2. Гистограмма распределения медленных изменений напряжения в сети 10 кВ совмещённая с графиком нормальной плотности вероятности распределения $\phi(\delta U_y; -1,53; 3,4)$

Как видно из полученных результатов, параметры распределения медленных изменений напряжений составляют:

- математическое ожидание $M[\delta U_y] = -1,53\%$;
- среднее квадратическое отклонение $\sigma[\delta U_y] = 3,4\%$;
- относительное значение времени превышения нормально допустимого уровня ЭМС за сутки $T_1 = 20,5\%$;

– относительное значение времени превышения предельно допустимого уровня ЭМС $\delta U_{y,n}$ за сутки $T_2 = 0$.

Из полученных результатов видно, что требования ГОСТ 32144-2013 не выполняются. Для математического описания кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи необходимо определить закон и плотность вероятности распределения δU_y в электрической сети [5].

Вероятность появления кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по медленному изменению напряжения, согласно формулы (9) составляет [5]

$$\begin{aligned} P(\delta U_n) &= P_2(-\infty < \delta U_y < -5) - 0,05 = \\ &= 0,15 - 0,05 = 0,1 \quad (10) \end{aligned}$$

Таким образом, на рассмотренной разомкнутой сети 10 кВ наблюдается пониженное напряжение. Кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха δU_n формируется значением δU_y , находящимся в пределах (-10,-5) и характеризуется на основании формул (5) и (6) следующими параметрами: $M[\delta U_n] = -1,53\%$, $\sigma[\delta U_n] = 3,4\%$. Вероятность появления кондуктивной низкочастотной помехи, составляющая 0,1, в 2 раза превышает допустимую вероятность нахождения величины δU_y за нормально допустимыми пределами -5%.

Применяемые в настоящее время принципы построения электрических сетей, разработанные без учёта нелинейных нагрузок, не рассматривали вопросы качества электроэнергии и необходимости подавления кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех.

В нашем случае в рассматриваемых сетях наблюдаются кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи, нарушающие электромагнитную совместимость технических средств [2]. Следовательно, необходимо решить задачу построения электрической сети с учётом параметров электромагнитной обстановки в ней. Для этого необходимо использовать новый принцип построения сети – принцип подавления кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех, распространяющихся по сетям. Этот принцип необходимо соблюдать как при проектировании, так при эксплуатации сетей. Основанием для такого подхода к улучшению электромагнитной обстановки в сетях и системах является требование стандарта о подавлении кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех.

В общем случае определение рационального разреза замкнутой сети приводит к необходимости решения одновременно задач по выбору числа источников питания, способов резервирования и обеспечения нормируемых уровней электромагнитной совместимости технических средств. Однако, действующие замкнутые сети от 6 до 35 кВ построены, в последние 15-20 лет, соответствуют требованиям директивных документов [6], оснащены системами автоматического ввода резерва и автоматического

повторного включения. Это означает, что с точки зрения построения рассматриваемые сети обеспечивают расчётную нормируемую надёжность электроснабжения потребителей. Следовательно, нет каких-либо замечаний по выбору числа и мощности источников питания и трансформаторных подстанций, по конфигурации сети. Для обеспечения нормируемых уровней ЭМС определим рациональное место размыкания сети от 6 до 35 кВ с учётом необходимости подавления кондуктивных ЭМП и особенности режимов местных сетей, удалённых от энергосистем. В процессе эксплуатации нет возможности часто изменять положения разрывов в соответствии с графиком нагрузки. На основании этого достаточно для каждой замкнутой сети определить одно место размыкания при наибольших нагрузках.

Учитывая изложенное и принимая в качестве критерия сравнительной экономической эффективности различных точек размыкания замкнутой сети от 6 до 35 кВ, приведённые годовые затраты, можем представить целевую функцию суммарными потерями мощности на n -участках сети в максимальном режиме нагрузки

$$Z_r = \frac{1}{U_n^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) R_i = \min, \quad (12)$$

при условии

$$\left. \begin{aligned} \delta U_n &= 0 \\ \delta(\Delta f) &= 0 \\ \delta K_U &= 0 \\ \delta X_i &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где U_n – номинальное напряжение сети, В; R_i, P_i, Q_i – соответственно сопротивление, активная и реактивная мощности i -го участка сети, Ом; Вт; вар; δU_n – кондуктивная ЭМП по медленному изменению напряжения; $\delta(\Delta f)$ – кондуктивная ЭМП по отклонению частоты; δK_U – кондуктивная ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения; δX_i –

кондуктивная ЭМП по i -му показателю КЭ, который как и приведённые показатели КЭ ($U_y, \Delta f, K_U$) не соответствуют требованиям стандарта [6].

Учитывая незначительное число узлов нагрузки (2-3) в рассматриваемой сети, решение оптимизационной задачи (12) можно осуществить методом дискретного спуска. Простейший подход заключается в поочерёдном переборе на персональном компьютере всех возможных сочетаний разрывов с контролем по ограничивающим условиям. Таким образом, решение этой задачи не отличается от решений известных электроэнергетике оптимизационных задач, например, задачи по выбору оптимальной схемы электроснабжения промышленного предприятия [1].

Задача (12) является корректно поставленной, потому что для всяких исходных данных рассматриваемого i -го варианта разрывов сети

$$\left. \begin{aligned} P_i &\in P \\ Q_i &\in Q \\ R_i &\in R \\ i &\in n \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

существует однозначное решение

$$Z_{rn} \in Z_r = \min. \quad (15)$$

Эта задача устойчива на пространстве

$$\sum_{i=1}^k \delta X_i = 0, \quad (16)$$

где k – количество кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех, распространяющихся по сетям.

Таким образом, экономичный режим работы замкнутой сети от 6 до 35 кВ обуславливается рациональным местом размыкания этой сети. Сокращение потерь мощности особенно актуально для регионов, удалённых от электроэнергетических систем России, имеющих электростанции собственных нужд, работающие на привозном топливе [6].

Литература

- 1 Правила устройства электроустановок. -М.: Изд-во «ДЕАН», 2001. -928 с.
- 2 Концепция повышения качества функционирования несимметричных систем электроснабжения общего назначения при гармоническом воздействии / Ю.М. Денчик [и др.] // -Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. -2017. -№ 3-4. -С.172-175.
- 3 Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности / В.Г. Сальников [и др.] // -Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. -2018. -№1. -С.177-182.
- 4 Карташёв, И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / И.И.Карташёв; под ред. М.А. Калугиной. -М.: Изд-во МЭИ, 2000. -120 с.
- 5 Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н.В. Смирнов. И.В. Дудин-Барковский. -М.: Наука, 1965. -511 с.
- 6 Иванова, Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / Е.В. Иванова; под ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека. -Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2006. -432 с.

Reference

- 1 Pravila ustroistva elektroustanovok. -M.: Izd-vo «DEAN», 2001. -928 s.
- 2 Kontsepsiya povysheniya kachestva funktsionirovaniya nesimmetrichnykh sistem elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya pri garmonicheskom vozdeistvii / Yu.M. Denchik [i dr.] // -Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego vostoka. -2017. -№ 3-4. -S.172-175.
- 3 Algoritm opredeleniya konduktivnoi nizkochastotnoi elektromagnitnoi pomekhi po koeffitsientu nesimmetrii napryazheniya po obratnoi posledovatel'nosti / V.G. Sal'nikov [i dr.] // -Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego vostoka. -2018. -№1. -S.177-182.
- 4 Kartashev, I.I. Kachestvo elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya. Sposoby ego kontrolya i obespecheniya / I.I.Kartashev; pod red. M.A. Kaluginoi. -M.: Izd-vo MEI, 2000. -120 s.
- 5 Smirnov, N.V. Kurs teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistiki / N.V. Smirnov. I.V. Dudin-Barkovskii. -M.: Nauka, 1965. -511 s.
- 6 Ivanova, E.V. Konduktivnye elektromagnitnye pomekhi v elektroenergeticheskikh sistemakh / E.V. Ivanova; pod red. V.P. Gorelova, N.N. Lizaleka. -Novosibirsk: Novosib. gos. akad. vod. transp., 2006. -432 s.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное ([ISSN № 2073-7173](#)) издание
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3

e-mail: mit-journal@mail.ru www.morintex.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
6. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов»

Документы должны быть присланы по почте в адрес редакции.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставляемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ**Гайкович А. И.****Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Архипов А. В., Рыбников Н. И.**Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П. А.**Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А. И.**Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**